

КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени ВИТУСА БЕРИНГА
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГЕОГРАФИИ, ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ ДВО РАН

ФИЗИКА ЗЕМЛИ
И
ГЕОДИНАМИКА

*Допущено УМО по классическому университетскому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальности 020302 Геофизика*

Петропавловск – Камчатский 2009

УДК 528.2+550.3+551.1
ББК 26.891

Рецензенты:

Ведущий научный сотрудник сектора геодинамики Музея землеведения МГУ
доктор геол. - мин. наук
Ю.И. Галушкин
Заведующий сектором геодинамики Музея землеведения МГУ
доктор технических наук
Е.П. Дубинин

Викулин А.В.

Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие для геофизических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 463 с.

ISBN 5-7968-0358-1 (978-5-7968-0358-5)

Книга является вторым, переработанным, изданием «Введения в физику Земли», вышедшего в свет в Петропавловске-Камчатском в 2004 г.

Книга состоит из двух частей. Первая часть включает все ставшие уже классическими разделы физики Земли: «Материя. Движение», «Фигура Земли и ее внутреннее строение», «Физика землетрясений», «Строение и состояние Земли по данным сейсмологии», «Плотность, сила тяжести и давление внутри Земли», «Гравитационное поле Земли», «Геомагнитное поле», «Тепловое поле Земли», «Реология Земли, природа ее основных слоев и разделяющих их границ».

Вторая часть книги «Введение в «вихревую» геодинамику» является разделом, написанным на основании новых научных результатов, полученных как самим автором, так и другими исследователями. Эта часть книги представляет первую попытку по-новому, с позиции важности вращательных и вихревых движений в геологии, подойти к объяснению геодинамических процессов и «через них» к физическому состоянию недр Земли.

Допущено Учебно-Методическим Объединением по классическому университетскому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 020302 Геофизика.

ISBN 5-7968-0358-1 (978-5-7968-0358-5)

© Викулин А.В.
© КамГУ им. Витуса Беринга

ПРЕДИСЛОВИЕ

(из введения к изданию 2004 г.)

*«... и все-таки она вертится»
Галилео Галилей*

Несколько лет тому назад при Камчатском государственном педагогическом университете (КГПУ) была открыта новая кафедра «Географии, геологии и геофизики». Встал вопрос о преподавании предметов геофизических специальностей.

Настоящее учебное пособие составлено в полном соответствии с программой дисциплины «Физика Земли» для специальности 011200 «Геофизика», утвержденной Министерством образования Российской Федерации в 2000 г. В качестве основы курса были взяты материалы, изложенные в ставших теперь классическими монографиях Г. Джеффриса [1960], Б. Гутенберга [1963], В.А. Магницкого [1965], Ф. Стейси [1972], М. Ботта [1974], К.Е. Буллена [1978] и других. В этих монографиях авторы старались подать материал так, чтобы он, по возможности, освещал физику всех составляющих предмета, тем самым, создавая единую картину о сложных геофизических явлениях, протекающих в пределах всех слоев Земли. Следует сказать, что этими авторами под разными углами зрения и с разной детальностью такая общая картина жизни Земли была создана.

Многочисленные данные, постоянно появляющиеся в геофизических узкоспециализированных научных журналах, постоянно «высвечивают» те недоработки и «натяжки», которые с неизбежностью всегда возникали и теперь возникают у авторов, пытающихся построить на достаточно высоком физическом уровне единую картину «жизни» Земли, других планет солнечной системы, звезд, галактик и всей Вселенной. В последние годы появились монографии, авторы которых предприняли попытки построения достаточно общей картины геофизических процессов, протекающих на Земле и других планетах солнечной системы, исходя из нетрадиционных представлений, основанных на новых данных. К числу таких работ, в первую очередь, следует отнести монографии К.Ф. Тяпкина [1998], В.В. Орленка [2000], В.В. Кузнецова [2000] и К.Г. Леви с соавторами [2002, 2003]. Их авторы на протяжении уже многих лет читают курсы «Физика Земли», «Геофизика» и «Современная геодинамика и гелиогеодинамика» в высших учебных заведениях в разных городах бывшего СССР. В этом ряду следует выделить оригинальные монографии А.И. Дмитриевского, И.А. Володина и Г.И. Шипова [1993] и Ю.С. Потапова, Л.П. Фоминского и С.Ю. Потапова [2000]. Интересно отметить, что новыми, нетрадиционными моментами всех этих новых книг являются идеи, связанные с важностью для геофизических явлений, в первую очередь, ротационных движений.

В предлагаемой читателям книге автор предпринял попытку совместить в рамках одного курса и «классические» и «нестандартные» (по крайней мере, в настоящее время) представления. Новым моментом книги является идея важности вращательного момента блоков земной коры. Насколько это автору удалось, судить читателю.

Благодарности. Автор благодарит рецензентов сотрудников музея Землеведения МГУ д.т.н. Ю.И. Галушкина и д.г.-м.н. Е.П. Дубинина за труд по изучению книги и внесения в нее существенных замечаний. Автор признателен И.В. Мелекесцеву за дискуссии и обсуждение работы на всех ее этапах; М.А. Магуськину, А.В. Кирюхину и В.И. Дядину за прочтение отдельных глав, замечания и дополнения; В.М. Нановскому и С.А. Викулиной за помощь при изготовлении рисунков; Д.Р. Акмановой и Н.А. Осиповой за помощь при подборе материалов и построение рисунков второй части книги. Автор признателен Е.А. Сиваеву за труд по редактированию книги.

ВВЕДЕНИЕ

Все основные разделы, составляющие «Физику Земли», с разной полнотой и достаточно подробно изложены в ставших уже классическими монографиях Е.Ф. Саваренского и Д.П. Кирноса [1955], Г. Джеффриса [1960], Б. Гутенберга [1963], В.С. Сафронова [1969], В.Н. Жаркова, В.П. Трубицына, Л.В. Самсоненко [1971], Е.Ф. Саваренского [1972], Ф. Стейси [1972], М. Ботта [1974], С.А. Ушакова [1974], К.Е. Буллена [1978], Е.В. Артюшкова [1979], В.С. Сафронова, А.В. Витязева [1983], А.В. Витязева, Г.В. Печерниковой, В.С. Сафронова [1990], и др. Наиболее полно и последовательно все данные по внутреннему строению и физике Земли представлены в известных книгах В.А. Магницкого [1953, 1965], на которых, по сути, и выросли все российские и многие из зарубежных геофизиков.

Книга В.А. Магницкого [1965] «Внутренне строение и физика Земли», представляет собой законченное, последовательное и в разумных пределах взаимно согласованное описание всех основных разделов, характеризующих внутреннее строение Земли и ее *физику*. По сути, к курсу «Физика Земли», созданному В.А. Магницким, в настоящее время нового добавить практически нечего, поскольку он опирается на весь экспериментальный сейсмологический и электромагнитный «наземный» материал и данные наблюдений со спутников о внутреннем строении Земли, который в обозримом будущем существенным образом пополнен быть не может. Сейчас, как и почти полвека назад, в 1961 г.: «В настоящее время состояние науки в рассматриваемой области (в области физики Земли – А.В.) таково, что нет достаточного количества данных, позволяющих выработать вполне обоснованную теорию развития Земли» [Магницкий, 1961, с. 33]. Подтверждением этому может служить, по сути, стереотипное переиздание книги В.А. Магницкого [2006]. И вполне закономерно, что последние книги о физике Земли опирались на материал, новизна которого определялась не *физическими*, а *геодинамическими* данными. Действительно: принципом геоизостазии [Тяпкин, 1998], представлениями об океанизации морского дна [Орленок, 2000], гелигеодинамикой [Леви и др., 2002, 2003], взаимодействием всех геосфер Земли [Хаин, Короновский, 2007], физической моделью глобальной эволюции Земли [Сорохтин, Ушаков. 2002], новой концепцией нелинейной геодинамики [Пущаровский, 2005]. Исключениями являются, пожалуй, монографии [Физика, 1989; Кузнецов, 2000, 2008] и [Бембель, Мегеря, Бембель, 2003], в которых разрабатываются в определенном смысле «взаимоисключающие» модели Земли. В первых трех - модель «горячей Земли», в третьей, наоборот, модель «ледяной» Земли.

Видимо, по этим причинам и под «велемием времени» предмет «Физика Земли» сначала, еще при жизни В.А. Магницкого, «трансформировался» в «Общую геофизику» [Магницкий, 1995], затем в «Основы экологической геофизики» [Трухин, Показеев, Куницын, Шрейдер, 2004] и, впоследствии, в «Общую и экологическую геофизику» [Трухин, Показеев, Куницын, 2005], изданную в серии МГУ «Классический университетский учебник». Возможно, от осуществленного ИФЗ РАН под редакцией А.О. Глико переиздания книги В.А. Магницкого [2006] в ближайшие годы можно будет ожидать на основании новых, полученных в течение последних сорока лет, данных переноса экологической направленности курса опять в сторону Физики.

В 70-х годах прошлого века изучение процессов, протекающих на Земле, фактически, стало происходить, в основном, «под флагом Геодинамики» [Артюшков, 1979; Николаевский, 1996; Теркот, Шуберт, 1985; Шейдеггер, 1987]. Появились новые обстоятельные фундаментальные работы и курсы [Гончаров и др., 2005; Короновский, 2006; Хаин, Ломизе, 1995, 2005]. Попытка совмещения Физики Земли с Геодинамикой была предпринята в учебном пособии [Викулин, 2004]. Такое «перераспределение весов», на взгляд автора, произошло, в том числе и под влиянием популярнейшей в последние десятилетия Новой глобальной тектоники [1974].

Другие обстоятельства, способствовавшие такому «перераспределению весов», были связаны с установлением блокового характера геологической [Пейве, 1961] и геофизической [Садовский, 2004] сред, построением моделей их движения [Лукьянов, 1999; Садовский, 2004; Садовский и др., 1987, 1991], включая волновые [Быков, 2000, 2005; Викулин, 2003; Курленя, Опарин, 2000; Маламуд, Николаевский, 1989; Николаевский, 1996, 2008; Опарин, Танайно, Юшкин, 2007; Шейман, Горбунова, 2008; Вуков, 2008], установлением вращательного движения блоков и плит земной коры и литосферы [Пейве, 1961; Ротационные, 2007], включая вихревые движения [Вихри, 2004; Ли Сы-гуан, 1958; Мелекесцев, 1979; Слензак, 1972]. Возможность и необходимость именно такого направления «совместного» развития «Физики Земли» и «Геодинамики» в дальнейшем демонстрируется материалом, представленным в последних монографиях, написанными выдающимися геологами современности [Короновский, 2006; Хаин, Короновский, 2007; Пушаровский, 2005]. Впрочем, именно такое, геодинамическое, направление развития Физики Земли уже просматривается в работе С.А. Ушакова [1974].

Более того. На всех разрезах глубоких и сверхглубоких скважин наблюдается, по крайней мере, для нижних горизонтов ($H \leq 4,5$ км), явное расхождение между результатами интерпретации геофизических работ и вскрытым геологическим разломом [Кольская, 1998, с. 217]. Эти данные позволяют предположить, что в дальнейшем успехи Физики Земли могут «прирастать» только Геодинамикой, во всяком случае, в обозримом будущем.

Все эти обстоятельства и определили направленность настоящей книги: физика Земли и геодинамика - как разделы наук о Земле, учитывающие как блоковое строение геологической и геофизической среды, так и специфику ее движения - ротационного и вихревого.

В первой части книги рассмотрены традиционные разделы физики Земли: «Материя. Движение», «Фигура Земли», «Физика землетрясений», «Строение и состояние Земли по данным сейсмологии», «Плотность, сила тяжести и давление внутри Земли», «Гравитационное поле Земли», «Геомагнитное поле», «Тепловое поле Земли», «Реология Земли, природа ее основных слоев и разделяющих их границ» (главы 1-9 соответственно), материал в которых, за исключением главы «Физика землетрясений», представляет, по сути, переработанную компиляцию данных, изложенных в цитированных выше классических работах с акцентом, где это оказалось возможным, в сторону вращательных и вихревых движений.

Во второй части книги рассмотрены ротационные и вихревые движения, показано, что такие движения являются основными во Вселенной (глава 10). Представлен обзор сеймотектонических моделей, поставлена и решена задача об упругом поле блоковой вращающейся среды, рассмотрены ее некоторые следствия (глава 11). Рассмотрены некоторые нетрадиционные геодинамические модели и намечены пути их разрешения в рамках механики (глава 12). Рассмотрена проблема № 1 (по А. Эйнштейну) в науках о Земле – проблема ее электромагнитного поля (глава 13). Проанализирована проблема концепции времени в геологии, выделены ее узловые, на взгляд автора, моменты, требующие своего решения в дальнейшем (глава 14). В последней, 15 главе приведена хроника развития естественнонаучных представлений о ротационных и вихревых движениях, об эфире, вакууме, торсионных полях, информации и сознании с древнейших времен до настоящего времени. В Заключение на основании 20 тыс. летней истории развития представлений о вихревых движениях сформулировано утверждение, согласно которому в рамках вихревой геодинамики самым естественным образом объединяются представления геологии с законами физики и с гипотезами зарождения и развития жизни и социума на планете.

Литература

- Артюшков Е.В.* Геодинамика. М.: Наука, 1979. 328 с.
- Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р.* Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2003. 344 с.
- Ботт М.* Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 376 с.
- Буллен К.Е.* Плотность Земли. М.: Мир, 1978. 442 с.
- Быков В.Г.* Нелинейные волновые процессы в геологических средах. Владивосток: Дальнаука, 2000. 190 с.
- Быков В.Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176-1190.
- Викулин А.В.* Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. 150 с.
- Викулин А.В.* Введение в физику Земли. Учебное пособие для геофизических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. 240 с.
- Витязев С.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. М.: Наука, 1990. 296 с.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин.* Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. 297 с.
- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С.* Введение в тектонофизику. М.: КДУ, 2005. 496 с.
- Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: ИЛ, 1963. 264 с.
- Джеффрис Г.* Земля, ее происхождение, история и развитие. М.: ИЛ, 1960. 485 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В.* Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. М.: Наука, 1971. 384 с.
- Кольская сверхглубокая.* Научные результаты и опыт исследования. М.: НФ «Технонефтегаз», 1998. 260 с.
- Короновский Н.В.* Общая геология. М.: КДУ, 2006. 528 с.
- Кузнецов В.В.* Физика горячей Земли. Новосибирск, 2000. 365 с.
- Кузнецов В.В.* Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 367 с.
- Курленя М.В., Опарин В.Н.* Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. 2000. № 4.
- Леви К.Г., Язев С.А., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Куснер Ю.С.* Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Учебное пособие. Иркутск: ИрГТУ, 2002. 182 с.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Язев С.А., Баасанджан Б., Нинжбадгар С., Балжинян Б., Буддо В.Ю.* Современная геодинамика гелиогеодинамика. 500-летняя хронология аномальных явлений в природе и социуме Сибири и Монголии. Учебное пособие. Книга II. Иркутск: ИрГТУ, 2003. 383 с.
- Ли Сы-гуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.: Госуд. научно-техн. Изд-во литературы по геологии и охране недр, 1958. 132 с.
- Лукиянов А.В.* Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Проблемы геодинамики литосферы. М.: Наука, 1999. С. 253-287.
- Магницкий В.А.* Основы физики Земли. М.: Гостехиздат, 1953. 290 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение Земли. М.: Изд-во Знание, 1961. 40 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.

- Магницкий В.А.* (ред.). Общая геофизика: Учебное пособие. М.: МГУ, 1995. 317 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли / Ред. А.О. Глико. М.: Наука, 2006. 390 с.
- Маламуд А.С., Николаевский В.Н.* Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: ИССиС, 1989. 144 с.
- Мелекесцев И.В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы эндогенного вулканизма. М.: Наука, 1979. С. 125-155.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
- Николаевский В.Н.* Упруго-вязкие модели тектонических и сейсмических волн в литосфере // Физика Земли. 2008. № 6. С. 92-96.
- Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. 472 с.
- Опарин В.Н., Танайно А.С., Юшкин В.Ф.* О дискретных свойствах объектов геосреды и их каноническом представлении // ФТПРПИ. 2007. № 3. С. 6-24.
- Орленок В.В.* Основы геофизики. Калининград: КалининГУ, 2000. 448 с.
- Пейве А.В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР, сер. геологическая. 1961. № 3. С. 36-54.
- Пуцаровский Ю.М.* Тектоника Земли. Этюды. Т. 1 «Тектоника и геодинамика. Т.2 «Тектоника океанов». М.: Наука, 2005.
- Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.
- Саваренский Е.Ф.* Сейсмические волны. М.: Недра, 1972. 296 с.
- Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П.* Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Изд-во Техничко-теоретической лит-ры, 1955. 544 с.
- Садовский М.А.* Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
- Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- Сафронов В.С., Витязев А.В.* Происхождение солнечной системы // Итоги науки и техники. Серия Астрономия. Т. 24. Астрофизика и космическая физика. М.: ВИНТИ, 1983. С. 5-93.
- Слензак О.И.* Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова Думка, 1972. 181 с.
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Развитие Земли. М.: Изд-во МГУ, 2002. 560 с.
- Стейси Ф.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. 344 с.
- Теркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. В 2-х частях. М.: Мир, 1985.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е., Шредер А.А.* Основы экологической геофизики. М.-СПб-Краснодар: Изд-во «Лань», 2004. 384 с.
- Тяпкин К.Ф.* Физика Земли. Киев: Вища школа, 1998. 312 с.
- Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы / В.В. Кузнецов, Н.П. Семаков, В.Н. Доровский, П.Е. Котляр. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с.
- Шейдеггер А.* Основы геодинамики. М.: Недра, 1987. 384 с.
- Шейман С.И., Горбунова Е.А.* Волновая природа активизации разломов Центральной Азии на базе сейсмического мониторинга // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 115-122.

- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: МГУ, 1995. 480 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
- Хаин В.Е., Короновский Н.В. Планета Земля от ядра до ионосферы. М.: КДУ, 2007. 244 с.
- Bykov V. Stic-slip and strain waves in the physics of earthquake rupture: experiments and models // Acta Geophysica. 2008. V. 56. N 2. P. 270-285.

ЧАСТЬ I

КЛАССИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ

1. МАТЕРИЯ. ДВИЖЕНИЕ

Единство Природы: структура материи и фундаментальные взаимодействия, пространство-время и торсионные поля. Вселенная, Галактика, Солнечная система, планеты. Модели происхождения солнечной системы. Предмет физики Земли.

Единство природы [Иванов, 1986]

Иерархия объектов в природе

Слово «иерархия» в применении к рассматриваемому случаю отображает лестницу объектов, качественно отличающихся или характеризующихся степенью сложности. В окружающем нас мире можно подметить (а это стало возможным в результате многовекового изучения природы человеком) следующую иерархию объектов: элементарные частицы – ядра – атомы – молекулы – макротела (кристаллы, жидкости, газы, плазма) – планеты – звезды – галактики – Вселенная.

Человек обычно имеет дело с макротелами, (приставка «макро» означает большой) и сам таковым является. Как исследователь, человек всегда, во все времена стремился познать природу в ее двух крайних проявлениях (подробнее см. главу 15): в очень малом (микромир) и в очень большом (мегамир). Каждое звено цепи «макротела – молекулы – атомы – ядра – элементарные частицы» отражает исторические вехи в исследованиях, этапы познания. Заметим, что если попытаться проследить за этой цепочкой в обратном направлении от частиц к макротелам (считая свойства частиц известными, и определять по ним свойства совокупностей частиц, т. е. самих макротел), то задача окажется не из легких. Так, например, в физике до сих пор отсутствует последовательная макроскопическая теория жидкого состояния вещества. В геофизике – только-только начинается осмысление блокового строения среды и ее волнового движения (введение в теорию таких представлений приведено в главе 11). И в астрофизике – теория образования и жизни планет, звездных систем (галактик) и Вселенной в целом.

Итак, рассмотрим всю иерархию основных объектов природы и дадим краткую характеристику.

1. Элементарные частицы. На сегодня эти образования являются исходными, простейшими в смысле структуры. Однако это не означает, что их свойства просты. Для описания поведения элементарных частиц используются наиболее глубокие физические теории, представляющие собой синтез теории относительности и квантовой теории.

В настоящее время все взаимодействия элементарных частиц представляются как своеобразная «игра в мячики».

Мир короткоживущих элементарных частиц может быть искусственно создан человеком в экспериментах на ускорителях – приборах, представляющих собой грандиозные инженерно-физические сооружения.

В самой природе короткоживущие элементарные образования могут играть роль при самых экстремальных условиях существования вещества и поля, например: в «начальных» стадиях эволюции Вселенной, при образовании таких астрофизических объектов, как «черные дыры», в формировании сердцевин нейтронных звезд.

Объединение релятивистских и квантовых представлений, осуществленное в значительной степени еще в 30-е годы прошлого столетия, привело к одному из наиболее выдающихся предсказаний в физике – открытию мира *античастиц*. Частица и соответствующая античастица имеют одинаковые времена жизни, одинаковые массы, их электрические заряды равны, но противоположны по знаку. Самым характерным свойством пары частица – античастица является способность *аннигилировать* (самоуничтожаться) при встрече с превращением в частицы другого рода.

Несмотря на микроскопическую симметрию между частицами и античастицами, во Вселенной до сих пор не обнаружены области со сколько-нибудь заметным содержанием антивещества.

Заметим, что частицы и соответствующие им античастицы одинаково взаимодействуют с полем тяготения; это указывает на отсутствие «антигравитации».

Описанный выше мир элементарных частиц, в основном, опирается на представления о таких частицах, как электрон, протон, нейтрон и др. Согласно современным представлениям вещество состоит из кварков и лептонов, описываемых фермионными квантовыми полями. Этим вопросам посвящено большое количество литературы (см., например [Тарасов, 2005]). Впрочем, в настоящее время ученые не уверены в том, что кварки и лептоны действительно являются и мельчайшими и элементарными. Кандидатами на более «элементарные» являются неуловимые пока частицы Хиггса (которые, как полагают, являются ответственными за существование массы у всех частиц) и частицы, которые образуют «темную» материю, составляющую большую часть вещества во Вселенной [Вибе, 2006]. С целью проверки существования таких частиц в настоящее время международным коллективом ученых завершается подготовка к началу самого грандиозного в истории эксперимента по физике элементарных частиц – создание в районе Женевы Большого адронного коллайдера (ускорителя), который позволит исследовать терадиапазон энергий (до $1 \text{ Тэв} = 10^{12} \text{ эв}$) и, как следствие, исследовать свойства пространства вплоть до нанонанометра ($= 10^{-18} \text{ м}$) [Квиг, 2008; Коллинз, 2008].

2. Ядра. Атомные ядра представляют собой связанные системы протонов и нейтронов. Плотность числа частиц в многонуклонных ядрах порядка $10^{44} \text{ нуклонов/м}^3$, а плотность массы 10^{17} кг/м^3 . «Радиусы ядер» изменяются от $2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ (ядро гелия) до $7 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ (ядро урана). Ядро имеет «форму» вытянутого или сплюснутого эллипсоида (или еще более сложную).

3. Атомы и молекулы. Ядра имеют положительный электрический заряд и окружены роем отрицательно заряженных электронов. Такое электрически нейтральное образование называют *атомом*. *Атом есть наименьшая структурная единица химических элементов*.

Не всякие атомы способны соединяться друг с другом. Связь возможна в том случае, если совместный «верхний этаж» целиком заполнен электронами. Такое образование называют *молекулой*. *Молекула есть наименьшая структурная единица сложного химического соединения*. Число возможных комбинаций атомов, определяющих число химических соединений, составляет около 10^6 .

Некоторые атомы (например, углерода и водорода) способны образовывать сложные молекулярные цепи, являющиеся основой для образования еще более сложных структур (макромолекул), которые проявляют уже биологические свойства.

4. Макротела. При определенных условиях однотипные атомы или молекулы могут собираться в огромные совокупности – *макроскопические тела (вещество)*. Простое вещество является атомарным, сложное – молекулярным.

При достаточно низких температурах все тела являются *кристаллическими*. В кристаллах взаимное расположение атомов тела является правильным.

Тела могут сильно отличаться в отношении механических, тепловых, электрических, магнитных и оптических свойств. Зная атомную природу тел и зависимость указанных свойств от нее, можно целенаправленно создавать новые материалы.

Перейдем от кристаллического состояния вещества к *жидкому*. При значительном повышении температуры происходит *фазовый переход* кристалл – жидкость (*плавление*). В жидком состоянии атомы уже не являются строго локализованными, т. е. связанными с какими-то определенными положениями в теле. Тепловое движение в жидкости носит довольно сложный характер.

При переходе жидкости в пар (при атмосферном давлении) вещество практически полностью теряет свою индивидуальность. Это связано с малой плотностью газообразного вещества.

Дальнейшее весьма значительное повышение температуры (до $10^4 - 10^5$ K) среды ведет к *ионизации* атомов, т. е. распаду их на ионы и свободные электроны. Такое состояние вещества называют *плазменным*.

Поскольку ионы и электроны в отличие от атомов несут не скомпенсированные электрические заряды, их взаимное влияние становится существенным. Плазма в противовес газам может проявлять коллективные свойства, что сближает ее с *конденсированным состоянием*, т. е. с твердыми телами и жидкостями. В плазме легко возбуждается всякого рода упруго-электрические колебания.

Приведем в качестве справки значения плотностей макротел в обычных условиях: в твердых телах и жидкостях она имеет порядок $10^{28} - 10^{29}$ атомов/м³, в газах $\sim 10^{25}$ молекул/м³, в искусственно создаваемой плазме плотность частиц $\sim 10^{19}$ м⁻³.

5. Планеты. Следующей ступенью в иерархии объектов природы являются макротела астрономического масштаба – *планеты*. Изучение планет солнечной системы по существу только начинается. Что показали эти исследования? Во-первых, условия, в которых находится вещество планет, отличается от земных условий. Во-вторых, в составе вещества планет не обнаружено никаких новых химических элементов по сравнению с элементами на земле.

Внутреннее строение планет изучать особенно сложно. Даже о своем «собственном доме» – планете Земля – человек знает недостаточно. По оценкам, при среднем радиусе Земли $R_3 = 6374$ км, массе $M_3 = 5,977 \cdot 10^{27}$ г, средней плотности $\bar{\rho} = 5,517$ г/см³, внутреннее давление в центральных областях земного шара имеет порядок 10^7 атм (10^{12} Па). Какие изменения испытывает вещество при таких давлениях?

Если при невысоких давлениях вещество отличается крайним разнообразием своих свойств и обнаруживает чрезвычайно резкую и немонотонную зависимость от химического состава, то при сжатии вещества проявляется ярко выраженная тенденция «сглаживания» его свойств. Это последнее обстоятельство легко понять. В самом деле, наружные электронные оболочки вещества, ответственные за отмеченную не монотонность, при давлениях порядка $10^7 - 10^8$ атм перестают существовать, ибо входящие в их состав электроны отрываются от атомов и становятся коллективными. Внутренние же электронные оболочки уплотняются, и распределение плотности электронов меняется сравнительно медленно при переходе от одного вещества к другому.

Давления порядка 10^7 атм физики научились создавать в экспериментах по ударному сжатию тел. Исследования по физике высоких давлений привели к созданию целой группы новых материалов, среди них искусственные алмазы. Есть надежда на получение при давлениях порядка 10^7 атм металлического водорода. Его свойства должны резко отличаться от обычных диэлектрических кристаллов молекулярного водорода, существующих при низких температурах и нормальном давлении. По оценкам физиков-теоретиков, кристаллы металлического водорода должны быть сверхпроводниками при комнатной температуре. Если это так, то мы станем свидетелями новой революции в электротехнике.

Одной из планет-гигантов солнечной системы является Юпитер, масса которого составляет $M_{Ю} = 318 \cdot M_3$. Он почти в 10 раз превосходит Землю по размерам и находится, по-видимому, в жидком состоянии. Его вещество богато водородом, и наверняка центральные области планеты состоят из металлического водорода.

6. Экзопланеты. Первое достоверное сообщение о наблюдении планеты, расположенной вблизи другой звезды - экзопланеты, прозвучало в конце 1995 г. Астрономы Мишель Майор и Дидье Квелоз из Женевского университета впервые достоверно зафиксировали экзопланету [Бурба, 2006]. С помощью сверхточного спектрометра они обнаружили, что звезда 51 в созвездии Пегаса «покачивается» с

периодом чуть более четырех земных суток. Всего через десять лет за это достижение была вручена «Нобелевская премия Востока» - награда сэра Рун Рун Шоу (Run Run Shaw). Гонконгский медиамагнат уже третий раз дарит по одному миллиону долларов ученым, достигшим особых успехов в астрономии, математике и науках о жизни, включая медицину.

За последние десятилетие обследовали около 3000 звезд и возле 155 из них нашли планеты. Всего сейчас известно более 200 экзопланет. Близ некоторых звезд найдено по две, три и даже четыре планеты. Каждый год астрономы открывают около 20 экзопланет. Среди них выявляются все новые и новые разновидности. Большинство (около 90%) обнаруженных экзопланет являются гигантскими газовыми шарами, подобными Юпитеру, с типичной массой около 100 масс Земли. Среди них различают пять разновидностей. Наиболее распространенными являются 54 «водных гиганта», названных так из-за того, что, судя по расстоянию от звезды, их температура должна быть такой же, как на Земле. Поэтому естественно ожидать, что они окутаны облаками водяного пара или ледяных кристаллов. Следующими по распространенности идут 42 «горячих Юпитера». Они находятся совсем близко от своих звезд (в 10 раз ближе, чем Земля от Солнца), и поэтому их температура – от + 700 до + 1200⁰С. Немного прохладнее на 37 экзопланетах, названных «теплыми Юпитерами», температура которых от + 200 до + 600⁰С. В еще более прохладных областях планетных систем расположены 19 «сернистых гигантов». Предполагается, что они окутаны облачным покрывалом из капелек серной кислоты – такими, как на Венере. Еще дальше от соответствующих звезд расположены уже упомянутые «водные гиганты», а в самых холодных областях находятся 13 «двойников Юпитера», которые по температуре аналогичны настоящему Юпитеру (от – 100 до – 200⁰С на внешней поверхности облачного слоя) и, наверное, выглядят примерно так же – с голубовато-белыми и бежевыми полосами облачности, в которые вкраплены белые и оранжевые пятна крупных вихрей.

Кроме гигантских газовых планет в последние годы найдено полтора десятка экзопланет поменьше, по массе сравнимых с «малыми гигантами» Солнечной системы – Ураном и Нептуном: от 6 до 20 масс Земли. Кроме того, к этому же типу отнесены и две «суперземли» - массивные планеты земного типа, не имеющие столь плотной и толстой атмосферы, как у планет-гигантов.

Самая «тяжелая» из экзопланет в 11 раз массивнее Юпитера, а наибольшая по размеру имеет диаметр в 1,3 раза больше, чем у Юпитера. Над некоторыми из экзопланет сияют сразу два и даже три «солнца» - эти планеты вращаются вокруг звезд, входящих в систему из двух или трех светил, расположенных близко друг к другу. «Холодная суперземля» - пока наименьшая из экзопланет. Ее открыли в 2005 году в результате совместных исследований 73 астрономов из 12 стран [Бурба, 2006].

Будущие поиски планет земного типа возле других звезд будут нацелены на благоприятные для жизни области. Список из 5000 наиболее перспективных звезд уже составлен. В апреле 2007 г. астрономы Женевской обсерватории сообщили об открытии самой похожей на Землю экзопланеты среди уже обнаруженных вне Солнечной системы. Планета обращается вокруг красного карлика Глизе 581, она в 1,5 раза больше Земли по размеру и примерно в пять раз по массе. Большие успехи на изучение экзопланет ученые возлагают на космическую обсерваторию *COROT* - Convection Rotation and planetary Transist – конвекция, вращение и прохождения планет [Хеллеманс, 2008].

Столь разнообразные свойства экзопланет на первых порах просто ошеломили астрономов. Пришлось пересмотреть многие устоявшиеся теоретические модели образования планетных систем, ведь современные представления о формировании планет из протопланетного облака вещества основаны на особенностях строения Солнечной системы [Бурба, 2006].

7. Звезды. Галактики. Вселенная. Как ни странно, но физики гораздо лучше представляют себе состояние вещества внутренних областей звезд, чем планет.

Центральные области Солнца, при его радиусе $R_C = 7 \cdot 10^8$ м, массе около $M_C \approx 3 \cdot 10^{33}$ г, характеризуются температурой порядка 10^7 К и давлением около 10^{11} атм. В этих условиях вещество является полностью ионизованной плазмой: голые ядра и свободные электроны. При этом становятся возможными термоядерные реакции, окончательным итогом которых является слияние ядер водорода и превращение их в ядра гелия. Эта ядерная реакция служит источником энергии звезд. Следует отметить, что существует и другая точка зрения [Потапов, Фоминский, Потапов, 2000], отличная от общепринятой.

По мере потери энергии звезды уплотняются. Свободные электроны начинают, как бы вдавливаясь в ядра. Происходит захват электронов протонами с превращением последних в нейтроны, при этом одновременно испускается нейтрино. В результате такой реакции уменьшается заряд ядра (при неизменной его массе), что, вообще говоря, приводит к уменьшению энергии связи ядра. В конце концов, ядра, содержащие слишком много нейтронов, станут неустойчивыми и распадутся. Вещество звезды будет представлять собой сверхплотный нейтронный газ.

Нейтронные звезды имеют массу, сравнимую с массой Солнца, а размеры - в 10^5 раз меньше. Плотность нейтронной звезды сравнима с плотностью ядерного вещества, т. е. 10^{17} кг/м³. Масса 1 см³ вещества такой звезды составляет сотни миллионов тонн!

Галактики – это звездные системы. Число звезд в них порядка $10^9 - 10^{12}$. Если масса звезды порядка 10^{30} кг (как у нашего Солнца), то масса Галактики порядка 10^{41} кг.

Известная нам часть *Вселенной* содержит таких галактик порядка 10^{11} . Общее число протонов и нейтронов в известной нам части Вселенной порядка 10^{80} .

Астрономические данные показывают, что галактики во Вселенной стремительно «разбегаются» друг от друга. Расширение Вселенной позволяет предположить, что когда-то в прошлом она занимала весьма малый объем. Это, в свою очередь, означает, что «дозвездное вещество» было сверхплотным и чрезвычайно горячим (температура порядка 10^{13} К). При таких температурах вещество может состоять в основном из излучения – фотонов и нейтрино.

Общепринятая «горячая» модель Вселенной приводит к целому ряду следствий, которые могут быть проверены наблюдениями. Обнаружение так называемых *реликтовых фотонов*, являющихся остатками «дозвездного» состояния вещества, является неплохим доказательством справедливости наших представлений о самых ранних стадиях развития мира.

С последними достижениями в деле изучения звезд, галактик и Вселенной можно ознакомиться в большом количестве великолепных обзоров (см., например [Атвуд, Майкельсон, Ритц, 2008; Фридман, 2005] и др.).

Четыре вида фундаментальных взаимодействий

1. Связанные системы объектов. Взаимодействия. Как мы убедились выше, в природе существуют качественно различные системы объектов. Так, ядра есть связанные системы протонов и нейтронов; атомы – связанные ядра и электроны; макротела – совокупность атомов или молекул; солнечная система – «связка» планет и массивной звезды и т. д.

Наличие связанных систем объектов говорит о том, что должно существовать нечто такое, что скрепляет части системы в целое. Чтобы «разрушить» систему частично или полностью, нужно затратить энергию. Взаимное влияние частей системы характеризуется *энергией взаимодействия*, или просто *взаимодействием*.

В настоящее время принято считать, что любые взаимодействия каких угодно объектов могут быть сведены к ограниченному классу основных фундаментальных взаимодействий: сильному, электромагнитному, слабому и гравитационному.

2. Гравитационные взаимодействия (тяготение). Притяжение тел к земле, существование солнечной системы, звездных систем (галактик) обусловлено действием *сил тяготения* или, иначе, гравитационными взаимодействиями.

3. Электромагнитные взаимодействия. Ими обусловлены связи в атомах, молекулах и обычных макротелах.

4. Сильные (ядерные) взаимодействия. Наличие в ядрах одинаковых заряженных протонов и нейтральных частиц говорит о том, что должны существовать взаимодействия, которые гораздо интенсивнее электромагнитных, ибо иначе ядро не могло бы образоваться. Эти взаимодействия, их называют сильными, проявляются лишь в пределах ядра.

5. Слабые взаимодействия. Под влиянием «внутренних причин», нестабильные свободные частицы за те или иные характерные времена превращаются в другие частицы (распадаются). Существуют медленные распады с характерным временем $10^{-10} - 10^{-6}$ с; они происходят за счет так называемого *слабого взаимодействия*.

6. Сравнительная оценка интенсивностей всех видов взаимодействий. Если рассматривать только элементарные частицы, то интенсивность различных взаимодействий по отношению к сильным распределяется следующим образом: сильное ~ 1 ; электромагнитное $\sim 10^{-3}$; слабое $\sim 10^{-14}$; гравитационное $\sim 10^{-40}$.

В вопросах строения и развития мира, как целого, роль гравитации становится определяющей. Исследование же конкретных астрофизических объектов (звезд, пульсаров, квазаров и др.) невозможно без привлечения всех фундаментальных взаимодействий.

7. Поля и вещество. Вся совокупность элементарных частиц с их взаимодействиями проявляет себя макроскопически в форме вещества и поля.

Поле в отличие от вещества обладает особыми свойствами. Физическая реальность электромагнитного поля видна хотя бы из того, что существуют радиоволны. Они имеют конечную скорость распространения; так, при локации Луны с помощью радиоволн время запаздывания радиозха составило около 2,5 с.

Источником электромагнитного поля являются движущиеся заряженные частицы. Взаимодействие зарядов происходит по схеме: частица – поле – частица. Поле является переносчиком взаимодействия. В некоторых условиях поле может «оторваться» от своих источников и свободно распространяться в пространстве. Такое поле носит волновой характер.

8. О создании единой теории [Тарасов, 2005]. Одной из основных целей современной теоретической физики является единое описание окружающего нас мира. Например, специальная теория относительности объединила электричество и магнетизм в единую электромагнитную силу. Квантовая теория показала, что электромагнитное и слабое взаимодействия могут быть объединены в электрослабое. Так что есть все основания полагать, что все фундаментальные взаимодействия в конечном итоге объединятся. Если мы начнем сравнивать сильное и электрослабое взаимодействия, то нам придется уходить в области все больших энергий, пока они не сравняются по силе и не сольются в одно в районе энергий 10^{16} Гэв. Гравитация же «присоединится» к ним согласно Стандартной модели (общепринятой основе физики элементарных частиц) при энергиях порядка 10^{19} Гэв. К сожалению, такие энергии сталкивающихся на ускорителях частиц не только не доступны в настоящее время, но и вряд ли будут доступны в обозримом будущем. Однако теоретические исследования по поиску единой теории всех фундаментальных взаимодействий идут полным ходом. И создание такой единой теории «запланировано» на XXI век.

Объединение двух фундаментальных теорий современной физики – квантовой теории и общей теории относительности – в рамках единого теоретического подхода до недавнего времени было одной из важнейших проблем. Примечательно, что эти две теории, взятые вместе, воплощают почти всю сумму человеческих знаний о наиболее

фундаментальных взаимодействиях в природе. Поразительный успех этих двух теорий состоит в том, что вместе они могут объяснить поведение материи практически в любых условиях – от внутриядерной до космической области. Большой загадкой, однако, была несовместимость этих двух теорий. И было непонятно, почему природа на своем самом глубоком и фундаментальном уровне должна требовать двух наборов постулатов и двух наборов физических законов? В идеале хотелось иметь Единую теорию поля, объединяющую эти две фундаментальные теории. Однако попытки их соединения постоянно разбивались из-за появления бесконечностей (расходимостей) или нарушения некоторых важнейших физических принципов. Объединить две эти теории удалось лишь в рамках теории струн и суперструн, в которой «точечная» элементарная частица заменяется струной. В этом случае все наблюдаемые частицы являются просто колебаниями этих самых струн.

Пространство и время

1. Пространственная и временная шкалы в природе. Явления и процессы, происходящие с взаимодействующими объектами, протекают в пространстве и во времени. Пространство и время являются той своеобразной «ареной», на которой разыгрываются события. Если событие характеризовать местоположением и моментом времени, то существование пространственно-временных связей накладывает определенные ограничения на возможный ход событий.

Рассмотренной выше иерархии объектов и взаимодействий могут быть сопоставлены пространственные и временные характеристики. Так, верхняя грань для пространственной области, в которой действуют сильные и слабые взаимодействия, имеет размер порядка 10^{-15} м; радиус действия электромагнитных и гравитационных взаимодействий неограничен, в связи с чем, становится ясным, почему эти последние взаимодействия могут проявлять себя макроскопически.

Между взаимодействиями имеются существенные различия во временных характеристиках. Процессы, которые происходят под влиянием сильных взаимодействий, характеризуются временами порядка 10^{-23} с. Для процессов, связанных с электромагнитным взаимодействием частиц, характерны времена порядка 10^{-15} с. Наконец, для процессов, ход которых регулируют слабые взаимодействия, характерны времена $\geq 10^{-8}$ с.

Связанные системы протонов и нейтронов (ядра) характеризуются пространственной областью порядка 10^{-15} м. Для электронов в атоме характерна пространственная область движения с размерами порядка 10^{-10} м.

Еще раз приведем сравнительные данные о пространственно-временной шкале астрофизических объектов. Средний радиус Земли равен $6,4 \cdot 10^6$ м, время ее существования $4,6 \cdot 10^9$ лет. У Солнца радиус $7 \cdot 10^8$ м, его возраст $(5-10) \cdot 10^9$ лет. Для галактик характерны размеры $\sim 10^{21}$ м, возраст вещества звезд составляет $(5-10) \cdot 10^9$ лет. Что касается известной (видимой) части Вселенной, то ее радиус составляет 13,7 млрд световых лет или $\sim 10^{26}$ м, а возраст $\sim 10^{10}$ лет $\approx 10^{17}$ с.

2. Однородность пространства и времени. Пространство и время обладают определенными свойствами, что, несомненно, влияет на ход физических явлений. Важнейшим из этих свойств является так называемая *однородность*. *Однородность пространства* означает, что любая его точка физически равноценна, т. е. *перенос любого объекта в пространстве никак не влияет на процессы, происходящие с этим объектом*. Так, мы совершенно уверены, что свойства атомов у нас на Земле, в условиях Луны и на Солнце одни и те же.

Однородность времени нужно понимать как физическую неразличимость всех моментов времени для свободных объектов. Другими словами, *если объекты не взаимодействуют с окружением, то для них любой момент времени может быть*

принят за начальный. Мы считаем, что изученные сегодня закономерности в поведении атомов были теми же самыми и многие миллионы лет тому назад.

Приведем еще ряд иллюстраций. Один и тот же физический эксперимент, поставленный в Москве и Нью-Йорке, дает одинаковые результаты – это есть ни что иное, как отражение эквивалентности различных точек пространства в условиях Земли. В свое время Архимед открыл законы плавания тел; в настоящее время каждый из нас может их легко воспроизвести, создав соответствующие условия наблюдения, т. е. все моменты времени в рассмотренной ситуации физически равнозначны.

Если бы кажущиеся столь очевидными свойства однородности пространства и времени отсутствовали, то было бы почти бессмысленно заниматься наукой. В самом деле, представьте себе, к чему бы вело отсутствие однородности пространства: законы физики в Москве были бы одни, в Туле – другие, в Воронеже – третьи. Отсутствие однородности времени вело бы к тому, что люди не могли бы прогрессировать в познании. Открытый вчера закон плавания тел – сегодня был бы уже несправедлив, и нужно было бы вновь вести исследование; завтра он, в свою очередь, будет снова несправедлив.

3. Свободные тела и движение по инерции. Наше пространство является «плоским» в том смысле, что оно удовлетворяет всем аксиомам геометрии Эвклида; это является экспериментальным фактом. Как будут вести себя свободные тела в таком пространстве?

Прежде всего, *под свободным телом мы будем понимать тело, настолько удаленное от всех окружающих тел, что можно пренебречь его взаимодействием с ними.* Для такого свободного тела вследствие однородности пространства любые его местоположения никак не будут влиять на его состояние. Телу «безразлично», в какой точке пространства находится, ибо «внешние условия» не меняются. Если учесть еще и однородность времени, т. е. физическую эквивалентность всех моментов времени для свободного тела, то мы придем к любопытному обстоятельству: тело будет *двигаться*, т. е. *последовательно менять свои местоположения с течением времени.* Причем вследствие однородности пространства и времени движение будет *равномерным*, т. е. *за равные промежутки времени тело должно проходить равные расстояния*, оно будет к тому же и *прямолинейным*, ибо пространство «плоское». Такое движение свободных тел называют *движением по инерции.*

Следует иметь в виду, что свойства пространства-времени в масштабах всей Вселенной или вблизи тел огромных астрономических масс отклоняются от свойств обычной геометрии Эвклида; здесь пространство обладает своеобразной «кривизной». Движение по инерции в таком пространстве уже не прямолинейно и неравномерно.

Движение тел по инерции есть проявление своеобразной симметрии пространства и времени, их однородности.

4. Инерциальные системы отсчета. Принцип относительности. Для количественного изучения движения любых объектов необходимо иметь *систему отсчета.* Под системой отсчета разумеют систему координат и *часы*, связанные с телом отсчета.

В качестве системы координат мы будем обычно пользоваться *прямоугольной декартовой системой.* Говоря же о часах, мы имеем в виду не только изобретенный человеком механизм, но и любой периодический процесс, который осуществляется в природе. Так, в роли часов могут выступить: вращение Земли вокруг собственной оси, движение Земли по околосолнечной орбите, периодическое движение атомных электронов (атомные часы) и т. д.

Если связывать систему координат и часы с произвольно движущимся телом, то относительно такой системы отсчета, изучаемые физические явления даже в простейших случаях могут выглядеть весьма сложно. Особенная простота при количественном

описании явлений выступает, если в качестве тела отсчета брать свободно движущиеся тела. Такие системы отсчета называют *инерциальными*.

В инерциальных системах отсчета всякие свободно движущиеся объекты движутся равномерно и прямолинейно. Инерциальных систем отсчета можно выбрать сколько угодно, и все они будут относительно друг друга двигаться по инерции.

Нет критерия, благодаря которому мы могли бы предпочесть одну инерциальную систему отсчета другой, также инерциальной. Все инерциальные системы отсчета являются физически эквивалентными, и опыт это подтверждает.

Какое бы физическое явление ни рассматривалось, с точки зрения любых инерциальных систем отсчета оно выглядит совершенно одинаковым. Это означает, что *математическая формулировка законов природы должна быть таковой, чтобы она не менялась при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой*. Это положение в физике именуют **принципом относительности**.

Из-за существования принципа относительности физические законы обладают особым совершенством, связанным с их симметрией по отношению к выбору инерциальных систем отсчета. Требования указанной симметрии играют немаловажную эвристическую роль при поисках количественных соотношений, описывающих явления в новой области исследований.

Торсионные поля

1. От И. Ньютона до А. Эйнштейна. Описанные выше свойства пространства, времени и материи основаны на представлениях физики, которая, как известно, выделилась из естествознания (натуральной философии) в самостоятельную науку в XVII в. основополагающими работами Г. Галилея и И. Ньютона. До начала XX в. физика опиралась на сформулированные И. Ньютоном представления об абсолютном и однородном пространстве и времени, которые существуют независимо друг от друга. В рамках построенной А. Эйнштейном теории относительности пространство и время оказались взаимосвязанными, кривизна (неоднородность) пространства-времени определяется количеством сосредоточенной в нем массы. В соответствии с такими физическими представлениями анализ многочисленных геологических временных шкал, которые, как известно, являются неоднородными (подробнее см. главы 11 и 14), показывает: Земля в течение всей своей более чем 4 млрд. летней геологической жизни в своем движении вокруг центра Галактики вместе со всей Солнечной системой неоднократно должна была проходить вблизи сильных гравитационных полей.

2. Теория эфира - вакуума. Есть все основания полагать, что идеи эфира были широко распространены достаточно давно, они присутствуют во всех мировых религиях [Ацюковский, 2003, с. 46-48], формирование основ которых происходило с течением нескольких тысячелетий до н.э. [Элиаде, 2001, 2002; Крывелев, 1988]. В философию и естествознание концепция эфира была введена в VI в. до н.э. Анаксимандром в виде первоначала – «апейрона» - единой вечной неопределенной материи, порождающей бесконечное многообразие сущего. Анализ всего многообразия данных показывает (см. главу 15), что концепция эфира сопровождает развитие естествознания от древнейших времен до настоящего времени [Ацюковский, 2003, с. 71-73]. Разработанные различными авторами картины мира и многочисленные физические теории правильно предполагали существование в природе мировой среды – эфира, являющегося основой строения вещества и носителем энергии физических полей и взаимодействий. Имеются прямые экспериментальные доказательства, свидетельствующие о наличии в околоземном пространстве «эфирного ветра» и об его газоподобной структуре.

Близким эфиру в современной физике является понятие физического вакуума, экспериментальным подтверждением существования которого является эффект Х. Казимира (1909 - 2000), который является результатом действия ненаблюдаемого поля в

состоянии физического вакуума и проявляется как притяжение двух незаряженных близкорасположенных пластинок [Павленко, 2005, с. 816-817]. Теория физического вакуума в значительной степени изменяет наши представления о мире [Физический, 1983, с. 61; Шипов, 2002].

Согласно теории А. Эйнштейна физический вакуум – это пустое (без материи) пространство-время, обладающее упругими свойствами. Это свойство проявляется тогда, когда в пустое пространство помещается некая масса. Вакуумные уравнения А. Эйнштейна являются чисто геометрическими и не содержат никаких физических констант. Вакуум же П. Дирака, основателя квантовой электродинамики, представляет собой некоторое латентное (скрытое) состояние электронов и позитронов. В среднем вакуум не имеет ни массы, ни заряда, ни каких-либо других физических характеристик. Однако в малых пространственных областях вакуума значения физических характеристик могут стать отличными от нуля – вакуум флуктуирует. Образно говоря, вакуум П. Дирака в малых пространственно-временных областях похож на «кипящий бульон», состоящий из элементарных частиц. Поэтому в квантовой теории возникло представление о физическом вакууме как о тоже упругой «квантовой жидкости», находящейся в вечном движении.

Для физиков важным оказался вопрос, как объединить уравнения, которые описывают вакуум Эйнштейна и вакуум Дирака с тем, чтобы иметь более правильное представление о нем. В этом вопросе мнения физиков в конце 20-х – начале 30-х гг. XX в. – в период окончательного становления квантовой механики, резко разделились [Шипов, 2002, с. 22-24], и, тем самым, определили начало глубокого кризиса в физике, который продолжается до настоящего времени.

3. Поля кручения. При описании свойств физического вакуума главная трудность состоит в том, чтобы найти новый физический принцип весьма общего характера, который бы отражал суть настоящего момента развития физической теории и который бы позволил описать вакуум Эйнштейна и вакуум Дирака в рамках единых представлений. Такой принцип – всеобщий принцип инерции – был найден Г.И. Шиповым [Шипов, 2002], которым было показано, что «именно кручение пространства порождает поля инерции и спинные свойства материи» [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993, с. 72-75]. В рамках вакуумного подхода, опирающегося на принцип инерции, была построена новая геодинамика и физика Земли [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993]. В результате оказалось, что «характерные движения в полях инерции приводят к различным типам вихревых и винтовых структур» [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993, с. 3-4].

Данные, полученные в последние десятилетия, убедительно показывают, что выделяемые по материалам геологических, геофизических, вулканических и геодинамических полевых и инструментальных наблюдений вихревые структуры являются достаточно характерными для поверхности Земли образованиями [Вихри, 2004; Ротационные, 2007]. Это позволяет предположить, что источником таких вихревых движений, повсеместно в течение всех геологических эпох на поверхности Земли в геодинамических и геофизических полях, являются именно макромасштабные поля кручения. Таким образом, второй причиной, которая может течение времени сделать неравномерным, являются сильные (интенсивные) поля кручения.

Как видим, геологические и геофизические данные, охватывающие гигантский интервал времени по продолжительности равный одной трети – половине всей жизни Вселенной, могут оказаться полезными и даже решающими при разрешении кризиса в физике и выборе возможных путей выхода из него.

Вселенная, Галактика, Солнечная система, планеты. Основные гипотезы происхождения и эволюции

Чтобы надлежащим образом осветить происхождение Земли, рассмотрим место, которое занимает Земля в истории Вселенной. Среднее расстояние Земли от Солнца равно $149,6 \cdot 10^6 \text{ км} = 1 \text{ а.е.}$ (астрономическая единица), а средняя скорость ее движения по орбите - $29,8 \text{ км/с}$.

Солнце с его планетной системой находится во внешней части Галактики – дискообразного скопления звезд и межзвездных пыли и газа, видимых нами как Млечный путь. Солнце удалено от центра Галактики на 27 тыс. световых лет ($1 \text{ световой год} = 10^{13} \text{ км}$) и вращается вокруг него со скоростью $230 - 250 \text{ км/с}$. Полный оборот – $1 \text{ галактический год}$, продолжается около 220 млн лет (рис. 1.1). Наша Галактика образует только малую часть Вселенной. Существует множество других галактик, которые, как показывают наблюдения, удалены от нас на расстояния до 13,7 млрд световых лет – размер видимой части Вселенной или Метагалактики. Дошедший до нас свет от самых удаленных галактик начал свой путь раньше, чем начала образовываться солнечная система!

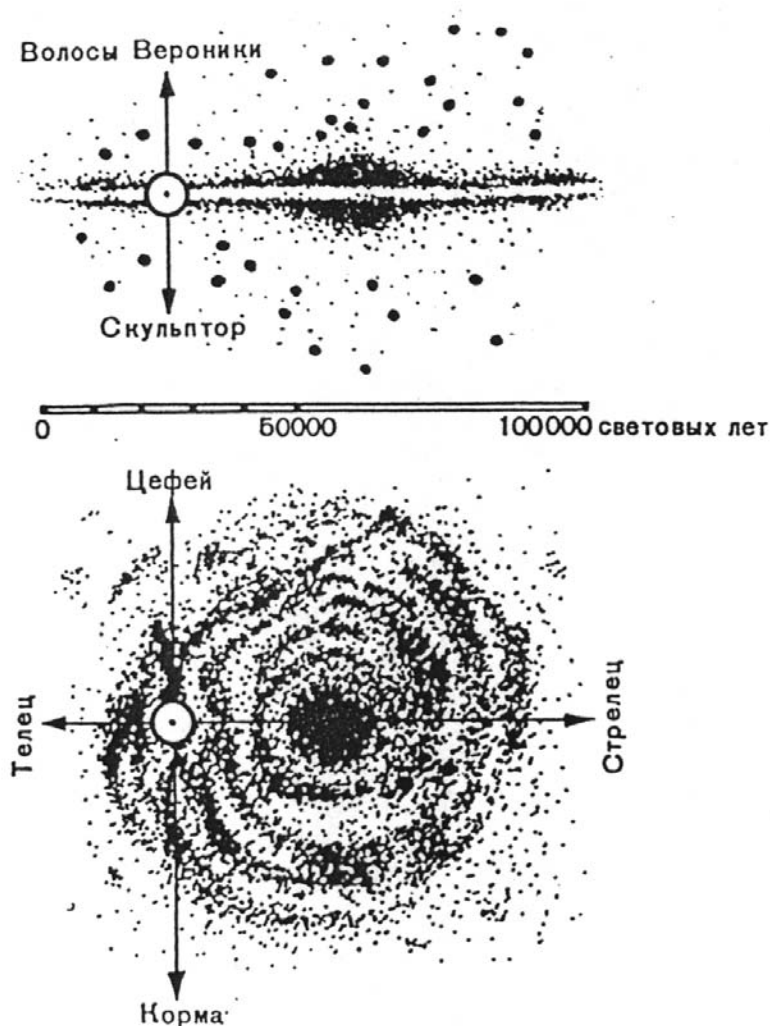


Рис. 1.1 Положение Солнца (кружок с точкой) в нашей Галактике. Видно, что Солнце расположено на окраине Галактики. Мелкие точки – звезды, крупные – звездные скопления.

Линии в спектрах далеких галактик смещены к красному концу спектра. Это явление интерпретируется как доплеровское смещение, возникшее при движении источника света от наблюдателя со скоростью, пропорциональной расстоянию. Отсюда возникла гипотеза о расширении Вселенной. Экстраполяция во времени назад позволяет установить, что расширение Вселенной началось около *15 млрд лет* назад (согласно одной из гипотез, в ней могут сменяться циклы расширения и сжатия). Дальнейшим подтверждением гипотезы происшедшего около *15 млрд лет* назад «большого взрыва» является открытие радиоастрономов, обнаруживших микроволновое «реликтовое» радиоизлучение – «потомка» того излучения, которое возникло сразу после «большого взрыва».

Распространенность изотопов урана, тория и продуктов их распада в космосе, установленная по результатам химического анализа метеоритов, дает основание предполагать, что Галактика образовалась, по крайней мере, за *5 млрд лет* до формирования солнечной системы. Согласно одной из гипотез, Галактика образовалась в результате гравитационного коллапса турбулентного газового облака, возможно, вскоре после «большого взрыва».

Астрономы полагают, что звезды, подобные Солнцу, образуются в Галактике и в настоящее время. Они формируются из газопылевых межзвездных облаков, когда плотность последних становится достаточной для того, чтобы облака оказались гравитационно-неустойчивыми. Межзвездное вещество состоит, в основном, из водорода и частично из гелия, существующих со времени образования Галактики, и частично из гелия и более тяжелых элементов, синтезированных в ходе ядерных процессов внутри звезд или же при более интенсивных процессах типа взрывов сверхновых. Сжатие под действием сил взаимного притяжения сначала создает скопление протозвезд, которые позднее сами уплотняются и становятся молодыми звездами. Освобождающаяся при этом гравитационная энергия нагревает звезду, и звезда начинает излучать и светиться. В конечном счете, внутренняя температура становится достаточно высокой для начала термоядерных реакций, звезда перестает сжиматься и занимает свое место на «главной последовательности». Солнце является довольно типичной звездой главной последовательности; она прошла стадию сжатия из межзвездного вещества около *5 млрд лет* назад.

Если приведенные выше представления справедливы, то планеты и их спутники должны были образоваться одновременно с Солнцем при конденсации газопылевого облака. По существу эта теория – модернизированный вариант взглядов Р. Декарта и И. Канта (см. главу 15), которые, фактически, не привлекали внимания ученых до первой половины XX столетия. Соперничающая с ними группа гипотез связывает образование планет с катастрофическим явлением, например, с приближением к Солнцу другой звезды или с взрывом близкой сверхновой, выброшенное вещество которой, включая все «тяжелые» элементы, было захвачено Солнцем и привело к образованию вокруг него планетной системы. В буквальном смысле слова «каждая частичка нашего тела прошла через космическое горнило: горело в звездах, взрывалось сверхновыми» [Сергеев, 2008].

Каждая из существующих гипотез имеет свои нерешенные вопросы. Но гипотезы катастрофического происхождения солнечной системы оказываются перед лицом совершенно непреодолимых трудностей. Одна из них заключается в том, что газовая струя, достаточно протяженная и горячая, чтобы из нее могли образоваться планеты, рассеялась бы в пространстве приблизительно в течение часа, еще задолго до того, как охладилась бы настолько, чтобы могла начаться конденсация. Все, что могут сделать «катастрофические» гипотезы, – это признать существование солнечного облака, а такое облако в любом случае является начальной стадией гипотезы конденсации, или небулярной гипотезы, предложенной в 1796 г. математиком и астрономом П.С. Лапласом (см. главу 15). Поэтому в наше время небулярная гипотеза вновь привлекла внимание. Она хорошо согласуется с современными взглядами на образование звезд и может

объяснить многие закономерности строения солнечной системы. Однако остаются еще неясности, связанные с распределением момента количества движения, с химическим несоответствием между планетами-гигантами и планетами земной группы, а также с механизмом конденсации. Но, по крайней мере, в рамках небулярной гипотезы мы видим возможные пути решения этих проблем.

Достаточно распространенной в настоящее время является «холодная» модель образования планет солнечной системы О.Ю. Шмидта, предложенная им в 1944 г. В основе гипотезы заложены представления о слипании под действием сил гравитации холодных частиц – планетезималей – планетных зародышей [Шмидт, 1960, с. 100-178]. В последние два десятилетия была разработана в известном смысле «противоположная» горячая модель образования Земли [Кузнецов, 2000, 2008], в основе которой заложены представления о первоначально разогретой до $3 \cdot 10^4 K$ материи. Подробнее на этой модели остановимся в этой главе ниже.

Обратимся к некоторым явлениям в солнечной системе, требующим объяснения. Прежде всего, сюда относится единообразное вращение и распределение момента количества движения. Все планеты, за исключением Плутона, обращаются по почти круговым орбитам, плоскости их орбит почти совпадают, и планеты обращаются вокруг Солнца в том же направлении, в каком вращается само Солнце (табл. 1.1, рис. 1.2).

Таблица 1.1 Орбиты и плотности планет [Стейси, 1972]

Планеты	Отношение радиуса орбиты планеты R_n к радиусу орбиты Земли	$\frac{R_n}{R_{n-1}}$	Отношение массы планеты к массе Земли	Отношение радиуса планеты к радиусу Земли	Плот- ность, $г/см^3$	Рассчи- танная плот- ность при нулевом давлении
1. Меркурий	0,387	-	0,055(3)	0,3820	5,47	5,3
2. Венера	0,723	1,86	0,815(5)	0,9506	5,24	3,9
3. Земля	1,000	1,38	1,000	1,000	5,517	4,04
Луна			0,0123	0,273	3,33	3,3
Земля+Луна			1,0123		5,44	3,96
4. Марс	1,524	1,52	0,107	0,530	4,0	3,8
5. Астероиды	~ 2,7	1,77	-	-	3,9	3,9 ^{*)}
6. Юпитер	5,203	1,92	317,9	10,97	1,35	В основ- ном, газооб- разные
7. Сатурн	9,539	1,83	95,1	9,03	0,71	
8. Уран	19,18	2,00	14,6	3,72	1,56	
9. Нептун	30,06	1,56	16(1)	3,8(3)	1,58	
10. Плутон	40	-	0,09?	0,5	4?	

Примечание: Цифры в скобках неуверенные. *) Среднее значение для всей массы выпавших метеоритов.

Большая часть спутников движется по орбитам в экваториальных плоскостях своих планет и в направлении вращения планет. Правда, известны исключения, происхождение которых можно объяснить либо захватом, либо приливным трением. Средние расстояния планет от Солнца приблизительно подчиняются модифицированному закону Тициуса – Боде (рис. 1.3):

$$R_n = R_0 m^n, \quad (1.1)$$

где R_0 – примерно равен половине радиуса орбиты Меркурия, R_n - радиус n -ой (считая от Солнца) планеты, $m = 1,89$. Физическая сущность этого закона еще не выяснена. И, тем не

менее, некоторые авторы полагают, что такая зависимость закона Тициуса – Боде может определяться процессами самоорганизации, протекающими (протекавшими) в солнечной системе [Антонюк, 2007; Резанов, 2004]. Более того, степенная форма закона (1.1) позволила высказать предположение, что при образовании Солнечной системы «традиционные методы классической физики и небесной механики, которые сегодня широко используются в космогонии, оказываются мало эффективными, если вообще пригодными. Закономерности типа правила Тициуса – Боде» приводят к «квантовому механизму» образования орбит планет и их спутников [Баренбаум, 2002, с. 177-179].

Рассмотрение задачи «квантования солнечной системы» в рамках уравнений теории физического вакуума приводит к сходной зависимости с погрешностью не более 3% [Трунаев, 2006, с. 48-65; Шипов, 2002, с. 79-80]. Впрочем, эти гипотезы вполне могут рассматриваться как дополняющие друг друга.

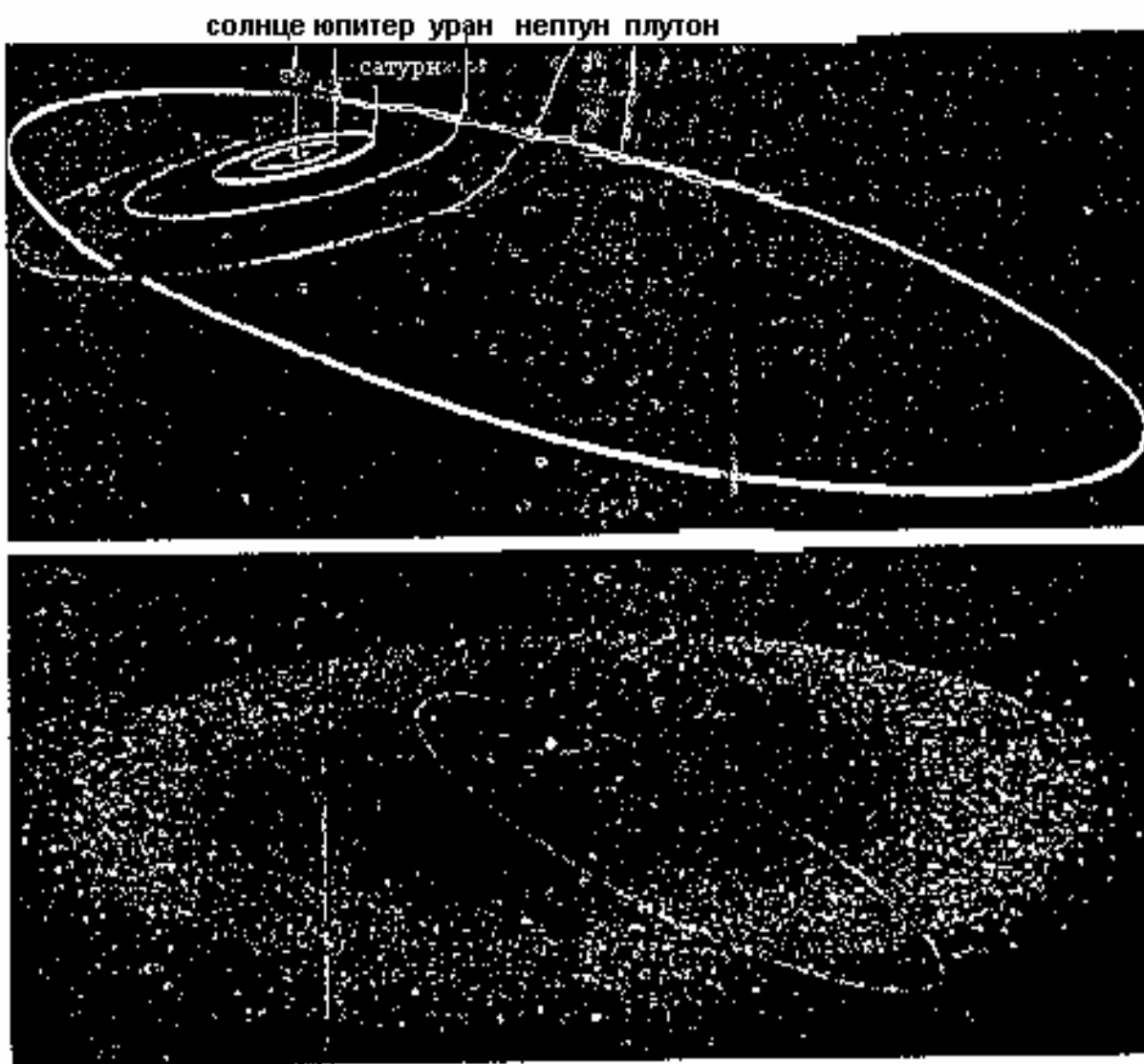


Рис. 1.2. Схема взаимного расположения окружающих Солнце планетной системы (планеты земной группы, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун) и пояса астероидов Кейпера (нижний рисунок). Видно особое положение Плутона, периодически вторгающегося в планетную систему из кометного облака Оорта [Маракушев, Моисеенко, Тарарин, 2000].

Распределение момента количества движения в солнечной системе представляет трудности для всех теорий. Планеты обладают 98% общего момента количества движения системы; само Солнце медленно вращается с периодом 24,65 суток. (Солнце вращается не

как твердое тело; указанный период относится к экваториальным областям Солнца.) С другой стороны, основная масса (99,9%) системы сосредоточена в Солнце. Задача заключается в том, чтобы объяснить, каким образом передается момент количества движения от центрального тела к внешним частям системы.

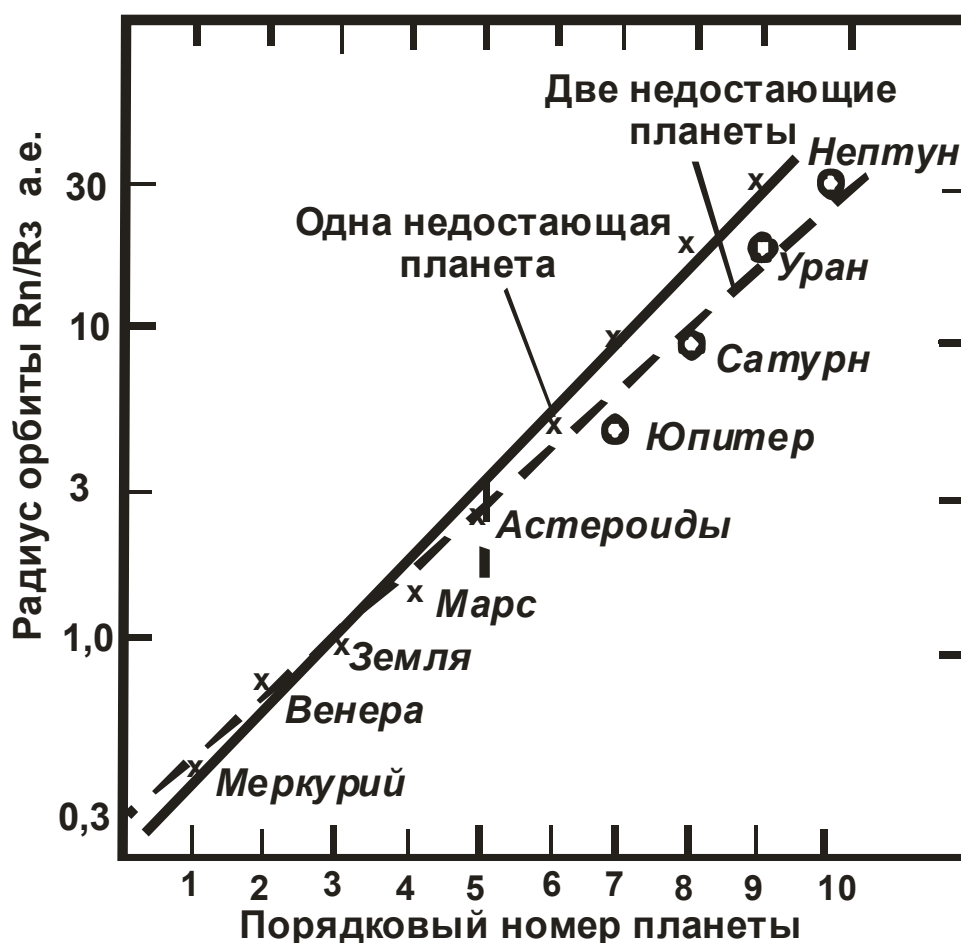


Рис. 1.3. Радиусы орбит планет приблизительно описываются законом геометрической прогрессии (закон Тициуса-Боде).

Возникшие здесь трудности и послужили причиной того, что в начале XX века была отвергнута модифицированная небулярная гипотеза И. Канта – П.С. Лапласа, поскольку момент количества движения сжимающегося диска, состоящего из вращающихся частиц пыли и газа, должен оставаться прочно «привязанным» к основной массе, из которой сконденсировалось само Солнце. «Катастрофические» гипотезы пытались обойти это затруднение, но в действительности им не удалось сделать это сколько-нибудь удовлетворительно. Сейчас, когда возродилась небулярная гипотеза, установлено, что взаимодействие между магнитным полем Солнца и ионизованным облаком или же эффекты турбулентности в облаке могли бы привести к передаче момента во внешние части сжимающегося газопылевого облака.

По мнению В.В.Орленка [2000] наблюдаемое распределение момента количества движения в солнечной системе можно объяснить в рамках вихревой модели Н.А.Шило [Шило, 1982; Латкин, 2004].

В теориях происхождения солнечной системы химические данные обычно игнорировались [Ларин, 2005; Орленок, 2000]. Различные тела солнечной системы образованы, в основном, тремя группами химических элементов:

Группа I: H, He (около 90% массы Солнца),

Группа II: C, N, O, (около 1,5% массы Солнца),

Группа III: Mg, Fe, Si (около 0,25% массы Солнца).

Планеты земной группы: Меркурий, Венера, Земля, Марс и астероиды – обладают значительной плотностью ($\rho = 3,9 - 5,5 \text{ г/см}^3$, табл. 1.1) и состоят преимущественно из Mg, Fe и Si. Планеты-гиганты Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун значительно крупнее планет земной группы, их плотность существенно меньше ($\rho = 0,7 - 1,6 \text{ г/см}^3$, табл. 1.1), и поэтому они должны состоять главным образом из H и He. Возможно, их общий состав мало отличается от состава Солнца или первичной околосолнечной туманности. Состав Урана и Нептуна, плотности которых имеют промежуточные значения, в основном могут определяться твердыми соединениями II группы элементов: метаном, аммиаком и льдом. Во время формирования планет внутри солнечного облака должна была происходить сильная химическая дифференциация. Менее летучие элементы III группы должны были выделяться из облака в окрестностях планет земной группы, когда облако вытягивалось под действием магнитных или иных сил. Тогда же водород и гелий, составляющие свыше 90% всей первоначальной массы облака, интенсивно улетучивались в окружающее пространство в окрестностях Урана и Нептуна. Механизм этого «выдувания» не ясен.

Анализ содержания некоторых изотопов в метеоритах позволил оценить возраст Галактики. Верхний предел величины интервала времени от завершения синтеза тяжелых элементов (или взрыва сверхновой?) до образования родительских метеоритных тел оценивается в 200 млн лет. Отсюда можно заключить, что взрыв сверхновой мог произойти вблизи будущего солнечного облака менее чем за 200 млн лет до образования солнечной системы. Взрыв мог также сыграть роль спускового механизма для начала конденсации в облаке.

Подытожим те стадии, через которые, возможно, прошла солнечная система. Первые пять стадий могли совпадать во времени.

Вращающееся Солнце сжималось, и поэтому его угловая скорость постепенно увеличивалась. При этом вращающийся газопылевой диск вытягивался в экваториальной плоскости. Возможно, околосолнечное облако образовалось после того, как вещество было выброшено с солнечного экватора, когда центробежная сила превысила силы тяготения (как впервые предположил Лаплас), или же облако могло образоваться в результате иных процессов.

Момент количества движения был передан от Солнца к облаку; вращение Солнца замедлилось, и облако расширилось, охватив местоположение будущих планет. Этот процесс мог произойти в результате взаимодействия магнитного поля Солнца (порядка 1 Гс) с ионизованной частью облака или же вследствие турбулентной конвекции в облаке.

С переносом наружу момента количества движения связана потеря энергии вращения, что могло произойти вследствие излучения облаком частиц высокой энергии при внезапных возмущениях магнитного поля. При этом могли образоваться легкие элементы, например, литий, и некоторые короткоживущие, радиоактивные изотопы, скажем Al^{26} .

При интенсивном истечении первичных водорода и гелия в окружающее пространство в районе расположения внешних планет в газопылевом облаке началась химическая дифференциация; при конденсации в области образования будущих планет земной группы выделились кремний, железо и магний.

По мере охлаждения околосолнечное облако конденсировалось в пылинки и более крупные частицы, двигавшиеся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца в его поле тяготения.

Частицы с близкими орбитами сталкивались и слипались, постепенно вырастая до размеров достаточно крупных тел. Однако механизм, заставивший частицы объединяться на ранней стадии аккреции, остается неясным. Когда тела достигли размеров 1 км и больше, процесс столкновений и слипания усилился за счет тяготения. В конечном счете, образовались тела с размерами планет, их спутников и астероидов. Большая часть

составлявших первичное облако газа и пыли заключена в этих телах или же рассеялась в пространстве.

В процессе аккреции момент количества движения передавался от облака к новообразованным планетам и их спутникам. Механизм передачи остается пока невыясненным.

На начальных стадиях аккреции малые тела, возможно, сильно разогревались из-за распада короткоживущих изотопов, в частности Al^{26} . Эти изотопы могли появиться в результате облучения газопылевого облака частицами высокой энергии. Разогрев мог вызвать разделение железо-никелевой и силикатной фаз и другие тепловые процессы в родительских телах метеоритов. Позднее некоторые из этих тел разрушились и образовали метеориты.

Процесс образования солнечной системы в основном закончился около 4500 млн лет назад, и с тех пор общая структура системы не претерпела существенных изменений. За это время могли произойти захваты планетами спутников (например, Луна могла быть захвачена Землей), а скорость вращения планет, особенно Меркурия, Венеры и Земли, могла замедлиться под воздействием приливного трения.

В заключение обратим внимание на те новые данные, которые появились в последнее время и, по сути, являются основой для новых гипотез образования звездных систем [Сурдин, 2008]. Выяснилось, что среди миллиардов звезд почти невозможно найти светило, похожее на Солнце и имеющее столь же спокойный характер. Наша Галактика среди подобных ей крупных звездных систем также оказалась на редкость «мирной», практически не проявляющей активности: даже расположенная в ее ядре массивная черная дыра ведет себя весьма тихо. Солнце со своими планетами движется в Галактике не хаотично, но, счастливо избегая мест скопления новорожденных звезд, среди которых немало активных, а значит, опасных для нашей биосферы. Последнее, что долго не удавалось выяснить астрономам, - насколько типична наша планетная система и часто ли у других звезд имеются планеты, подобные Земле. Найти планеты вблизи иных звезд всегда представлялось задачей невероятно сложной.

Как показано выше, выяснилось, что в большинстве своем экзопланетные системы совершенно не похожи на нашу Солнечную систему. В них планеты-гиганты типа Юпитера оккупируют «зону жизни», представляющую собой область вокруг звезды, где температурные условия на планете позволяют существовать жидкой воде – главному условию развития жизни земного типа. Но на самих газовых гигантах-«юпитерах» жизнь развиваться не может (у них даже нет твердой поверхности), а маленькие планеты земного типа эти гиганты из «зоны жизни» выталкивают. Теперь ясно, что Солнечная система нетипична, а возможно, и уникальна: ее планеты-гиганты, движущиеся по почти круговым орбитам вне «зоны жизни», позволяют длительное время существовать в этой зоне планетам земного типа, одна из которых, Земля, имеет биосферу. По-видимому, другие планетные системы крайне редко обладают этим качеством. Для тех, кто надеется быстро найти братьев по разуму, это неприятное известие.

Выше были приведены новые данные о галактиках, звездах и их планетных системах, которые в будущем, несомненно, необходимо будет учесть при построении теорий, объясняющих их генезис. Ниже кратко рассмотрим уже существующие теории происхождения солнечной системы и Земли.

Основы «холодной» модели происхождения солнечной системы [Сафронов, Витязев, 1983].

С давних времен в космогонии солнечной системы происходило противоборство идей по двум главным направлениям. Во-первых, образовались ли Солнце и планеты в едином процессе или независимо. Во-вторых, образовались ли планеты из газовых сгустков или из твердого вещества («небулярные» и «метеоритные» гипотезы).

Классические гипотезы Канта и Лапласа о совместном образовании Солнца и планет из рассеянного вещества единой туманности господствовали полтора столетия, затем были надолго оставлены. В 40-х годах идея совместного образования послужила основой для небулярных моделей Берлаге, Вейцеккера, Кейпера, Фесенкова, но всерьез возродилась лишь в 60-х годах Хойлом, Камероном, Шацма-ном. Гипотезы о раздельном образовании Солнца и планет можно подразделить на две основные группы — гипотезы об образовании планет из вещества, тем или иным образом выделившегося из уже существовавшего Солнца (Бюффон, Мультион и Чемберлин, Джине, Станюкович и др.), и гипотезы захвата Солнцем диффузной межзвездной среды (Альвен, Шмидт, Литтлтон и др.).

Образование планет из газовых сгустков (протяженных массивных протопланет) предполагается в гипотезах Лапласа, Джинса, Кейпера, Фесенкова, Камерона, а образование из твердого вещества — в гипотезах Лигондеса, Мультиона-Чемберлина, Шмидта, Альвена-Аррениуса, Эджворта и др.

Впервые систематическая разработка теории образования планет из твердых частиц околосолнечного допланетного облака была начата О. Ю. Шмидтом в 1944 году [Шмидт, 1960, с. 100-178]. О.Ю. Шмидт определил планетную космогонию как комплексную астрономо-геолого-геофизическую проблему, опирающуюся не только на астрономические данные, но и на многочисленные данные наук о Земле. Он подчеркивал, что процесс формирования планет в допланетном облаке относительно независим от процесса образования самого облака вокруг Солнца. Основные этапы процесса аккумуляции планет были подробно исследованы его коллегами и учениками (Гуревичем и Лебединским, Левиным, Сафроновым, Витязевым и др.). В 70—80-е годы теория аккумуляции планет из твердых тел и частиц получила дальнейшее развитие. Она разрабатывается учеными ряда стран и пользуется широким признанием.

Классическая космогония ставила перед собой задачу объяснить следующие группы фактов:

А - Орбиты планет почти круговые, лежат в одной плоскости и их обращение (у большинства из них и вращение) происходит в одном направлении с вращением Солнца (рис. 1.2).

В - Планеты распределены явно не случайным образом, в их расстояниях от Солнца есть закономерность, описываемая известным правилом Тициуса-Бодде (рис. 1.3; соотношение (1.1)).

С - Разделение планет на две резко различающиеся группы: внутренние планеты - Меркурий, Венера, Земля и Марс - сравнительно небольшие, но с большей плотностью, более медленным вращением, с малым числом спутников (или без них) и внешние планеты - Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун - большие по размерам, меньшей плотности, с большей скоростью вращения и многочисленными спутниками (табл. 1.1).

Д - Распределение момента количества движения: в то время как в Солнце сосредоточено более 99% всей массы солнечной системы, на него приходится менее 2% момента количества движения, остальные 98% принадлежат планетам (табл. 1.2; 1.3).

Важным методологическим шагом было предложенное О.Ю. Шмидтом деление проблемы происхождения солнечной системы на три части, разработка которых могла производиться в некоторой степени независимо. С незначительными изменениями эти три задачи можно сформулировать следующим образом: первая - объяснение происхождения Солнца и способа формирования допланетного облака, вторая (центральная задача планетной космогонии) - разработка теории образования планет в ходе эволюции допланетного облака и третья - установление геофизических, геохимических и геологических следствий теории образования планет. Такое деление позволило О.Ю. Шмидту и его последователям приступить к решению центральной задачи и к объяснению круга проблем *А*, *В* и *С*. Позднее в рамках этого же подхода был совершен переход к сле-

дующей по сложности группе задач определения начального состояния планет, состава и структуры их недр к моменту завершения процесса аккумуляции.

Таблица 1.2. Распределение орбитального углового момента планет в Солнечной системе [Викулин, 2004а, с. 37; Викулин, Мелекесцев, 2007]

1	Планета	Масса, $M_{\text{Земли}}=1$	Радиус орбиты $R \cdot 10^6$ км	Орбитальная скорость, [км/с]	Период обращения, τ , [сутки]
2	Меркурий	0,053	57,91	47,90	87,969
3	Венера	0,815	108,2	35,05	224,70
4	Земля	1,000	149,6	29,80	365,26
5	Марс	0,107	227,9	24,14	686,98
6	Юпитер	318,0	778,3	13,06	4332,6
7	Сатурн	95,22	1428	9,65	10759
8	Уран	14,55	2872	6,80	30687
9	Нептун	17,23	4498	5,43	60184
10	Плутон	0,900	5910	4,74	90700

1	τ , 10^8 с	$\omega=2\pi/\tau$, 10^{-9} с $^{-1}$	Момент, $M_{\text{орб}}$, 10^{50} г·см ^{2} ·с $^{-1}$	Момент, $M_{\text{орб}}$, [%]
2	0,076	826,2	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
3	0,194	323,5	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
4	0,316	200,0	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$
5	0,594	105,8	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
6	3,743	16,78	1,932	61,33
7	9,296	6,756	0,784	24,89
8	26,51	2,369	0,169	5,394
9	52,00	1,208	0,252	7,990
10	78,36	0,801	0,015	0,479

Примечание: $M_{\text{Земли}} = 6 \cdot 10^{27}$ г, $M_{\text{орб}} = MR^2 \omega$ – орбитальный момент планеты с массой M , радиусом орбиты R и угловой скоростью вращения $\omega = 2\pi/\tau$ вокруг Солнца.

В настоящее время объяснение групп фактов *A*, *B*, *C* и *D* является необходимым, но далеко не достаточным критерием правильности той или иной динамической модели. Требуется дополнительно объяснить обширную группу космохимических фактов:

E - Вариации химического состава планет и спутников, существование разных типов метеоритов и астероидов, комет, изотопные данные.

Объяснение совокупности данных по астероидам и метеоритам, кометам и межпланетной пыли, составу поверхностей и атмосфер планет является столь же важным для предлагаемых моделей, как и объяснение групп *A*, *B*, *C* и *D*. В качестве конкретного примера укажем на необходимость сопоставления и согласования временных шкал и последовательности отдельных стадий по изотопным данным и динамическим оценкам. Так, данные по возрастам метеоритов говорят о длительной (10^7 — 10^8 лет) столкновительной эволюции планетезималей в ходе их аккумуляции в планеты и являются веским подтверждением динамической оценки шкалы времени образования планет $\sim 10^8$ лет.

Грандиозный прогресс в технических возможностях астрономии, достигнутый на рубеже XX-XXI веков, позволил с 1995 г. начать серию открытий планет у ближайших звезд. К началу XXI века были открыты уже около 50 планетных систем (см. выше в этой главе раздел 6. *Экзопланеты*). Кроме того, обнаружены газопылевые диски возле молодых звезд (например, у звезды β -Живописца), характеристики которых неплохо согласуются с построенной О.Ю.Шмидтом и его последователями теории образования планетных

систем. Тем самым, находит подтверждение на практике и теория образования солнечной системы [Леви, Язев, Задонина и др., 2002].

Таблица 1.3. Распределение собственного вращательного момента Солнца и планет [Викулин, 2004а, с. 38; Викулин, Мелекесцев, 2007]

1	Космическое тело	Число спутников	Масса, $M_{\text{Земли}}=1$	Плотность, $\rho, [\text{г/см}^3]$	Экваториальный радиус, $r, [\text{км}]$
2	Солнце		$3,3 \cdot 10^5$	1,41	$7 \cdot 10^5$
3	Меркурий	0	0,053	5,3	2420
4	Венера	0	0,815	4,95	6200
5	Земля	1	1,000	5,517	6379
6	Марс	2	0,107	3,95	3400
7	Юпитер	14	318,0	1,33	71400
8	Сатурн	15	95,22	0,687	60400
9	Уран	5	14,55	1,56	23800
10	Нептун	2	17,23	2,27	22300
11	Плутон	1	0,900	4(?)	3000

1	Период вращения, Т	$\Omega=2\pi/T, 10^{-4} \text{ с}^{-1}$	Момент, $M_{\text{вр}}, 10^{49} \text{ г} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Момент, $M_{\text{вр}}, [\%]$
2	26-37 дней	$\approx 0,024$	0,16	2,4
3	58,7 дня	0,013	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$\approx 10^{-5}$
4	-243 дня	0,003	$-7,6 \cdot 10^{-5}$	$\approx 10^{-3}$
5	24 час. 56 мин.	0,729	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$\approx 10^{-3}$
6	23 час. 37 мин.	0,754	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$\approx 10^{-5}$
7	9 час. 50 мин.	1,774	4,0	62,5
8	10 час 14 мин.	1,706	2,2	34,4
9	-0,89 дня	0,817	-0,02	0,3
10	0,53 дня	1,365	0,02	0,3
11	6,39 дня	0,11	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$\approx 10^{-4}$

Примечание: вращательный момент Солнца вычислялся из $M_{\text{вр, Солн}} = 2E/\Omega = 1,58 \cdot 10^{48} \text{ г} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, где $E = 1,9 \cdot 10^{42} \text{ эрг}$ – кинетическая энергия Солнца, по [Таблицы..., 1976, с. 973]; вращательный момент планет вычислялся из $M_{\text{вр}} = I\Omega$, где $I = 8/15\pi r^2$ – момент инерции планеты; знак минус обозначает вращение планеты в обратную сторону.

Модель горячей Земли

В течение последних двух десятилетий была разработана совершенно новая, во многом отличающаяся от общепринятых в настоящее время модель «горячего» происхождения Земли и всей Солнечной системы. Эта модель не является бесспорной, но она является обобщением большого экспериментального материала, а потому будоражит воображение и вызывает к дискуссии. Вне всякого сомнения, модель горячей Земли имеет право на существование. К некоторым моментам этой модели, изложенной в книгах [Кузнецов, 2000, 2008], мы будем обращаться по ходу нашей книги. Здесь же приведем выдержки из Введения [Кузнецов, 2008, с. 6-12].

«Модель холодной Земли [Шмидт, 1960, с. 41-178] общепринята и не подвергается сомнению. Остановимся на сути этой модели: Земля образовывалась путем «склеивания» холодных частиц (планетезималей) в течение 100 млн лет, иначе тепло, выделяемое при этом процессе, не будет успевать отводиться за счет радиационного охлаждения, и мы приходим к горячей модели. Рассматривается два сценария образования Земли: согласно первому, сначала образовалось железное ядро, а затем на него стали «падать» силикаты, формируя мантию. Согласно второму, - Земля была «склеена» из силикатов и железа,

потом произошла дифференциация, и выделилось жидкое ядро, центральная часть которого кристаллизовалась (?). В каждом из сценариев, внешнее ядро Земли железное, расплавленное. В нем возникает конвекция, причем такого вида, что хорошо проводящая жидкость (железо) захватывает (вмораживает) силовую линию магнитного поля из окружающего Землю космоса и за счет эффекта гидромагнитного динамо происходит усиление и преобразование этого «затравочного» поля в геомагнитное. Дрейф материков обязан крупномасштабной конвекции, причина которой так и не выяснена, нет ни одного доказательства наличия такой конвекции на Земле. Тепловой поток, по модели, обязан наличию радиоактивных элементов и т.п.

Подавляющее большинство геологов, интересующихся проблемами внутреннего устройства Земли, не сомневаются в том, что ядро Земли железное, а внутреннее тепло обязано радиоактивному распаду, иначе говоря, не сомневаются в том, что она «холодная». Тем не менее, анализируя геологический материал, реконструируя земной ландшафт по «остаткам» гор и вулканов, изучая палеомагнитные «записи» и химический состав пузырьков газа и воды, сохранившихся с давних времен в твердых породах, многие приходят к выводу, что Земля на ранних этапах своей эволюции была совсем не такой как сейчас.

У геологов, убежденных в правомерности модели холодной Земли, возникают и со временем накапливаются факты, которые, в принципе, находятся с ней («холодной» моделью – А.В.) в противоречии. Как правило, эти факты замалчиваются при написании монографий по физике Земли. Трудно назвать книги по физике Земли, издаваемые за рубежом и в России, в которых излагались бы идеи, противоречащие принятым догмам холодной модели. Одной из таких книг, оказавших на меня очень сильное впечатление, была книга австралийского геолога У. Керри [1991] о геологии расширяющейся Земли. Конечно, её нельзя считать книгой по физике Земли, но это, вероятно, одна из лучших книг, где автор убедительно показывает, что наша планета расширялась! Буквально все монографии по физике Земли «переписывают» друг у друга: планетезимали, как строительный материал для планеты, выделение железного ядра при дифференциации, генерацию магнитного поля за счет динамо-эффекта, конвекцию в мантии как движитель плит, радиогенный разогрев как источник теплового потока и т.п. Если внимательно не «присматриваться» к этой модели, то можно посчитать, что она самосогласованна и не имеет внутренних противоречий.

Если допустить, что планеты и спутники, как и Солнце, создавались по другому, «горячему сценарию», то оказывается, что практически ничего не удастся использовать из прежних «наработок» физики холодной Земли. Всю физику горячей Земли придется создавать «заново». Холодная модель интенсивно создавалась усилиями многих физиков многих стран не менее 50 лет. Модель горячей Земли в этом плане естественно уступает по глубине и тщательности проработки многих вопросов.

Сформулируем основные моменты концепции горячей Земли. Будем руководствоваться основными требованиями к новой теории, претендующей на то, что она более адекватна Природе, чем существующая. И, хотя нашу модель еще рано рассматривать как теорию Земли и Солнечной системы, тем не менее, постараемся учесть требования, характерные для любой теории, претендующей на признание научного сообщества:

Во-первых, теория не должна приводить к резко противоречащим друг другу выводам, то есть, теория должна быть самосогласованной.

Во-вторых, теория должна объяснять бесспорные результаты экспериментов и наблюдений.

В-третьих, фундамент, заложенный в теорию, должен давать ей возможность оценивать любые конкретные ситуации и анализировать результаты любого нового эксперимента.

В-четвертых, теория должна быть согласована со всеми физическими законами.

В-пятых, теория должна давать возможность предсказывать события и результаты планируемых экспериментов и наблюдений.

Основная, базовая идея, заложенная в модели горячей Земли, состоит в том, что Солнце, планеты и их спутники образовались в едином достаточно быстром (порядка 1 млн лет) самоорганизующемся процессе самогравитации протосолнечного «облака», случившемся 4.5 млрд лет назад. Этот процесс во времени и пространстве можно условно разделить на две составляющие: 1) формирование в протосолнечном «облаке» сгустков вещества, из которого впоследствии сформировались планеты, и 2) бифуркации, произошедшей в области пояса Астероидов в тот момент, когда Солнце ещё полностью не сформировалось и его радиус был больше современного примерно в 7 раз. Бифуркация разделила вещество протосолнечного «облака» на две части: из одной сформировались планеты гиганты, вторая «пошла» на формирование Солнца и планет земного типа. Особенности внутреннего строения и эволюция планет и спутников определялись одним параметром – величиной их массы M . Температура T вещества планеты в момент их образования была пропорциональна: $T \sim M^{2/3}$.

Планеты и спутники (по величине их массы) можно условно разбить на три класса: 1) $GM/R < U_1$; 2) $U_1 < GM/R < U_2$; 3) $GM/R > U_2$. U_1 , U_2 – удельные теплоты плавления и испарения, соответственно, G – гравитационная постоянная. К первому классу отнесём малые спутники и астероиды, ко второму, – Марс, Меркурий и большие спутники, к третьему, – Землю, Венеру и гигантские планеты. Первые в момент образования не были полностью расплавлены, вторые – полностью расплавлены и часть их вещества находилась в газообразном состоянии, третьи, – прошли фазу полностью газообразного состояния. Процесс сжатия (самогравитации) планеты прекращается, когда внутреннее газокINETическое давление её вещества становится равным гравитационному давлению (критерий Джинса). После этого планета эволюционирует, выделяется газообразное внутреннее ядро, жидкое – внешнее и формируется кристаллическая мантия. Планета при этом расширяется, т.к. начальная плотность вещества в газообразном состоянии была выше плотности вещества в конденсированном состоянии. На границе внутреннего и внешнего ядра реализуется фазовый переход (ФП) «конденсация-испарение», а на границе ядро-мантия фазовый переход «кристаллизация-плавление». Оба ФП экзотермические, что обеспечивает планете источник внутренней энергии, который «расходуется» на тепловой поток, магнитное поле, геодинамику и т.п. Направления ФП могут меняться: от преимущества конденсации над испарением, что приводит к расширению Земли, к преимуществу испарения над конденсацией, что соответствует периоду её сжатия.

В области ФП на границе внутреннего ядра возникают электрические явления, образуется радиальное электрическое поле и двойной электрический слой (ДЭС). Суточное вращение ДЭС вызывает появление слабого магнитного поля, которое усиливается за счет проявления гальвано-магнитных эффектов, подобных эффекту Холла, и является причиной генерации магнитного поля планеты и спутника. Смена режима преимущества ФП того или иного типа автоматически приводит к изменению полярности ДЭС и инверсии магнитного поля. Явления, связанные с деятельностью механизмов поддержания температуры в области ФП, «маркируются» магнитным полем и представляют собой всю гамму явлений геомагнетизма.

Температура и давление вещества Земли в ходе её эволюции уменьшаются, что является основной причиной происходящих в её недрах циклических процессов, находящихся отражение в палеомагнитной шкале и «каменной летописи».

Геодинамические явления, сейсмичность и вулканизм проявляются на Земле (и других планетах и спутниках), открытой самоорганизующейся структуре, как «средства» достижения выполнения условия минимизации её гравитационной энергии, приводящие Землю, другие планеты и большие спутники к шарообразной форме и стремящиеся минимизировать высоту их «геоидов».

Релаксация вещества внутреннего ядра уже произошла на Марсе и больших спутниках, о чем говорит отсутствие дипольного магнитного поля в настоящее время и наличие его в прошлом. Этот процесс ещё происходит на Меркурии, Земле и других планетах. Отсутствие магнитного поля на Венере, где внутреннее ядро должно ещё сохраниться, может быть объяснено только тем, что она вращается очень медленно и её затравочное магнитное поле слишком мало для развития генерации.

Модель горячей Земли самосогласованна, в ней используются известные законы физики, она находит объяснение всем бесспорным наблюдательным фактам, позволяет прогнозировать явления, которые могут наблюдаться в будущем. Таким образом, модель горячей Земли удовлетворяет требованиям, предъявляемым теории».

Вихревая материя Декарта и звездные системы

В соответствии с моделью Р. Декарта, причиной возникновения Вселенной стала единственно устойчивая форма движения - вихревое движение. Подтверждением этому мы находим в результатах, полученных в самое последнее время [Кондратьев, 2003, с. 34-36].

Динамика звездных систем – наука, базирующаяся на немногих фундаментальных принципах, предложенных еще Ньютоном, Джинсом и некоторыми другими исследователями. Наступления «широким фронтом» в звездной динамике никогда не проводилось, а попытка учета «всего» приводит к невероятной путанице и, как следствие - к потере физического смысла получаемых решений. Именно по этой причине в последнее время в динамике звездных систем и получило развитие нетрадиционное в наше время «вихревое» классическое наследие небесной механики и теории фигур равновесия, сформулированное П. Дирихле – Ю. Дедекиндом – Б. Риманом и развитое Б.П. Кондратьевым [Викулин, 2005].

Еще не так давно представление о гигантских звездных системах – эллиптических галактиках – основывалось на мнении, что их «сплюснутая» эллиптическая форма создается (как и для звезд и планет) их вращением. Здесь, вне всякого сомнения, сказались традиционные представления о связи между сплюснутостью и вращением в жидких и газовых конфигурациях с изотропным давлением. Источником таких представлений являлась классическая теория фигур равновесия, восходящая к Ньютону – его закону всемирного тяготения.

С развитием техники наблюдений выяснилось, что вращение большинства эллиптических галактик мало и не может объяснить величины их сжатия. Это несоответствие классической теории и стимулировало постановку для звездных систем задачи Дирихле в постановке Б.П. Кондратьева:

Законы динамики с линейным по координатам полем скоростей усредненных движений частиц допускают такое движение рассматриваемой конфигурации из звезд (частиц), при котором в любой момент времени эта конфигурация остается однородным эллипсоидом.

Известно, что такая классическая задача Дирихле для вращающейся гравитирующей жидкости имеет вихревые решения Римана [Викулин, 2005; Кондратьев, 2003]. Естественно ожидать, что и «газовые» гравитирующие системы, состоящие из звезд (частиц), также допускают «вихревые» решения, которые, с одной стороны, определяют устойчивую (эллиптическую) форму галактики и, тем самым, являются «источниками» новых «вихревых» космогонических моделей, с другой - возвращают нас к «истокам» - к гипотезе древних мыслителей о вихревых атомах и модели вихревой материи Декарта ([Викулин, 2007]; см. также главу 15).

Модель образования Солнечной системы из эндо-галактического вихря [Трунаев, 2000, 2006]

В последние годы предложена новая качественная концепция образования Солнечной системы, в основе которой заложены следующие достаточно общие предположения:

- все тела образовались и развивались по единым законам,
- единый «внутренний» механизм развития системы осуществляется посредством спирально-вращательного и вращательно-винтового движений.

Согласно представлениям модели, на первой стадии развития все вещество из объемного облака «стягивается» в достаточно тонкий вихревой диск. При этом к концу допланетной фазы развития в центральной части вихря концентрируется 99% массы протооблака. Остальная часть вещества вихря, сосредоточенная в двух равновеликих спиральных рукавах, продолжает упорядоченное спирально-вращательное движение по траекториям, отвечающим логарифмической спирали, уравнение которой в полярных координатах (ρ, φ) имеет вид: $\rho = ae^{k\varphi}$, где параметры спирали взаимосвязаны следующим образом $k = \ln a = \operatorname{ctg} \alpha$, α - постоянный угол, под которым радиус-вектор пересекает спираль.

Полагается, что когда величина скорости обращения частиц в вихре достигает критического значения в результате равенства центробежной («собственной» вращательно-винтовой) и гравитационной (по спирали к центру) сил, вихрь «разрывается». Физически точка «разрыва» в рамках описанной модели определяет некое «критическое» расстояние от центра вихря (Солнца) - радиус траектории образовавшейся в момент «разрыва» спирального вихря планеты. Полагая, что «разрывы» вихря образуются через строго определенное значение угла $\Delta\varphi = \pi/2$ или $\Delta\varphi = \pi/4$, с точностью около 3% автором получается известный (1.1) закон Тициуса-Бодде [Трунаев, 2000, с. 8-18; 2006, с. 48-65, 182-183].

Проведенный автором модели анализ геологических данных позволил ему сделать вывод, что «либо наша Земля в своем развитии «не подчинялась» основным физическим законам, либо ... виноватыми окажутся все ныне существующие космогонические модели и все, связанные с ними научные представления, под которые ныне стараются упорно «подогнать» факты геологического порядка» [Трунаев, 2006, с. 105-106].

Как видим, на качественном уровне автору удалось с помощью привлечения «вихревых» представлений совместить две главных наблюдаемых особенности Солнечной системы, ранее никак не совмещаемые в рамках одной модели: Солнце является центром масс системы, а его момент количества движения сосредоточен в планетах.

Следует отметить, что автор «эндо-галактической» модели явно тяготеет к «вихревым» взглядам Р. Декарта, который, первым ввел в науку логарифмическую спираль [Математический, 1988, с. 328], возникшую в его воображении, по-видимому, как некий математический образ вихревого устройства окружающего нас мира (см. главу 15; [Викулин, 2007]). Близкие, по сути, представления о вихрях разного уровня развивались и Н.А. Шило [1982].

Геосолитоны как функциональная система Земли [Бембель, Мегеря, Бембель, 2003]

Еще дальше пошли авторы геосолитонной концепции Земли [Бембель, Мегеря, Бембель, 2003]. Они обратили внимание на высокую стабильность работы механизма авторегулирования угловой скорости вращения Земли - отклонения не превышают $10^{-9} (= \frac{0,001}{24 \cdot 3600})!$ (Здесь знаменатель равен продолжительности дня, числитель – его

«нестабильность» в секундах). И выдвинули гипотезу о том, что именно геосолитонный механизм обеспечивает такую высокую стабильность и, следовательно, устойчивое существование и эволюцию нашей планеты. Геосолитоны, таким образом, представляют собой, по сути, «космические» кванты, которые черпают свою энергию из вакуума и поэтому, обладая торсионной энергией, создают крутящий момент – т.е. вращают космические тела. Таки образом, «хорошо известная народная поговорка: «хочешь жить – умей вертеться» приобретает фундаментальный космологический смысл. От умения «вертеться» космического тела, то есть от совершенства его системы авторегулирования процесса вращения вокруг собственной оси и зависит его судьба, жить или умереть» [Бембель, Мегеря, Бембель, 2003, с. 13-15].

Как видим, авторы подводят нас к мысли о том, что геосолитон - это «макроквант собственного момента», возникающий (рождающийся) из вакуума или эфира, и, по сути, являющийся тем первоначалом всего сущего, который Анаксимандром был назван «апейроном» (см. главу 15, раздел, касающийся Анаксимандра).

Мы можем по-разному относиться к таким теориям. Но вынуждены признать, что поиск и разведка сложнопостроенных месторождений углеводородов на основе такой геосолитонной концепции Земли достаточно хорошо себя оправдывает. Другими словами, теория подтверждается практикой.

Кручение как одно из важнейших свойств Мироздания, лежит в основе современной концепции спин-торсионного взаимодействия [Шипов, 2002]. В рамках такого подхода, описанного выше, проанализированы [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993] физические, геофизические, геологические, гидрогеологические, физико-химические и астрофизические данные, лежащие в основе новой геодинамики и физики Земли. Показано, что изучение взаимодействий между физическими полями и различными процессами внутри Земли неизбежно приводит к появлению нелинейностей и солитонным эффектам, которые отражают самоорганизацию физических полей и геологических процессов и имеют макроквантовый характер. Другими словами, представления о геосолитонах являются основой нового направления науки – квантовой геодинамики [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993, с. 147-148] или, по сути – вихревой геодинамики и физики Земли.

Предмет физики Земли

*Роль отечественных и зарубежных ученых в развитии представлений о строении Земли.
Связь с другими науками*

Вопросы, изучаемые физикой Земли, давно привлекали внимание исследователей. Не останавливаясь на фантастических взглядах о строении и развитии Земли, господствовавших в древности и средние века, отметим, что весьма интересные мысли по этому вопросу были высказаны на рубеже XV и XVI веков Леонардо да Винчи. В частности, им была предложена гипотеза, сходная с гипотезой изостазии. Вопрос о фигуре Земли, как фигуре равновесия вращающейся жидкой массы, был впервые рассмотрен Ньютоном, но после известной работы Клеро по этому труднейшему вопросу было сделано очень мало до знаменитых исследований известного русского математика А.М. Ляпунова в конце XIX - начале XX веков.

В XVIII в. русский ученый М.В. Ломоносов разработал научные основы геологии и наметил удивительные по глубине подходы к решению вопросов о развитии Земли и о силах, действующих в недрах земного шара, в частности, о природе землетрясений. В начале XIX в. Эли де Бомон, исходя из космогонической гипотезы Канта-Лапласа, выдвинул гипотезу о постепенном остывании и сжатии Земли, гипотезу, не оставленную еще и в наше время. Первые серьезные исследования влияния радиоактивного тепла на термический режим Земли были сделаны В.Г. Хлопиным. Математическая сторона

вопроса была рассмотрена А.Н. Тихоновым. Глубокие соображения по этому вопросу были высказаны В.И. Вернадским.

Вопрос о внутреннем строении Земли, об изменении плотности с глубиной, рассматривался еще Лежандром, который сделал заслуживающую внимание попытку решить этот вопрос. Существенные успехи в решении этого вопроса геофизики стали возможными лишь после разработки методов научной сейсмологии, основателем которой явился известный русский геофизик и физик Б.Б. Голицын. Он первый дал и научно обоснованную схему внутреннего строения Земли.

Основываясь на данных сейсмологии, К.Е. Буллен произвел расчет изменения плотности и упругих постоянных внутри Земли. Наиболее полное решение этого вопроса с привлечением ряда других данных было дано советским ученым М.С. Молоденским. Интереснейшие результаты по вопросу о внутреннем строении Земли были получены в исследованиях В.И. Вернадского, А.Е. Ферсмана и других советских геохимиков.

Физика Земли тесно связана с геологией, для которой она должна дать совместно с геохимией физико-химическую основу для выработки правильной концепции геологического развития Земли, на которую могла бы опираться геологическая практика. Следует отметить тесную связь физики Земли и с космогонией, от которой она берет данные об исходном состоянии Земли. Но и само познание закономерностей строения и развития Земли помогает успешному решению космогонических проблем.

Надо ясно понимать, что большинство геофизических процессов являются очень сложными и с трудом поддаются научному анализу [Ботт, 1974].

В настоящее время физика Земли подошла к той стадии развития, на которой встает вопрос о крупных обобщениях и об интерпретации в свете новых данных о современных представлениях геологии и физики о пространстве, времени и развитии материи. Это обобщение должно привести к выработке общей физической и физико-химической теории строения и процессов внутри Земли.

На предмет физики Земли существует две, в определенном смысле предельные, точки зрения: одна космогоническая, сформулированная в 1944 г. О.Ю. Шмидтом [1960] и вторая - геофизическая, предложенная в 1953 г. родоначальником этого раздела науки В.А. Магницким [1953]. Анализ этих «традиционных» и других, появившихся в последние годы подходов в совокупности с полученными в последние годы новыми данными, позволяет выделить суть проблемы – ее «вихревую» составляющую.

Земля - планеты Солнечной системы - космогония

Традиционно «в круг вопросов, изучаемых физикой Земли» включались «лишь вопросы, связанные с твердой частью земного шара» [Магницкий, 1953, с. 7; Ушаков, 1974, с.7], т.е. с «внутренним строением и физикой Земли» [Магницкий, 1965, с. 3; 2006, с. 12]. «Тем самым закладываются основы использования геофизических методов» и «к изучению планет земной группы» [Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971, с. 6]. При этом обращается внимание на «тесную связь физики Земли с космогонией, от которой она берет данные об исходном состоянии Земли, но и само познание закономерностей строения и развития Земли помогает успешному решению космогонических проблем» [Магницкий, 1953, с. 9].

С точки зрения физики Земли и планет со временем к этой задаче добавляется и другая «первоочередная задача» изучения «планет-гигантов: Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна», так как «в этих планетах сосредоточена основная доля массы планет и почти весь момент количества движения Солнечной системы» [Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971, с. 6]. В последующем «космогоническая» составляющая задачи «Планета Земля – частица Вселенной» описывалась более подробно во вводных частях соответствующих курсов по физике Земли без ее детального анализа в рамках самого предмета, который, по-прежнему, посвящался только внутреннему строению твердой Земле [Магницкий, 1995, с.

9-14; Трухин, Показеев, Куницын, Шрейдер, 2004, с. 8-14; Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 6-12].

И логика такого подхода к предмету изначально и очевидна и вполне закономерна.

Однако, сам предмет физики Земли с точки зрения его масштабности, «труднодоступности», сложности и, как следствие, познаваемости является не совсем обычным разделом науки.

Наши суждения о внутреннем строении планет базируются, в основном, лишь на данных, полученных нами с помощью измерений, проводимых исключительно на поверхностях планет или на достаточно малых глубинах от поверхности. Результаты исследований с помощью сверхглубоких скважин, показали, что экстраполяция таких «поверхностных» данных уже на небольших глубинах приводит к значительным ошибкам [Кольская, 1998]. «Большинство геофизических явлений» сами по себе «очень сложны и с трудом поддаются научному анализу. Данные, относящиеся к этим явлениям, нельзя считать ни свободными от посторонних влияний, ни полученными в одинаковых условиях. О точном анализе во многих случаях» просто «не может быть и речи. В таких условиях смутные предположения становятся гипотезами, а гипотезы именуются теориями. Неправдоподобные теории встречаются в изобилии, а отвергнуть их с полной убедительностью бывает трудно, так как часто находится новый (возможно, несущественный) фактор, который раньше не учитывался. Геологи знакомы с этим обстоятельством и приспособились к нему. Физик, впервые встречающийся с такой ситуацией, может быть обескуражен. Поэтому его следует предупредить об истинном положении дел. В целом ряде задач строгое исследование дает очень мало, логическая цепь во многих местах разорвана и связывается лишь при помощи интуитивных суждений» [Стейси, 1972, с. 7]. Более того, в последнее время стало ясно, что процессы, протекавшие на Земле в течение всей ее геологической истории, самым тесным образом оказываются взаимосвязанными с явлениями в Солнечной системе и в Галактике в целом.

При таком, изначально и сложном и неоднозначном и неопределенном положении дел, ограничивать предмет «Физика Земли» изучением только «внутреннего строения твердой части планеты» (пусть и в совокупности с жидкой, газообразной, магнитной и другими оболочками), а «космогоническую» составляющую при этом рассматривать в качестве своеобразных граничного и начального условий, по сути самой задачи, неправильно.

Космогония – Земля

Другая программа развития геофизики как одного из составных разделов космогонии, была намечена в 1944 г. О.Ю. Шмидтом [1960, с. 25-32]. В ее основу было заложено положение, согласно которому «подлинно научное объяснение физических свойств Земли» требует выяснения истории образования планеты. Поэтому одной из важнейших задач является построение научной космогонии, по крайней мере, в части возникновения планетных систем, в том числе и Земли. Такая теория должна в гораздо большей степени, чем прежние неудовлетворительные космогонии, опираться на геофизические данные и данные современной астрономии» [Шмидт, 1960, с. 27-28].

Идея важности исторического подхода к задачам геофизики подчеркивалась и М.А. Садовским [2004, с. 297], а Д.В. Наливкин активно призывал к тесному сотрудничеству геологов и астрономов [Шпитальная, Заколдаев, Ефимов, 1991].

Эта космогоническая программа достаточно подробно применительно к Солнечной системе и Земле разработана учениками О.Ю. Шмидта [Сафронов, Витязев, 1983, с. 5-11] и представлена выше в разделе «Основы «холодной» модели происхождения Солнечной системы» (см. задачи А – Е). В основу такого подхода были заложены следующие положения, казавшиеся в середине XX века почти очевидными.

1. Принималось, что в нашей Галактике имеется достаточно много планетных систем. Все они образовались и развивались примерно по одному сценарию. Поэтому для образования и нашей Солнечной системы и, в частности, Земли не требовалось каких-то особых условий.

2. Значения радиусов орбит планет (соотношение (1.1), рис. 1.2 – 1.4) и их плотностей (табл. 1.1, рис. 1.5) изменяются закономерным образом и позволяют считать, что образование планет Солнечной системы происходило по вполне определенным правилам, в которых заложены представления о гравитационном коллапсе, основанные на законах классической физики.

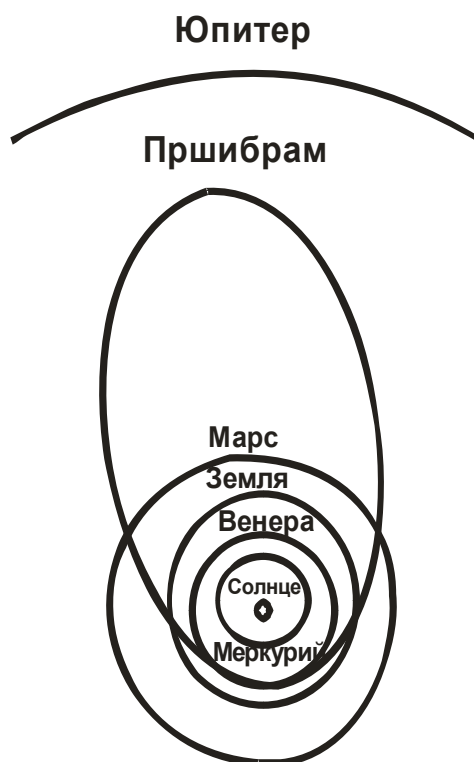


Рис. 1.4. Орбита метеорита, упавшего в 1959 г. около Пршибрама (Чехия)

3. Все планеты Солнечной системы достаточно отчетливо разбиваются на две группы: расположенные вблизи Солнца планеты земной группы со средней плотностью около 5 г/см^3 , и планеты-гиганты со средней плотностью около 1 г/см^3 , которые расположены на периферии Солнечной системы.

4. Основная масса планет Солнечной системы и практически весь ее момент количества движения сосредоточены в планетах-гигантах. Поэтому одной из важнейших задач любой теории, объясняющей образование планетной системы, является процесс перераспределения (переноса) момента количества движения внутри туманности.

И в такой постановке проблемы основной трудностью, которая так и не была преодолена ни одной гипотезой, которые ставили своей целью объяснение происхождения планетной системы типа Солнечной, является совмещение в рамках одной гипотезы всех этих положений, которые представлялись «равноправными».

Галактики – звезды – экзопланеты – вихревые движения

Полученные в последнее время данные, которые приведены выше, показали, что и наша Галактика и наше Солнце, в отличие от других галактик и звезд, являются необычайно «спокойными» образованиями. До настоящего времени, несмотря на большой объем проведенных исследований, так и не удалось пока обнаружить ни одной планетной

системы, похожей на нашу Солнечную систему, и ни одной планеты, по массе и размерам похожей на Землю. Данные, полученные по экзопланетам и их системам, показали, что причиной отсутствия аналогов нашей Земли и нашей Солнечной системы, являются именно планеты-гиганты, которые во всех наблюдаемых звездных системах своими большими по значению моментами количества движения «вытесняют» планеты земной группы из «зоны жизни» - области, расположенной вблизи звезды.

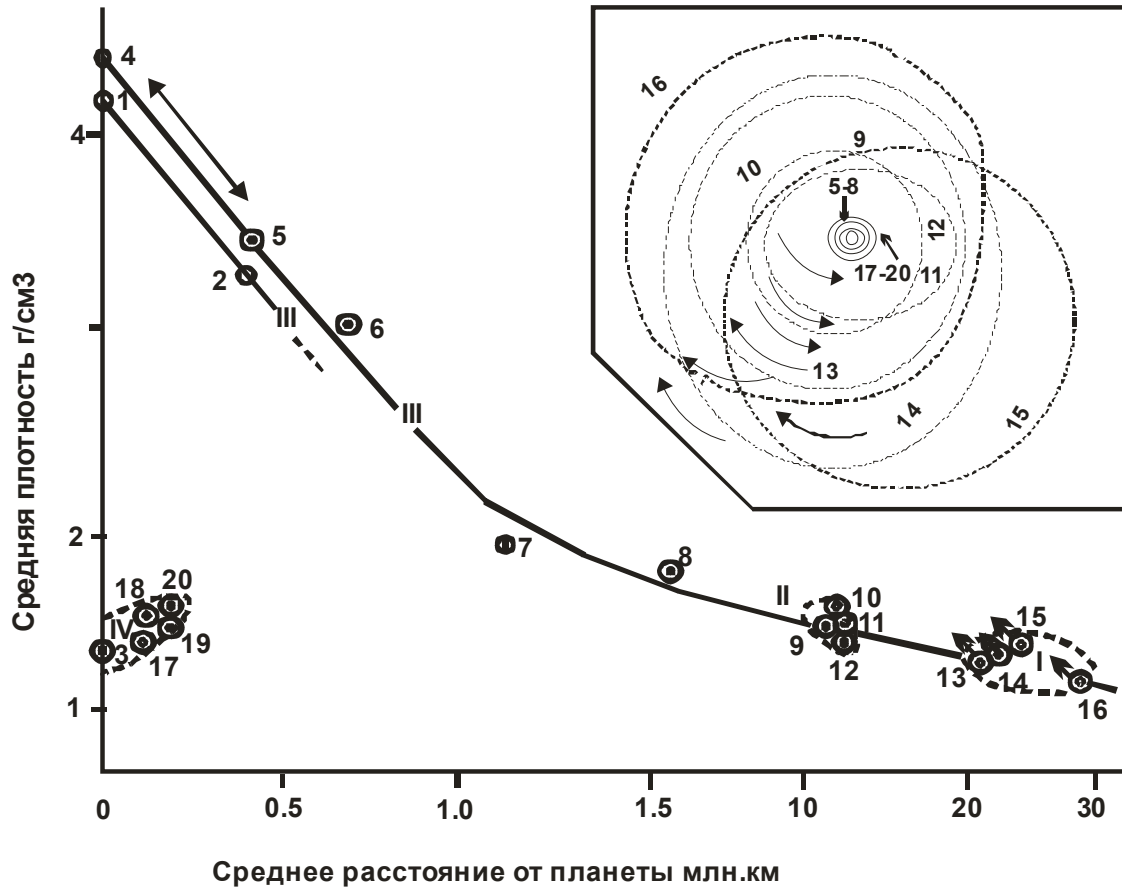


Рис. 1.5. Диаграмма распределения плотности в системах «Земля – Луна» и «ядро Юпитера – его спутники» в зависимости от удаленности спутников от материнских планет (средних радиусов орбит) [Маракушев, Моисеенко, Сахно, Тарарин, 2000]. 1 – Земля (плотность Земли (1) и ядра Юпитера (4) пересчитаны на нулевое давление); 2- Луна; 3-5 – Юпитер (3), его железосиликатное расплавленное ядро (4) и ближайший спутник Ио (5); 6-20 – другие спутники Юпитера. Направление движения спутников обозначено на схеме их орбит стрелками. I-IV – группа спутников в предполагаемой последовательности их образования; I-II – удаленные спутники с обратным (I) и нормальным (II) движением по орбитам; III-IV – околопланетные массивные плотные спутники (III) и спутники низкой плотности, обрамляющие кольцевую систему планеты (IV).

Проведенные исследования показали, что зависимость для радиусов орбит планет, типа закона Тициуса – Боде (1.1), скорее всего, соответствует процессам самоорганизации, протекавшим в Солнечной системе в течение стадии ее формирования и протекающим в настоящее время. Более того, степенная форма этого закона позволила предположить, что образование Солнечной системы происходило не в соответствии с законами классической физики и небесной механики. Скорее всего, закономерность типа Тициуса – Боде для орбит планет и их спутников соответствует «квантовому механизму», который обеспечивается за счет вихревых движений – собственных и орбитальных моментов количества движения планет.

Как видим, у авторов первой модели атома действительно были все основания назвать ее планетарной!

В свете сказанного ясно, что в качестве основной причины такой взаимной нестыковки космогонических гипотез вслед за [Бембель, Мегеря, Бембель, 2003; Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Трунаев, 2000, 2006; Шипов, 2002], по-видимому, можно принять факт недооценки важности именно вращательного (вихревого) движения космического вещества на всех стадиях его существования: от начала зарождения системы «звезда – планеты» до ее коллапса [Викулин, 2004б; Мелекесцев, 2004]. Отсюда, с очевидностью, вытекает необходимость рассмотрения всех проблем, стоящих перед «традиционной» физикой Земли, с позиций вихревой геодинамики [Викулин, 2004а].

Литература

- Антонюк П.Н. Разностное уравнение, описывающее эмпирический закон Тициуса-Боде // Синергетика геосистем / Ред. Е.Г. Мирлин. М.: ИГЕМ РАН, 2007. С. 28-31.
- Атвуд У., Майкельсон П., Ритц С. Окно в экстремальную Вселенную // В мире науки. 2008. № 3. С. 16-23.
- Ацюковский В.А. Общая эфиродинамика. Моделирование структур вещества и полей на основе представлений о газоподобном эфире. М.: Энергоатомиздат, 2003. 584 с.
- Баренбаум А.А. Галактика. Солнечная система. Земля. М.: ГЕОС, 2002. 394 с.
- Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2003. 344 с.
- Ботт М. Внутренне строение Земли. М.: Мир, 1974. 376 с.
- Бурба Г. Оазисы экзопланет // Вокруг Света. 2006. № 9. С. 38-45.
- Вибе Д. Дело темное // ГЕО. 2006. № 6. С. 128-136.
- Викулин А.В. Введение в физику Земли. Учебное пособие для геофизических специальностей. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004а. 240 с.
- Викулин А.В. Взгляд физика: вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004б. С. 8-19.
- Викулин А.В. Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2005. № 2. Вып. № 6. С. 86-95.
- Викулин А.В. Хроника развития естественнонаучных представлений о ротационных и вихревых движениях // Вестник КамчатГТУ. 2007. Выпуск 6. С. 64-77.
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В. Вихри и жизнь // Ротационные процессы в геологии и физике. М.: ДомКнига, 2007. С. 39-101.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2004. 297 с.
- Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И. Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 154 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В. Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. М.: Наука, 1971. 384 с.
- Иванов Б.Н. Законы природы. М.: Высшая школа. 1986. 336 с.
- Квиг К. Грядущая революция в физике частиц // В мире науки. 2008. № 5. С. 26-34.
- Коллинз Г. Будущее физики // В мире науки. 2008. № 5. С. 18-25.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования. М.: НФ «Технонефтегаз», 1998. 260 с.
- Кондратьев Б.П. Теория потенциала и фигуры равновесия. М.-Ижевск: Институт

компьютерных исследований, 2003. 624 с.

Крывелев И.А. История религий: очерки в 2 т. Т. 1. М.: Мысль, 1988. 445 с.

Кузнецов В.В. Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.

Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 367 с.

Кэрри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир, 1991. 447 с. *Carey S.W.* The expanding Earth. Amsterdam: Elsevier, 1976.

Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: Агар, 2005. 248 с.

Латкин А.С. Вихревая структура звездных планетарных систем Вселенной // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. С. 241-245.

Леви К.Г., Язев С.А., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Куснер Ю.С. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2002. 182 с.

Магницкий В.А. Основы физики Земли. М.: Геодезиздат, 1953. 290 с.

Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 379 с.

Магницкий В.А. (ред.). Общая геофизика. М.: МГУ, 1995. 317 с.

Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли / Ред. А.О. Глико. М.: Наука, 2006. 390 с.

Маракушев А.А., Моисеенко В.Г., Сахно В.Г., Тарарин И.А. Петрология и рудоносность Тихого океана // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. №6. С. 3-136.

Математический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1988. 847 с.

Мелекесцев И.В. Взгляд геолога: вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. С. 20-23.

Орленок В.В. Основы геофизики. Калининград: Калининградский государственный университет. 2000. 448 с.

Павленко Ю.Г. Начала физики. Учебник. М.: Изд-во «Экзамен», 2005. 864 с.

Потапов Ю.С., Фоминский Л.П., Потапов С.Ю. Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиции теории движения. Кишинев-Черкассы: Око-Плюс. 2000.

Резанов И.А. История взорвавшейся планеты. М.: Наука, 2004. 184 с.

Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.

Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва / Ред. В.А. Адушкин. М.: Наука, 2004. С. 296-305.

Сафронов В.С., Витязев А.В. Происхождение солнечной системы // Итоги науки и техники. Астрономия. Т. 24. М.: ВИНТИ. 1983. С. 5-93.

Сергеев А. Вселенская алхимия // Вокруг Света. 2008. № 4. С. 34-42.

Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир. 1972. 344 с.

Сурдин В. Как рождаются звезды // Вокруг Света. 2008. № 2. С. 70-78.

Таблицы физических величин / Ред. И.К. Кикоин. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.

Тарасов В. Музыка сфер // Вокруг Света. 2005. № 1. С. 30-40.

Трунаев Е.М. Очерки о необычном. Новая концепция образования и развития Земли и Солнечной системы в целом. Ставрополь: ИРО, 2000. 89 с.

Трунаев Е.М. Странная история Земли. В ракурсе домыслов. Черкесск: Нартиздат, 2006. 228 с. <http://www.trunaev.narod.ru>

Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.

Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е., Шрейдер А.А. Основы экологической геофизики. СПб: Изд-во «Лань», 2004. 384 с.

- Физический энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: «Советская энциклопедия», 1983. 928 с.
- Фридман А.* Из жизни спиральных галактик // В мире науки. 2005. № 1. С. 72-79.
- Хеллеманс А.* COROT на орбите // В мире науки. 2008. № 2. С. 10.
- Ушаков С.А.* Строение и развитие Земли // Итоги науки и техники. Серия Физика Земли. Т. 1. М.: ВИНТИ, 1974. 269 с.
- Шило Н.А.* О механизме образования Солнечной системы // Тихоокеанская геология. 1982. № 6. С. 20-27.
- Шипов Г.И.* Теория физического вакуума в популярном изложении. Развитие программы Единой Теории Поля, выдвинутой А. Эйнштейном. М.: Изд-во «Кириллица-1», 2002. 128 с.
- Шмидт О.Ю.* Избранные труды. Геофизика и космогония. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 210 с.
- Шпитальная А.А., Заколдаев Ю.А., Ефимов А.А.* Проблема времени в геологии и звездной астрономии // Проблемы пространства и времени в современном естествознании. Серия «Проблемы исследования Вселенной». В. 15. СПб, 1991. С. 95-106.
- Элиаде М.* История веры и религиозных идей. Т. 1. От каменного века до эливинских мистерий. М.: КРИТЕРИОН, 2001. 464 с.
- Элиаде М.* История веры и религиозных идей. Т. 2. От Гаутамы Будды до триумфа христианства. М.: КРИТЕРИОН, 2002. 512 с.

2. ФИГУРА ЗЕМЛИ

Развитие представлений о фигуре Земли с древнейших времен до наших дней. Понятие об истинной фигуре Земли – геоиде и его геометрическое представление. Сжатие Земли. Сфероид Клеро. Фигура и распределение массы внутри Земли. Уравнение Клеро. Понятие о периодах Эйлера и Чандлера, нутации, прецессии. Динамическое сжатие Земли. Референц-эллипсоид. Эллипсоид Красовского. Международный эллипсоид. Квазигеоид. Земля как трехосный эллипсоид.

История развития представлений о фигуре Земли и ее размерах

Учение о фигуре Земли возникло из попыток узнать и объяснить ее форму.

Первые сведения о таких данных содержатся в высказываниях древних. Представление о том, что Земля имеет сферическую форму, по-видимому, было предметом размышлений в древней Греции со времен Анаксимандра, с 6 в. до н.э. В 4 в. до н.э. Пифагор определенно считал, что Земля имеет форму шара, а Гераклит допускал вращение Земли вокруг своей оси. Первая оценка длины окружности Земли, как результат измерения высоты объектов при их удалении за горизонт на море, также была получена в древней Греции. Аристотель в своей книге «О небе» (4 в. до н.э.) приводит значение длины окружности Земли, которое примерно в два раза превышает правильное значение. Радиус Земли с точностью около 25% определил в 200 г. до н.э. Эратосфен. И уже в начале новой эры древнегреческий географ Стратон в своем обобщающем античный период 14-томном труде «География» утверждал, что вращение Земли приводит к экваториальному вздутию.

В 723 г. н. э. во время правления династии Тан китайский астроном *И-Синь* (683 – 727 гг.) возглавил отряд по измерению длины освещаемых Солнцем теней от предметов и высот Полярной звезды. В результате он получил, что протяженность одного градуса дуги составляет $L = 132,3$ км, что выше истинного приблизительно на 20%.

783-850 гг. - годы жизни выдающегося узбекского математика, астронома, географа, историка *Хорезми Мухаммеда Бен Муси*. Он стал основателем алгебры и системы записи чисел арабскими цифрами. Его имя в латинских переводах превратилось в термин «алгоритм». Среди его сохранившихся рукописей - таблицы движения Солнца и Луны, перечень астрономических координат 2402 пунктов на Земле, карта Нила, труды о солнечных часах, устройство астролябии, определение с ее помощью азимутов [Геодезия, 2008б, с. 392].

В 814 г. в период правления калифа аль-Мамуна арабы получили значение $L = 90$ км, что ниже истинного примерно на 20% [Буллен, 1978, с. 11-14].

973-1048 гг. – годы жизни выдающегося узбекского ученого-энциклопедиста *Бируни (Беруни) Абу Райхан*. Сохранились рукописи 31 труда Бируни, а существовало их более 170. Наибольшее число его работ посвящено астрономии и математике. Уцелел и ныне опубликован на нескольких языках его астрономо-геодезический трактат «Определение границ мест для уточнения расстояний между городами» («Геодезия»), в котором Бируни описал вопросы определения астрономических координат, измерения длины градуса земного меридиана, конструирования астролябий и квадрантов, сооружения земного глобуса [Геодезия, 2008а, с. 76].

Геодезия (от греч. geodaisia – деление земли, от geo – Земля и daizo – делю) – наука об определении фигуры, размеров, гравитационного поля Земли; об измерениях на земной поверхности для отображения ее на планах и картах и для решения различного рода хозяйственных задач, связанных с потребностями человеческой деятельности [Геодезия, 2008а, с. 142].

В 1424 г. в Самарканде с привлечением лучших мастеров и ученых правителем огромной империи и, как бы сейчас сказали, по совместительству выдающимся узбекским

астрономом и математиком *Улугбеком Мухаммедом Тарагай* (1394-1449) сооружается уникальная астрономическая обсерватория. Сохранилась часть мраморного лимба (дуга в 32^0) огромного угломерного инструмента (радиус лимба 40,04 м), что позволяло определять вертикальные углы с точностью до секунды [Геодезия, 2008б, с. 352].

В Средние века достижения древних, китайцев и арабов европейцами «открывались» заново. Лишь в 14 в. «непобедимый доктор» Оксфордского университета Уильям Оккам «посмел» считать вращение Земли возможным. Далее взгляды европейцев менялись достаточно «стремительно». Благодаря работам Н. Кузанского, Н. Коперника, Д. Бруно, Г. Галилея и И. Кеплера в 14 - начале 17 вв. гелиоцентрическая система окончательно утвердилась. (Подробный обзор древних и средневековых воззрений см. в главе 15).

В 1527 г. Френель в Париже подсчитал число оборотов колеса экипажа и получил результат, эквивалентный длине окружности Земли, равной 36500 км. Эта оценка уточнялась сначала Снеллиусом, а затем Норвудом. И, наконец, Пикар с использованием телескопа для измерения углов и из измерений звезды в созвездии Кассиопея пришел к выводу, что вблизи Парижа протяженность одного градуса дуги составляет $L = 111,2$ км. Полученное Пикаром значение с точностью 0,1% совпадает с современным значением L [Буллен, 1978, с. 13-14].

В 17 в. после двух тысяч лет летаргического сна Европы на смену гениальным догадкам древних пришли систематические исследования.

Дальнейшее развитие проблемы подробно описано в работах [Буллен, 1978; Ламб, 2003]. Согласно [Кондратьев, 2003] *теорию* фигуры Земли и других вращающихся гравитирующих тел кратко (более подробный обзор представлен в главе 12) можно разделить на следующие этапы.

Начальный ньютоновский этап: И. Ньютон понял, что с помощью закона всемирного тяготения можно исследовать не только движение небесных тел, но и саму их форму. Он поставил знаменитую *задачу о равновесной форме гравитирующей жидкой массы, имеющей вращение вокруг оси. Эта задача и положила начало теории фигур равновесия*. Ньютон первый и определил сжатие однородной Земли: $\varepsilon = \frac{5}{4}q = 229^{-1}$, где q

– отношение центробежной силы к притяжению на экваторе. Это был несомненный успех в познании Земли и других планет. Ньютоновские «Начала» побудили многих математиков к занятию задачами по фигурам равновесия: К. Маклорена (1742), Т. Симпсона и А. Клеро (1743) и других.

Этап Якоби. В результате работ А. Лежандра, П. Лапласа, С. Пуассона, Л. Эйлера, Ж. Лагранжа и других, подход к сформулированной И. Ньютоном проблеме фигур равновесия стал более абстрактным, что позволило сформулировать выводы более общего плана. Дело касалось самого принципиального момента теории: *обязаны ли фигуры равновесия иметь осевую симметрию или могут существовать и фигуры с нарушением ее?*

Новый толчок к развитию теории дал в 1834 г. математик К. Якоби, указавший на возможность существования однородной фигуры равновесия в форме трехосного эллипсоида – эллипсоиды Якоби. В 1884 г. А. Ляпунов и годом позднее А. Пуанкаре совершенно независимо друг от друга открывают целый класс новых фигур равновесия. Математически строгое доказательство существования неэллипсоидальных форм дано в начале XX века [Ляпунов, 2000].

Этап Дирихле. Математик П. Дирихле раздвинул сами границы проблемы. Поставленная П. Дирихле проблема такова.

Дана однородная несжимаемая масса гравитирующей жидкости. Допускают ли законы гидродинамики такое движение этой массы, чтобы ее форма в любой момент оставалась эллипсоидальной, а поле скоростей жидкости – линейным по координатам? Дирихле поставил задачу и получил уравнения движения такого эллипсоида.

Б. Риман впервые рассмотрел стационарные фигуры равновесия и открыл класс двухпараметрических равновесных эллипсоидов, у которых вектор угловой скорости Ω и вектор вихря внутренних течений ζ совпадают с одной из главных осей симметрии фигуры (S-эллипсоиды Римана). Класс S-эллипсоидов состоит из однопараметрических последовательностей фигур с определенным отношением $f = \zeta/\Omega$ (являющимся, как впоследствии будет показано С. Чандрасекхаром, своеобразным условием «квантования» получаемых решений).

По сути, задача Дирихле явилась дальнейшим на более высоком уровне развитием идеи Р. Декарта (1644) «о вихревых движениях, как основных движениях Материи, как системы Мира» [Тверитинова, Викулин, 2005].

Современный этап. Интерес к проблеме Дирихле был возрожден через сто лет работами по динамике звезд, выполненными С. Чандрасекхаром с сотрудниками в 60-х гг. прошлого века (Нобелевская совместно с совместно с У.А. Фаулером премия 1983 г.). Важным результатом такого рассмотрения, имеющим принципиальное значение, является возможность получения новых данных о физических свойствах сред, таких как вязкость, сжимаемость, напряженность магнитного поля и др.

Полученные в последнее время данные позволили Б.П. Кондратьеву и его сотрудникам модифицировать *классическую* задачу Дирихле идеальной жидкости и, тем самым, применить ее к движению *реальных* сред [Кондратьев, 2003]. Представляется, что вихревые решения модифицированной проблемы Дирихле будут в большей степени соответствовать движениям, наблюдаемым в реальных средах, включая и геофизическую среду, которая, как известно [Вихри, 2004; Ли Сы-гуан, 1958; Поплавский, Соловьев, 2000], содержит большое количество разномасштабных вихревых геологических структур и совершает вихревые геофизические движения.

Космические тела как гравитирующие жидкости. Задача о фигуре космических тел, в том числе и Земли, является, по сути, задачей об устойчивости их форм. Задача об устойчивости фигуры космического тела уже более чем полуторавековой истории в геофизику пришла из астрофизики: надо было понять, почему небесные тела имеют форму близкую шаровой, и в то же время, *никогда* не имеют строго шаровую форму. В этой связи убедительные результаты, полученные в конце 19 – начале 20 вв. независимо друг от друга А. Ляпуновым [2000] и А. Пуанкаре [2000] в теории фигур равновесия, по сути, указывают на то, что применение модели гравитирующей *жидкости* к космическим телам является достаточно обоснованным.

В частности, в рамках такого «гидродинамического» подхода становится вполне ожидаемым на поверхностях «твердотельных» планет Солнечной системы вихревые структуры тектонического происхождения [Вихри, 2004; Ротационные, 2007] и связанная с ними проблема образования таких структур, возможные пути решения которой обсуждаются во второй части книги.

История развития гравиметрии и теории фигуры Земли в России и предшествовавшие и сопутствовавшие ей важнейшие открытия

[Грушинский, 1976, с. 132-141; Шимберев, 1975, с. 5-10]

1537 г. - Герард Меркатор (1512-1594) издает карту мира в сердцевидной проекции. 1585, 1589 и 1595 гг. Г. Меркатор и его сын Румольд издают три части «Атласа» (Atlas sive Cosmographicae) - главного труда Меркатора [Геодезия, 2008а, с. 442].

1615 г. - голландским ученым В. Снеллиусом (1580-1626) был предложен метод триангуляции, позволивший существенно увеличить точность геодезических измерений [Грушинский, 1976, с. 18; Шимберев, 1975, с. 6].

1669-1670 гг. - Пикар, применив метод, разработанный В. Снеллиусом, определил длину дуги от Парижа до Амьена [Грушинский, 1976, с. 18].

Конец 17 в. - исходя из предположения, что первоначально наша планета находилась в жидком состоянии, *И. Ньютон* (1643-1727) теоретически доказал, что Земля должна иметь форму эллипсоида вращения, сжатого от полюсов к экватору. Ньютон рассматривал Землю как однородное тело, все частицы которой имеют одну и ту же плотность. Для величины сжатия Земли им было получено выражение $\varepsilon = \frac{5}{4}q$, где q – отношение центробежной силы на экваторе к силе тяжести на экваторе. Принимая $q = 1/289$, Ньютон получил сжатие $\varepsilon = 1/231$.

Х. Гюйгенс (1629-1695), решая ту же задачу, исходил из предположения, что Земля – неоднородна, причем довел эту неоднородность до крайности, полагая, что вся масса Земли сконцентрирована в одной точке – центре, а остальные ее части имеют плотность, равную нулю. В таком случае получается соотношение существенно иное, чем у Ньютона, а именно оказывается, что сжатие будет равно $\varepsilon = \frac{1}{2}q$. Принимая $q = 1/288$, Гюйгенс получил сжатие для Земли $\varepsilon = 1/576$.

Исследования Ньютона и Гюйгенса убеждают нас, что величина сжатия должна зависеть от закона изменения плотности с глубиной.

1696 г. - выход в свет законодательного Акта России «О снятии чертежа Сибири на холсте с показанием в оном городов, селений, народов и расстояний между урочищами».

1699 г. - *С.У. Ремизовым* (1642-1720) создается огромное (217x277 см) картографическое произведение «Чертеж всех сибирских градов и земель», ныне находится в постоянной экспозиции Государственного Эрмитажа.

1701 г. - 1 января – дата, стоящая на первом титульном листе Атласа России *Ремизова* [Геодезия, 2008б, с. 195].

1701 г. - в январе учреждена Московская математико-навигационная школа с целью подготовки специалистов по двум направлениям – офицеров военно-морского флота и геодезистов для производства государственного топографического картографирования. Среди первых четырех ее преподавателей – *Леонтий Филаретович Магницкий* (1669-1739), автор известной «Арифметики».

1715 г. - на основе школы в Петербурге создана Морская академия, часть выпускников которой в XVIII в. также поступала в распоряжение Сената для производства картографо-геодезических работ. *Кирилов И.К.* (1669-1737) - первый руководитель сенатских геодезистов [Геодезия, 2008а, с. 342, 466].

1718 г. - *Ж. Кассини* проведено градусное определение под Парижем [Грушинский, 1976, с. 19].

1727-1741, 1766-1783 гг. – годы работы выдающегося математика *Л. Эйлера* в Петербургской академии наук. Среди громадного количества его работ (756!!!) имеется немало работ по геодезии и картографии – «О внешнем виде Земли», «О географической проекции поверхности шара» и др. Эйлер активно участвовал в создании академического Атласа России [Геодезия, 2008б, с. 426].

1735-1742 гг. - *французской Академией наук* были выполнены градусные измерения под различными широтами с целью определения фигуры Земли.

1735-1742 гг. - экспедиция в экваториальной области Перу в составе *Буге, Годена и Лакондамина*. Эти данные совместно с данными *Ж. Кассини* дали $\varepsilon = 1/314$.

1736-1737 гг. - Лапландская экспедиция в составе *А.Клеро* (1713-1765), *П.Л.М. Мопертюи* (1698-1759), *Камюза* и *А. Цельсия* (1701-1744). Эти данные совместно с данными *Ж. Кассини* дали $\varepsilon = 1/214$.

Данные этих экспедиций убедительно доказали, что фигура Земли представляет собой сплюснутый сфероид с полярной осью, примерно на 20 км меньше экваториальной оси [Грушинский, 1976, с.19].

1743 г. - *А. Клеро* (1713-1765), основоположник гравиметрии, продолжая идеи *И. Ньютона*, показал, что величины сжатия, полученные Ньютоном и Гюйгенсом, являются

двумя пределами, между которыми должно заключаться действительное сжатие реальной планеты, если только она имеет форму эллипсоида вращения. Близость действительного сжатия тому или другому пределу дает указание на степень неоднородности планеты. Клеро, решая задачу определения фигуры равновесия медленно вращающейся неоднородной массы, исходил из следующих предпосылок. Он считал, что Земля состоит из бесконечного числа эллипсоидальных однородных слоев, имеющих общий центр и общую ось вращения. Плотности и сжатие этих слоев являются функцией расстояния от центра. Никаких предположений не делается относительно того, твердые ли эти слои или жидкие, поэтому каждый отдельный слой может и не находиться в состоянии равновесия. Условие равновесия должно быть соблюдено только для внешней поверхности, во всех точках которой действующая сила должна быть направлена по нормали. Для соблюдения этого условия достаточно, если лишь один наружный слой будет жидким.

Анализ позволил Клеро сделать общее заключение: если плотность слоев возрастает от поверхности к центру, то сжатие соответствующих эллипсоидальных слоев по направлению к центру должно уменьшаться.

Клеро получил выражение для силы тяжести на внешней поверхности планеты и вывел теорему, носящую его имя, позволяющую определить сжатие Земли: $\varepsilon = \frac{5}{2}q$.

Принципиальная важность теоремы Клеро, как заметил Д. Стокс, состоит в том, что она имеет место в силу самих условий равновесия неоднородной планеты и не зависит от условий ее внутреннего строения. Разумеется, нужно предположить, что внутренние слои Земли весьма близки к сферам, - иначе весь вывод этой теоремы не имел бы места. Следует также отметить, что теорема Клеро точна только до первой степени сжатия ε .

Теория фигуры Земли, созданная А. Клеро [Клеро, 1947], вызвала интерес к проблеме определения силы тяжести с помощью маятника, так его период T определяется его длиной l и ускорением силы тяжести g : $T = 2\pi\sqrt{l/g}$.

Основные исследования А. Клеро посвящены вопросам теории движения Луны, Земли, теории ее фигуры [Геодезия, 2008а, с. 348].

1745 г. - под руководством *И.Н. Делиля* (1688-1768), известного французского картографа, создается главный труд Академии «Атлас Российской империи» (Геодезия, 2008а, с. 196).

Середина XVIII в. - *М.В. Ломоносов* (1711-1765) уделял большое внимание вопросам тяготения. Он говорил: «Тяжесть покоящегося тела есть не что иное, как задержанное движение. ... А так как стремление тяжелого тела к центру Земли есть не что иное, как тяжесть, равно как и приращение движения тяжелого тела, устремляющегося к центру Земли, то нет никакого сомнения, что они происходят от одной и той же причины. Следовательно, достаточное основание тяжести состоит в движении некоего тела, непрерывно толкающего тяжелые тела к центру Земли».

Интересуясь проблемой тяготения, Ломоносов указал и некоторые пути измерения силы тяжести. Он предложил так называемый «универсальный барометр», по существу, газовый гравиметр. Идея такого гравиметра возродилась через 180 лет и была воплощена в гравиметре Г. Галька в тридцатых годах XX в.

1779 г. - 14 (25) мая в Москве открывается землемерная школа.

1835 г. - землемерная школа преобразуется в Константиновский межевой институт,

1918 г. - в Московский межевой институт (ММИ),

1930 г. - в Московский геодезический институт (МГИ) и в Московский институт землеустройства (МИЗ), который в

1945 г. получил название Московского института инженеров землеустройства (МИИЗ), а в

1992 г. получил статус Государственного университета по землеустройству [Геодезия, 2008а, с. 180].

Начало XIX в. - французские ученые начали попытки применения нитяного маятника.

1818 г. - английский физик *Кетер* сконструировал оборотный маятник, основанный на том, что всякое физическое тело имеет два взаимных центра качания, таких, что периоды колебания около этих центров одинаковы. Тогда возможно измерить расстояние l между этими центрами, которое играет роль длины в идеальном маятнике, и, определив период, вычислить ускорение силы тяжести g . Маятниками Кетера было определено значение силы тяжести в довольно большом количестве пунктов в разных частях Земли.

1826-1829 гг. - *Ф.П. Литке* (1797-1882) во время кругосветного плавания произвел измерения во многих частях Земли. Обработав эти данные совместно с данными англичан, он получил величину сжатия Земли равной $\varepsilon = 1/288$.

1829 г. - профессор Дерптского университета *И.Ф. Паррот* (1791-1841) провел ряд маятниковых измерений силы тяжести в Прибалтике и на Кавказе и получил $\varepsilon = 1/279,3$.

1830-е гг. - *В.Я. Струве* (1793-1864) обратил внимание тогдашнего директора Московской обсерватории *Б.Я. Швейцера* (1816-1873) на значительные расхождения полученных под Москвой координат, полученных из обработки триангуляцией, с астрономическими.

Начало 60-х гг. XIX в. - выходит в свет монография *Б.Я. Швейцера* «Исследование местной аттракции, существующей около Москвы», в которой на основании обобщения результатов 30-ти летних наблюдений приводится карта уклонений отвесных линий под Москвой. Швейцер попытался объяснить эти аномалии наличием масс меньшей плотности.

1862-1863 гг. - *Ф.А. Слудский* (1841-1897) и Троицкий определили отклонение отвеса еще в 152 точках, после чего уже имелись данные приблизительно для 250 точек.

1863 г. - *Ф. Слудским* было предпринято более подробное теоретическое исследование этого вопроса. Так появилось первое в России исследование уклонения отвесных линий и первые указания на геофизический смысл аномалий силы тяжести и на метод разведочной гравиметрии, получивший в наши дни широкое применение.

1849 г. - профессор астрономии Петербургского университета *А.Н. Савич* (1810-1883) поставил перед Русским географическим обществом вопрос об организации наблюдений силы тяжести на территории России. В качестве первой части программы он предложил выполнить маятниковые определения вдоль ряда Русско-Скандинавского градусного измерения, идущего от Торнео в Финляндии до Измаила на Дунае и к этому времени уже заканчиваемого.

Д.Г. Стокс (1819-1903) опубликовал две работы, посвященные гравитационному полю Земли. В первой работе доказывается, что изменение силы тяжести на земной поверхности и зависимость его от сжатия эллипсоида не обязательно связывать с гипотезой о гидростатическом равновесии Земли, как это в 1743 г. сделал А. Клеро. Это положение известно как теорема Стокса, в которой утверждается, что потенциал и его первые производные во внешнем пространстве могут быть определены, если известно: общая масса планеты, ее угловая скорость вращения и уровенная поверхность силы тяжести, внутри которой заключены все притягивающиеся массы. Решение теоремы Стокса известно только для наиболее простых фигур, какими являются эллипсоид вращения и трехосный эллипсоид.

Во второй работе *Д.Г. Стокс* поставил и решил принципиально новую неизвестную в теории потенциала задачу об определении формы поверхности и внешнего потенциала силы тяжести – задача Стокса, которая является обратной первой. Геоид не удовлетворяет условиям задачи Стокса, поскольку геоид не является внешней, относительно притягивающих масс, уровенной поверхностью. Над поверхностью геоида возвышаются значительные массы материков и островов. Кроме того, сила тяжести на поверхности геоида неизвестна, она может быть получена из измерений только на поверхности Земли.

Сам Стокс полагал, что после введения в измеренное значение силы тяжести небольших поправок (редукций) поверхность геоида может быть определена по выведенной им формуле. Однако все попытки потерпели неудачу. Оказалось, что без знания закона распределения плотностей внутри земной коры задача определения фигуры геоида решена быть не может [Бровар, Магницкий, Шимберев, 1961, с. 56-58].

1852 г. - швейцарским гражданином *Ф.Б. Швабе* (1814-1880) в Москве, на Кузнецком Мосту, открывается небольшой магазин с продажей очков и других мелких оптических принадлежностей. При магазине затем была открыта мастерская для сборки приборов, на которые ставили клеймо «Ф. Швабе». Эта фирма является одной из крупнейших фирм России середины XIX в. по продаже и производству геодезических, оптических, физических и медицинских приборов и инструментов [Геодезия, 2008б, с. 416].

1854, 1855 гг. - независимо друг от друга была предложена теория изостазии английскими геодезистом Праттом и астрономом Эри [Стейси, 1972, с. 68].

1865 г. - *А.Н. Савич* и профессор Р.Э. Ленц (сын ректора Петербургского университета Э.Х. Ленца (1804-1865)), получив новый прибор с оборотным маятником фирмы Репсольд, приступили к работе. В результате трехлетних измерений для северной части дуги А.Н. Савич получил сжатие $\varepsilon = 1/296$, однако по всей дуге результат оказался более далеким от истины: $\varepsilon = 1/309$.

1873 г. - немецкий физик *Листинг* вводит термин геоид [Грушинский, 1976, с. 22].

Геоид – условная фигура Земли, образованная уровенной поверхностью Мирового океана в спокойном состоянии, продолженной под материками, в каждой точке которой касательная к ней перпендикулярна к отвесной линии - направлению силы тяжести. Однако, неопределенность поверхности геоида в районах суши, при более строгой постановке задачи, заставила специалистов перейти к понятию *квазигеоида* [Геодезия, 2008а, с. 143; Геодезия, 2008б, с. 370].

1876 г. - директор Пулковской обсерватории *О.В. Струве* (1819-1905) попросил военных топографов произвести наблюдения силы тяжести на Кавказе.

1884 г. - Русское географическое общество включило маятниковые наблюдения в план своих постоянных исследований, и была образована Комиссия по изучению силы тяжести на территории России под председательством *И.И. Стребницкого*.

1888 г. - на Московской обсерватории начал работать *П.К. Штернберг* (1865-1920), который поставил маятниковые определения силы тяжести.

Ф.А. Слудский опубликовал свою работу «Общая теория фигуры Земли». За фигуру Земли Слудский принимает уровенную поверхность, совпадающую с поверхностью океанов и продолженную на область континентов при их мысленном выравнивании. Он получил сжатие эллипсоида $\varepsilon = 1/292,7$, а для трехосного эллипсоида $\varepsilon = 1/297,1$.

1888-1889 г. - *П.К. Штернберг* совместно с *Ф.А. Бредихиным* (1831-1904) провели определения силы тяжести на Московской обсерватории с оборотным маятником Репсольда.

1916-1917 гг. - *П.К. Штернберг* провел гравиметрические наблюдения под Москвой с маятниковым прибором Штюкрата с целью сопоставить гравиметрические данные с отклонениями отвесных линий.

1926 г. - *И.А. Казанским* обработаны все результаты по исследованию Московской аттракции.

1892 г. - *С.Е. Дамтон* (*C.E. Dutton*) предложил термин «изостазия» для объяснения тенденции земной коры достижения гидростатического равновесия [Гутенберг, 1963, с. 68].

Е. Зюсс (*E. Suess*, 1831-1914) отметил существование двух основных типов океанических областей: тип «Атлантической структуры» (включая Индийский океан) с берегами, которые пересекаются в различных направлениях горными хребтами, и тип

«Тихоокеанской структуры», где горные цепи идут параллельно берегам [Гутенберг, 1963, с. 80].

1894 г. - *Р. Штернек*, австрийский геодезист и изобретатель маятникового прибора для относительных измерений силы тяжести, осуществил связь Пулкова с Веной – в то время основным пунктом маятниковых работ.

1896 г. - астрономическая обсерватория Казанского университета под руководством профессора *Д.И. Дубяго* и доцента *Д.И. Баранова* с прибором Штернека начала систематические гравиметрические измерения, которые проводились вплоть до первой мировой войны.

Конец XIX – начало XX вв. - петербургский астроном *А.А. Иванов* (1867-1939) построил разложение в ряд земного потенциала силы тяжести и, используя 367 маятниковых наблюдений, вывел сжатие Земли, которое получилось равным $\varepsilon = 1/297,2$. Ивановым была высказана мысль о несимметрии северного и южного полушарий.

1911 г. - *А. Ляв* доказал возможность существования поверхностных сдвиговых волн в слое – волн Лява [Гутенберг, 1963, с. 62].

1928 г. - создается Государственный институт геодезии и картографии (ГИГК), выдающийся ученый, геодезист, картограф, педагог *Ф.Н. Красовский* (1878-1948) его первый директор [Геодезия, 2008а, с. 389].

1932 г. - выход в свет подготовленного *И.А. Казанским* и *Ф.Н. Красовским* решения Совета Труда и Оборона о сплошной маятниковой гравиметрической съемке всей территории СССР, которое в течение десятилетия было почти полностью осуществлено.

1934-1936 гг. - *Ф.А. Красовский* предложил при обработке триангуляции Советского Союза использовать метод проектирования – после редуцирования измеренных элементов на геоид производить второе редуцирование с геоида на эллипсоид. В этом методе геоид, как поверхность относимости для триангуляции, исключался, но вносил неизбежные погрешности из-за несовершенства каждого из этапов редуцирования [Бровар, Магницкий, Шимберев, 1961, с. 58; Грушинский, 1976, с. 23].

1936 г. - *И.А. Казанский* указал на принципиальную возможность использования гравиметрической съемки при астрономическом нивелировании. Цепь специальных работ по геодезической гравиметрии, начатая Швейцером и Слудским, Штернбергом, Казанским и Михайловым, получила блестящее продолжение в фундаментальных работах *М.С. Молоденского* (1909-1991).

1936 г. - *Ф.А. Красовским* на основе накопленного обширного материала высокоточных полевых измерений определены предварительные размеры нового земного эллипсоида.

1940 г. - при участии ученика *Ф.А. Красовского* *А.А. Изотова* (1907-1988), в последствии видного ученого, были выведены окончательные размеры принятого в СССР и законодательно утвержденные в 1946 г. эллипсоида, получившего название «эллипсоид Красовского»

1942-1946 гг. - в СССР Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. N 760 введена единая система геодезических координат и высот СК-42, основанная на референц-эллипсоиде Красовского с параметрами: большая полуось равна 6378245 м и сжатием 1/298,3. Высота геоида в Пулкове над референц-эллипсоидом равна нулю. Распространение координат 1942 г. на территории СССР проводилось последовательно несколькими крупными блоками полигонов триангуляции и полигонометрии 1 класса.

Схема географического размещения государственных геодезических сетей разработана *А.И. Дурневым* (1904-1963) под руководством Красовского [Геодезия, 2008а, с. 170, 219, 266, 389].

1945 г. - *М.С. Молоденский* (1909-1991) сделал после Стокса следующий важный шаг - он предложил не связывать задачи геодезии и теории фигуры Земли с проблемой определения фигуры геоида. Задача геодезии по предложению *М.С. Молоденского*

должна заключаться в определении физической поверхности Земли, и внешнего гравитационного поля. М.С. Молоденский высказал мысль о том, что триангуляцию нужно редуцировать сразу на эллипсоид, минуя сложный и неизвестный геоид. Геоид в этом случае не определяется, но его и не нужно определять. Задача геодезии состоит в определении земной поверхности и внешнего гравитационного поля. Эту задачу геодезия может и должна решать на основании лишь проведенных измерений, без привлечения каких-либо гипотез о внутреннем строении Земли. В теории М.С. Молоденского за фигуру сравнения (относимости), относительно которой определяется фигура реальной Земли, принимается урванный эллипсоид, потенциал которого находится в результате решения задачи Стокса – *квазигеоид*.

Квазигеоид на поверхности океана совпадает с геоидом. На материках квазигеоид будет тем больше отступать от геоида, чем больше аномалии силы тяжести и чем сложнее рельеф местности. На материках квазигеоид может быть принят за приближенное выражение для геоида [Грушинский, 1976, с. 329].

С этой новой современной точки зрения проблема редуцирования измеренных величин на геоид потеряла для геодезии свое значение [Бровар, Магницкий, Шимьерев, 1961, с. 58; Бровар, Юркина, 2001].

М.С. Молоденский - автор первой отечественной «Инструкции по гравиметрическим работам для общей основной гравиметрической (маятниковой) съемки СССР» (1935) и автор первого отечественного гравиметра ГМК – гравиметр кольцевой Молоденского [Геодезия, 2008а, с. 461].

1960 г. - выход в свет основополагающего руководства *М.С. Молоденского, В.Ф. Еромеева и М.П. Юркиной* [1960] «Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли», на основе которого развивается современная геодезия [Бровар, Юркина, 2001].

1963 г. - выход в свет первого издания фундаментального труда *Н.П. Грушинского* (1915-2001) «Теория фигуры Земли», в котором автор развил современную концепцию физической геодезии [Геодезия, 2008а, с. 189-190; Грушинский, 1976].

О фигуре реальной Земли

Вопрос о фигуре Земли имеет принципиальное значение. «Если для планеты заданы ее фигура, распределение масс и параметры движения, то можно определить ускорение силы тяжести на любой эквипотенциальной поверхности этой планеты» [Гутенберг, 1963, с. 26].

Традиционно для Физики Земли и Геофизики проблема фигуры Земли рассматривалась в рамках описанного выше ньютоновского подхода с ориентацией на получаемые экспериментальные данные [Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971; Магницкий, 1965, 2006; Орленок, 2000; Стейси, 1971; Теркот, Шуберт, 1985; Трухин, Показеев, Куницын, 2005].

Но есть и другие работы. Так, в работе [Гутенберг, 1963, с. 23-25] реальная фигура поверхности Земли сравнивается со всевозможными приближенными достаточно гладкими фигурами (шар, эллипсоид вращения, трехосный эллипсоид) и отмечается, что эквипотенциальные поверхности в виде *геоидов*, близких к среднему уровню моря, имеют *наиболее малые* отклонения от истинной поверхности Земли. В работе [Хаин, Короновский, 2007, с. 216-224] в качестве причин, влияющих на изменение фигуры Земли, отмечаются ротационные и космические факторы, а также блоковое строение планеты. Во второй части книги мы коснемся вопроса, как эти факторы могут учитываться в рамках вихревой геодинамики.

Сложность и противоречивость проблемы отмечал и патриарх советской геодезии и геофизики М.С. Молоденский [2001, с. 96]: «Ни один из вопросов теоретической и прикладной гравиметрии не привлекал к себе такого внимания, как вопрос о редукции

силы тяжести к уровню моря. Этому вопросу посвящены сотни работ, трактующих его с различных точек зрения. К способу редуцирования силы тяжести геодезисты, геологи и геофизики предъявляют *различные* требования, вытекающие из особенностей решаемых ими задач. В связи с этим предложено значительное число методов редуцирования, каждый из которых обладает известными *преимуществами и недостатками*, более или менее существенными в условиях той или иной конкретной задачи. При оценке этих методов приходится принимать во внимание целый ряд обстоятельств, начиная с соображений теоретического порядка и кончая чисто практическими мотивами, связанными, например, с современной точностью определения гравиметрических пунктов, их распределением, с объемом вычислительных работ и пр. Мы не имеем возможности осветить этот вопрос всесторонне...» (курсив – А.В.). Поэтому в дальнейшем при изложении материала этой главы будем иметь в виду исключительно ту сторону проблемы, которая связана только с задачей изучения формы Земли и ее размеров.

Понятие об истинной фигуре Земли – геоиде и его геометрическое представление [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 13-18; Стейси, 1972; с. 30-34]

Под формой Земли естественно понимать форму физической поверхности твердой части планеты. Однако в силу большой сложности этой твердой поверхности из нее давно стали выделять более простую (более гладкую часть), в качестве которой принимают невозмущенную приливами, ветрами и т.д. поверхность океана, продолженную некоторым образом под континенты. Для такого приближения имеются достаточно веские основания, так как на долю поверхности океана приходится большая (3/4) часть поверхности всей планеты. От этой поверхности "уровня моря" и ведется отсчет высот при изучении формы реальной поверхности Земли или ее рельефа.

Вращение Земли создает центробежные силы, которые приводят к образованию экваториального вздутия, из-за которого форма Земли существенно отличается от сферической (рис. 2.1).

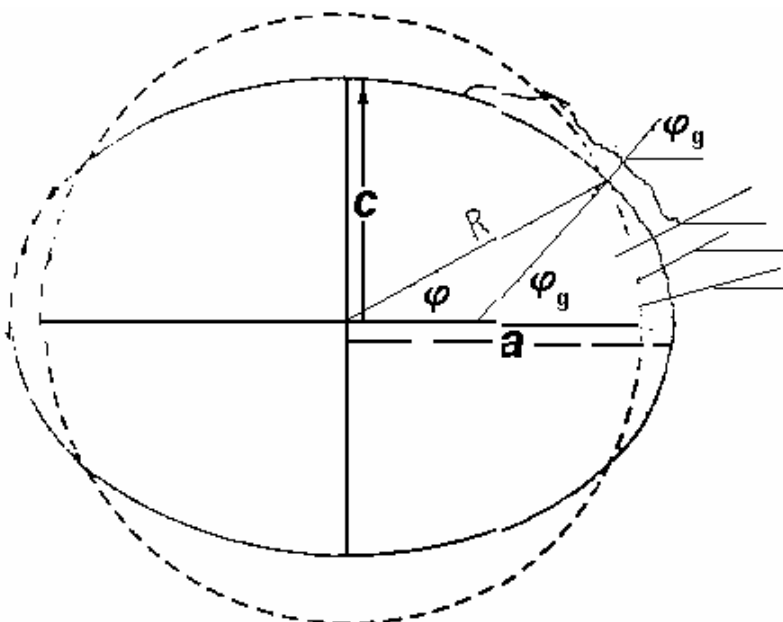


Рис. 2.1. Сравнение геоида (сплошная линия) с шаром того же объема (пунктирная линия). Сжатие геоида преувеличено примерно в 50 раз. Радиус шара $R=(a^2c)^{1/3}$, где a и c – большая (экваториальная) и малая (полярная) полуоси. Координата φ – географическая широта точки; φ_g – угол между нормалью к поверхности геоида в точке наблюдения и экваториальной плоскостью.

Если бы весь земной шар был покрыт морем, то форма поверхности (без учета несущественных возмущений, вызванных ветром, приливами и т.д.) полностью определялась бы гидростатическим равновесием воды под действием силы тяжести и сил, возникающих из-за вращения Земли.

Получающаяся соответствующая невозмущенному уровню моря эквипотенциальная поверхность - поверхность, вдоль которой гравитационный потенциал остается постоянным, называется **геоидом**, который и определяет фигуру Земли.

Под материками поверхность геоида криволинейна, т.е. проекция его поверхности по любому азимуту переменная кривая.

Геоид не является правильной геометрической фигурой, за поверхность геоида принимается некая поверхность, которая перпендикулярна к линии отвеса во всех точках.

Чтобы понять геометрический смысл понятия геоида для суши, нужно представить себе достаточно узкие каналы, прорытые через материки и соединенные с океанами. Уровень воды в таких каналах примерно соответствовал бы поверхности геоида.

Фигура Земли – обобщенная форма поверхности Земли, обычно совпадающая с уровенной поверхностью потенциала силы тяжести. Фигуру Земли традиционно определяют фигурой геоида, однако неопределенность его поверхности в районах суши, при более строгой постановке задачи, заставила специалистов перейти к понятию квазигеоида [Геодезия, 2008б, с. 370].

Форма геоида была установлена астрономо-геодезической съемкой, проведенной по нескольким дугам на материках. В каждом пункте наблюдения определяется вертикаль, или направление локального вектора силы тяжести относительно звезд. По результатам съемок, произведенных с 1900 по 1960 гг., и по результатам спутниковых наблюдений были определены следующие параметры геоида: экваториальный радиус $a = 6378245$ м, полярный радиус $c = 6356863$ м, средний радиус (радиус равновеликого шара) $R_0 = \sqrt[3]{a^2 c} = 6371032$ м, площадь поверхности Земли $5,1 \cdot 10^8$ км (из них на долю суши приходится 29,2%, на долю океана 70,8%), ее объем $\frac{4}{3} \pi a^2 c = 1,1 \cdot 10^{12}$ км³, масса $M = 6 \cdot 10^{27}$

г и средняя плотность $\rho_0 = \frac{3M}{4\pi a^2 c} = 5,5$ г/см³.

Разность между экваториальным a и полярным c радиусами составляет малую величину $a - c = 21,4$ км, что и определяет *сжатие геоида*, равное [Таблицы, 1976, с. 991-992; Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 15]:

$$\varepsilon = \frac{a - c}{a} = \frac{1}{298,255} = 0,00335. \quad (2.1)$$

Как видим, поверхность реальной Земли отклоняется от сферы на небольшую величину, примерно равную 1/300.

На средний геоид накладываются приливные эффекты, вызванные градиентами гравитационных полей Луны и Солнца. Но эти эффекты очень малы по сравнению со сжатием Земли, вызываемые ее вращением. Детали рельефа земной коры (материки, горные хребты) создают заметное отклонение реальной земной поверхности от геоида. Однако компенсация масс на некоторой глубине (принцип изостазии) ослабляет влияние рельефа земной поверхности на форму геоида.

Геофизическое обоснование геоида. Сфероид Клеро

[Магницкий, 1965, с. 200-206; 2006, с. 209-215; Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 16-18]

Для определения физического смысла геоида введем в рассмотрение потенциал силы тяжести W , который складывается из потенциалов гравитационного притяжения V и центробежных сил U :

$$W = V + U = V - \frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2) = V - \frac{1}{2}\omega^2 r^2 \cos^2 \varphi, \quad (2.2)$$

где ω - угловая скорость вращения Земли. Ось z направлена по оси вращения Земли, а x , y или r , φ (широта) - координаты точек на земной поверхности. В точках внутри Земли полный потенциал содержит еще один член, зависящий от давления. На поверхности ускорение силы тяжести, по определению направлено по нормали к геоиду. Таким образом, задача вычисления формы геоида сводится к получению выражения для потенциала V .

Выражение для V получается из закона всемирного тяготения Ньютона, согласно которому сила притяжения F единичной массы $m_1 = 1$ элементом массы dm на расстоянии между их центрами тяжести r равно:

$$F = G \frac{m_1 dm}{r^2} = G \frac{dm}{r^2}, \quad (2.3)$$

где $G = 6,666 \cdot 10^{-8} \text{ } \text{с}^2 \text{см}^3 \text{г}^{-1}$ – постоянная тяготения. Тогда потенциал притяжения Земли в точке вне ее, на расстоянии r от ее центра будет равен:

$$V = G \int \frac{dm}{r}, \quad (2.4)$$

где интегрирование проводится по всему объему Земли.

Если бы Земля была точной сферой радиуса R_0 со сферически-симметричным распределением плотности, то гравитационный потенциал на ее поверхности был бы в точности равен:

$$V = \frac{GM}{R_0}, \quad (2.5)$$

где M – масса планеты.

Как видно из соотношения (2.1), реальная Земля всего на 1/300 отклоняется от сферы, поэтому в первом приближении к основной части потенциала (2.5) достаточно добавить следующий поправочный член в выражении для V через сферические функции - полиномы Лежандра. Так как в системе координат связанной с центром Земли и с осями, направленными вдоль главных моментов инерции, первый полином Лежандра $P_1 = 0$, то добавление второго члена разложения, содержащего второй полином Лежандра P_2 , приводит к выражению:

$$V = \frac{GM}{r} \left[1 - \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 I_2 P_2(\cos \Theta) \right], \quad (2.6)$$

где $P_2(\cos \Theta) = \frac{2}{3} \cos^2 \Theta - \frac{1}{2}$ - второй полином Лежандра, $\Theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$,

$$I_2 = \frac{C - A}{MR_0^2} \approx 0,0012 \sim \varepsilon, \quad (2.7)$$

A и C – моменты инерции Земли относительно осей, проходящих через экватор и полюс соответственно.

Окончательно, в первом приближении, с учетом первого ненулевого члена в разложении потенциала по сферическим функциям, выражение для геопотенциала получаем в виде:

$$W = \left\{ \frac{GM}{r} \left[1 - I_2 \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \left(\frac{2}{3} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \varphi \right\}. \quad (2.8)$$

Как видно из соотношения (2.7), величина I_2 является малой, порядка величины сжатия Земли. Следовательно, в каждой точке поверхности Земли значения разностей между радиусами «приближенного» геоида r и сферы R_0 также должны быть небольшими. Поэтому тело, создающее потенциал (2.8), стало называться *сфероидом Клеро* или просто *сфероидом*.

Выражение для коэффициента I_2 (2.7) и геопотенциала (2.8) в том же приближении и с той же точностью, очевидно, может быть переписано в следующем виде, в котором они, как правило, и используются:

$$I_2 = \frac{C - A}{Ma^2} \sim \varepsilon, \quad (2.7.1)$$

$$W = \left\{ \frac{GM}{r} \left[1 - I_2 \left(\frac{a}{r} \right)^2 \left(\frac{2}{3} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \varphi \right\}. \quad (2.8.1)$$

В полученной формуле (2.8.1), полагая значение геопотенциала равным ускорению силы тяжести на экваторе, и решая полученное уравнение относительно радиуса, удерживая лишь малые первого порядка, получаем в явном виде уравнение для сфероида Клеро [Магницкий, 1965, с. 200-202; Бровар, Магницкий, Шимберев, 1961, с. 71-72]:

$$r = a(1 - \alpha_0 \sin^2 \varphi), \quad (2.9)$$

$$\text{где } \alpha_0 = \frac{3}{2} \frac{C - A}{Ma^2} + \frac{1}{2} \frac{\omega^2 a^3}{GM} \sim \varepsilon.$$

При учете малых следующего порядка получаем уравнение для сфероида Дарвина-Де Ситтера [Жарков, Трубицын, 1980, с. 283-284, 300-301]:

$$r(\varphi) = a \left[1 - \alpha_0 \sin^2 \varphi + \left(\frac{5}{8} \alpha_0^2 - k \right) \sin^2 2\varphi \right],$$

где поправочный параметр k , характеризующий отличие уровенных поверхностей от точного эллипсоида вращения, является малой величиной.

Фигура и распределение массы внутри Земли

[Трухин, Показеев, Куницын, 2004, с. 17-18; Магницкий, 1965, с. 200-2002; 2006, с. 209-211]

Для проблемы внутреннего строения Земли большое значение имеет величина среднего момента инерции

$$I = \frac{C + 2A}{3}, \quad (2.10)$$

которая с учетом величин средней плотности $\rho_0 = \frac{3M}{4\pi a^2 c}$ и данных сейсмологии о строении Земли позволяет получить распределение плотности в недрах планеты (глава 5).

В случае постоянной плотности планеты ее безразмерный момент инерции I^* равен

$$I_0^* = \frac{I}{MR_0^2} = 0,4. \quad (2.11)$$

Если с глубиной плотность увеличивается, то $I^* < I_0^*$, если уменьшается, то $I^* > I_0^*$. Значение I^* для Земли равно:

$$I^* = 0,3315, \quad (2.12)$$

что указывает на существенное увеличение плотности в недрах Земли с глубиной.

Впрочем, имеется и другая точка зрения на связь параметра I^* со строением Земли. Так Дж.Ф. Эверден [1997] полагает, что Земля негидростатична и, как следствие, значение параметра I^* ничего не говорит о распределении плотности внутри Земли. Однако В.В. Кузнецов [2008, с. 219-221] полагает, что выводы Эвердена слишком категоричны, они противоречат геофизическим результатам, а сам парадокс Эвердена может быть разрешен в рамках модели горячей Земли (см. главы 1 – «Модель горячей Земли», и 12 – «Форма Земли и геодинамика»).

Ускорение силы тяжести g находится из выражения:

$$g = -gradW. \quad (2.13)$$

Выражения для его азимутальной $g_\varphi = \frac{\partial W}{r\partial\varphi}$ и радиальной $g_r = -\frac{\partial W}{\partial r}$ составляющих приводят к соотношению:

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{r\partial\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial r}\right)^2}, \quad (2.14)$$

из которого на основании (2.8), (2.8.1) и (2.14) можно установить связь между g и сжатием Земли ε :

$$g = g_a \left[1 + \left(\frac{5\omega^2 a^3}{2GM} - \varepsilon \right) \sin^2 \varphi \right], \quad (2.15)$$

где

$$g_a = \frac{GM}{a^2} \left(1 + \frac{3}{2} I_2 \frac{\omega^2 a^3}{GM} \right). \quad (2.16)$$

Уравнение (2.15) впервые было получено А. Клеро в 1743 г. (теорема Клеро о силе тяжести [Буллен, 1978, с. 56-57; Грушинский, 1976, с. 198]), его можно переписать более просто:

$$g = g_a (1 + \beta \sin^2 \varphi), \quad (2.17)$$

где $\beta = \frac{5}{2} q - \varepsilon$, $q = \frac{\omega^2 a^3}{GM}$.

Таким образом, сила тяжести в любой точке земного шара обусловлена:

- притяжением всего земного сфероида (первое слагаемое в (2.16)) и центробежной силой (второе слагаемое в (2.17)),
- влиянием рельефа местности, определяемой зависимостью величины угловой скорости вращения от высоты точки на поверхности,
- неравномерным распределением масс, в основном, в земной коре, величина которого определяется значением коэффициента I_2 (второе слагаемое в (2.16)).

Референц-эллипсоид. Эллипсоид Красовского. Международный эллипсоид [Грушинский, 1976, с. 102-104]

Определение. Эллипсоид, принятый для обработки триангуляций, на который относятся или редуцируются все геодезические измерения, называется *референц-эллипсоидом* или *эллипсоидом относимости* [Грушинский, 1976, с. 22-23].

Выполнение геодезических работ на территориях больших стран с соблюдением точностей, достижимых современными техническими средствами и предписываемых практическими потребностями, требует установления специального, наилучшим образом отвечающего рассматриваемой области эллипсоида относимости.

Для унификации геодезических измерений на всей Земле удобно построить общий земной эллипсоид, т.е. такой эллипсоид, при котором условие минимума отклонения квадратов высот геоида выполняется для всей Земли в целом. Такой эллипсоид лучше всего представляет реальную Землю. Однако для построения такого эллипсоида требуется выполнять геодезические наблюдения на всей Земле, т.е. надо иметь однородную геодезическую сеть. В рамках классической геодезии это практически невозможно, т.к. нельзя проводить геодезические измерения в океанах. Кроме того, следует иметь в виду, что такой оптимальный эллипсоид для всей Земли может и не быть оптимальным для данной территории. Однако если строить *референц-эллипсоид* по измерениям на небольшой территории, то параметры эллипсоида будут получаться неуверенно. Поэтому исторически сложилось так, что большинство исследователей стремились построить референц-эллипсоид по возможности по большему материалу и, по возможности, приближающийся к общеземному.

Наиболее широкую известность и практическое применение получили следующие референц-эллипсоиды.

Эллипсоид Бесселя, выведенный в 1841 г. на основании европейских, индийских и перуанских градусных измерений: $a = 6377397$ м, $\varepsilon = 1/299,153$. Этот эллипсоид получил широкое распространение в европейских геодезических работах. В частности, в России он применялся до вывода в 1940 г. эллипсоида Красовского.

В 1866 г. Кларком был выведен эллипсоид, получивший название *эллипсоида Кларка*: $a = 6378206$ м, $\varepsilon = 1/294,979$. При выводе использованы градусные измерения

западноевропейские, русские, индийские, перуанские. Этот эллипсоид применялся во Франции и ее колониях. В 1880 г. Кларком был выведен другой эллипсоид, который получил применение в США и Канаде: $a = 6378249$ м, $\varepsilon = 1/293,466$.

В 1924 г. был принят в качестве международного эллипсоид, выведенный Хейфордом в 1909 г. в основном по американским градусным измерениям: $a = 6378388$ м, $\varepsilon = 1/297,0$.

В 1940 г. под руководством крупнейших советских геодезистов Ф.Н. Красовского и А.А. Изотова была закончена работа по выводу нового земного эллипсоида, получившего название *эллипсоида Красовского*: $a = 6378245$ м, $\varepsilon = 1/298,3$. Для его вывода были использованы все доступные в то время градусные измерения СССР, США, Индии, а также гравиметрические съемки, выполненные на территории СССР. В качестве исходного пункта, по которому был ориентирован этот эллипсоид, принят центр круглого зала Пулковской обсерватории. В 1946 г., 7 апреля, постановлением Совета Министров СССР эллипсоид Красовского утвержден в качестве основного эллипсоида относимости для всех геодезических работ СССР.

Эллипсоид Красовского, выведенный по большим астрономогеодезическим сетям, является эллипсоидом, близко представляющим всю Землю. Его элементы близки к элементам общего земного эллипсоида. Ориентирование его по Пулкову делает его наиболее подходящим для Европы, Западной Азии и Северной Африки.

В 1967 г. в США выведен новый референц-эллипсоид с использованием всех старых и большого объема новых градусных измерениях, а также мировой гравиметрической съемки: $a = 6378160$ м, $\varepsilon = 1/298,247$. Этот эллипсоид заменил в качестве международного эллипсоид Хейфорда 1909 г. и получил название *международного эллипсоида 1967 г.*

Понятие о периодах Эйлера и Чандлера, нутации и прецессии, динамическое сжатие [Стейси, 1972, с. 37-43]

Из уравнения (2.11) видно, что в разложении потенциала силы тяжести, кроме члена, пропорционального r^{-1} , имеется меньший член, пропорциональный r^{-3} , который обусловлен сжатием Земли. Этот член зависит от угловой координаты φ . Следовательно, на массу m , расположенную в точке (r, φ) , кроме центральной силы тяготения $-m \frac{\partial V}{\partial r}$,

действует момент сил $-m \frac{\partial V}{\partial \varphi}$. Поэтому на массу Земли в свою очередь действует момент

сил, равный по величине и противоположный по направлению. Моменты, возникающие из-за действия Луны и Солнца на экваториальное вздутие, вызывают прецессию земной оси (рис. 2.2). Период прецессии составляет 25800 лет.

Полное исследование показывает, что на прецессию накладывается малая нутация, или качания полюса мира вокруг полюса эклиптики. На самом деле имеется несколько нутаций, возникающих из-за эллиптичности орбит Земли и Луны, расположенных в разных плоскостях, а также от слабого воздействия других планет.

Независимо от гравитационного взаимодействия с другими телами Земля испытывает свободную, эйлерову прецессию. В геофизической литературе ее обычно называют свободной нутацией или чандлеровскими колебаниями по имени первооткрывателя. Колебания возникают из-за того, что ось вращения Земли слегка наклонена к оси наибольшего момента инерции. Полный момент количества движения остается постоянным и по величине и по направлению, а Земля движется так, что полюс описывает на ее поверхности круг с центром в точке пересечения оси наибольшего момента инерции с поверхностью Земли (рис. 2.3). Ось вращения Земли практически фиксирована в пространстве и чандлеровское колебание полюса выражается в

периодических вариациях широты с периодом $T_{ch} = 430 - 435$ суток и переменной амплитудой, составляющей, в среднем, $\alpha = 0,14''$.

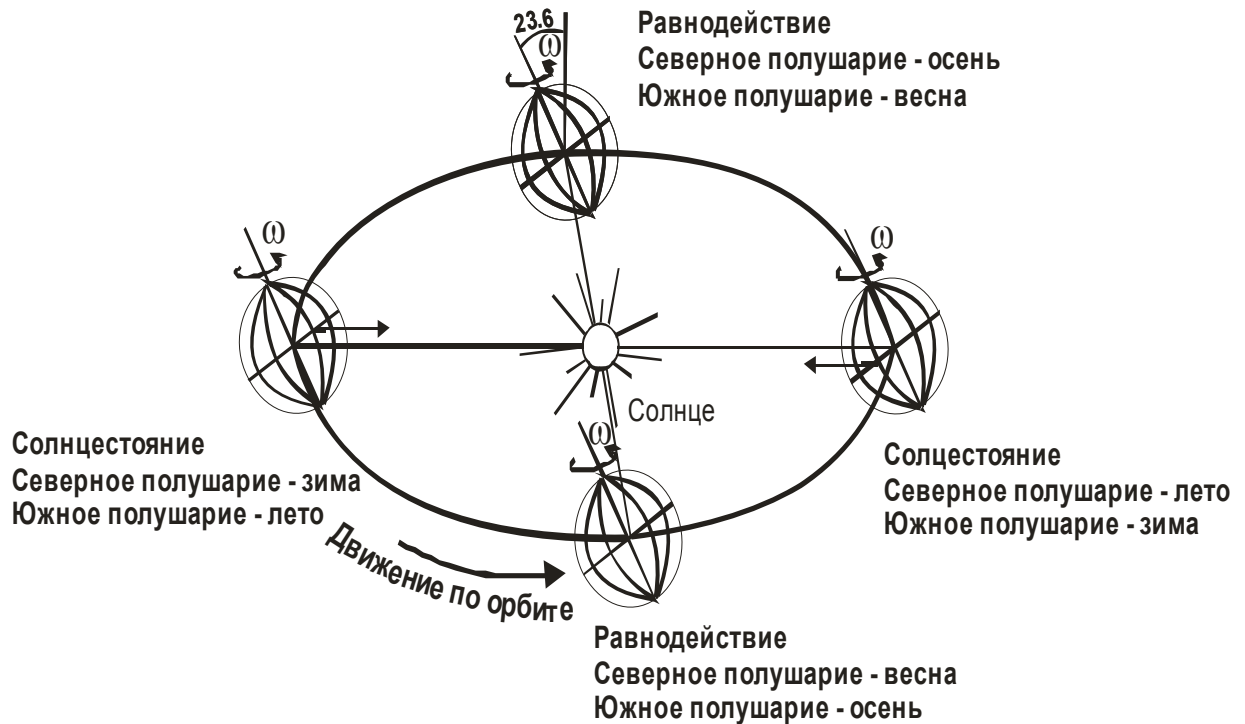


Рис. 2.2. Причина прецессии земной оси. Гравитационное воздействие Солнца на экваториальное вздутие создает момент одного и того же направления во время обоих солнцестояний и не создает никакого момента во время равноденствий.

По аналогии с вращающимся волчком, который можно рассматривать как жесткое твердое тело, можно получить выражение для периода свободной прецессии Земли. Суть вычислений заключается в следующем. Полная энергия вращения больше, чем энергия вращения относительно оси C . Избыток энергии вращения приводит к стремлению тела восстановить состояние симметричного вращения и создает эффективный гироскопический момент. Рассматривая его как внешний момент, вызывающий вынужденную прецессию, получим угловую скорость свободной (эйлеровской) прецессии жесткой твердой Земли, или, как полагают, теоретический период Чандлера (ch):

$$\omega_{ch} = - \varepsilon_H \omega, \quad (2.18)$$

где ω - угловая скорость вращения Земли и ε_H - динамическое сжатие, определяемое из выражения:

$$\varepsilon_H = \frac{C - A}{C} = 3,2732 \cdot 10^{-3} \approx \frac{1}{305,51}. \quad (2.19)$$

Как можно видеть из (2.19), теоретическое значение $T_{ch, теор} = 2\pi/\omega_{ch} = 305$ суток не равно на практике определенному значению периода Чандлера T_{ch} . Более того, вариации широты с частотой ω_{ch} на практике не выявлены. Это может указывать на то, что Землю нельзя рассматривать как жесткое тело, и, следовательно, чандлеровские колебания, возможно, связаны не только со свободной прецессией планеты.

Из полученного соотношения (2.19) и из (2.7) находим значение полярного момента инерции Земли:

$$C = \frac{I_2}{\varepsilon_H} Ma^2 = 0,3308 Ma^2. \quad (2.20)$$

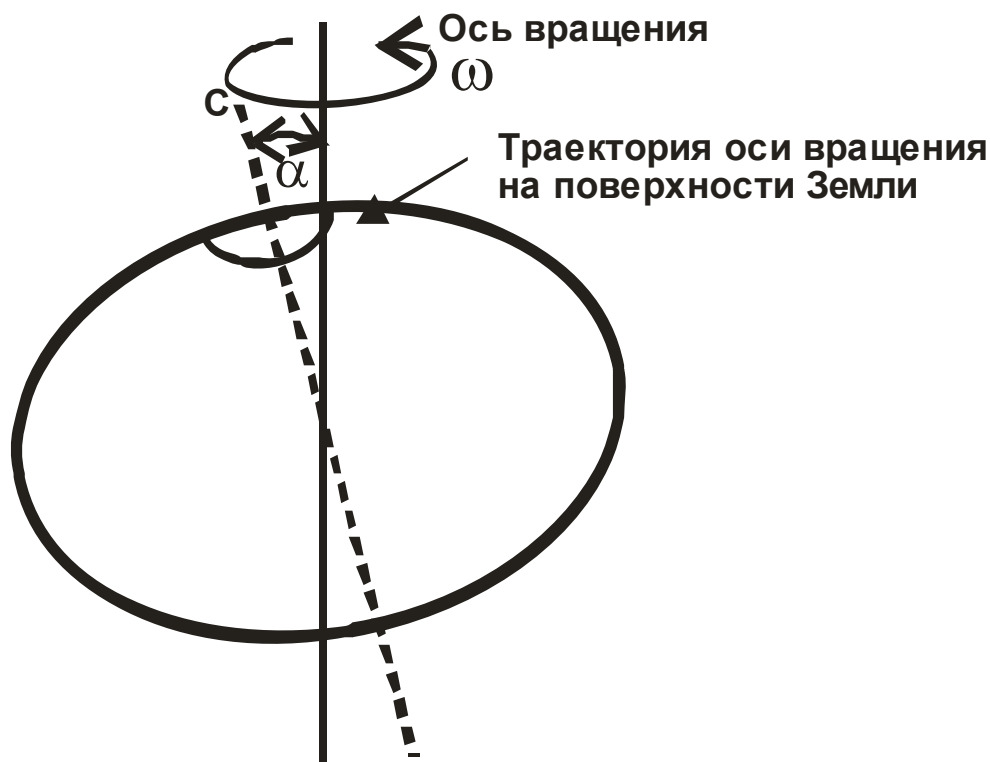


Рис. 2.3. Чандлеровское колебание полюса. Периодические изменения широты связаны с тем, что Земля движется как единое целое, и ее ось вращения, оставаясь неподвижной в пространстве, описывает конус с раствором 2α вокруг оси наибольшего момента инерции.

Колебания Чандлера и сеймотектонический процесс [Викулин, Кролевец, 2001; Vikulin, Krolevets, 2002]

В рамках ротационной модели сейсмического процесса (см. главу 3) исследовалась природа взаимосвязи сильных землетрясений с прецессией полюса планеты. В результате были получены следующие результаты.

1. Тектонический процесс, протекающий в районах сейсмически активных поясов планеты, характеризуется широким спектром частот. Показано, что прецессия полюса планеты может происходить вследствие изменения формы Земли, вызываемого колебанием верхней части литосферы – так называемым «нулевым» колебанием.

Следует отметить следующее. С точки зрения механики, очевидно, что в рамках ротационной модели возможен и обратный процесс, а именно: перекачка энергии свободных колебаний планеты в сеймотектоническое движение.

2. Как оказалось, чандлеровская частота «расщепляется» на две $f_{ch1} = 0,835 \text{ год}^{-1}$ ($T_{ch1} = 437$ дней) и $f_{ch2} = 0,860 \text{ год}^{-1}$ ($T_{ch2} = 425$ дней). Такой эффект расщепления в рамках ротационной модели объясняется различными значениями «нулевых» частот для самых активных сеймотектонических поясов планеты, ориентированных меридионально (тихоокеанской пояс) и широтно (альпийско-гималайской пояс).

3. Распределение значений радиусов траекторий движения полюса планеты по их числу имеет регулярную «квантовую» составляющую, равную $0'',05$. В пересчете на энергию нутации это значение по порядку величины близко сеймотектонической энергии, сбрасываемой в очагах наиболее сильных ($M_W = 8-9$) землетрясений.

Отмечено, что эффект от землетрясения, сравнимого с чилийским 20.05.1960, $M_W = 9,5$, в настоящее время может быть зарегистрирован современными высокоточными измерениями координат полюса, выполняемыми Международной службой широты. Это позволяет исследовать «динамику» изменения траектории движения полюса планеты с помощью сейсмотектонических данных.

4. Полученные данные позволили сформулировать гипотезу, согласно которой взаимосвязь солнечной активности и других космических факторов с сейсмотектоническим процессом не является «прямой», а обеспечивается перекачкой энергии годовой компоненты прецессии полюса в чандлеровские частоты f_{ch1} и f_{ch2} .

Проведенный анализ показывает, что Землю, состоящую из блоков и плит, действительно нельзя рассматривать как жесткое тело, более реалистичным приближением в течение геологических отрезков времени следует рассматривать гидродинамическое приближение. При этом и вращение Земли и прецессии ее полюса следует рассматривать как такие процессы, посредством которых явления, протекающие внутри Земли, могут обмениваться энергией (взаимодействовать) с явлениями, определяющими внешнюю жизнь планеты – ее гравитационную и ротационную (торсионную) взаимосвязь с другими телами солнечной системы и Галактики.

Геоид по спутниковым данным. Квазигеоид [Стейси, 1972, с. 60-65]

Выше было показано, что на экваториальное вздутие Земли действуют моменты, создаваемые Солнцем и Луной и вызывающие прецессию земной оси (рис. 2.2). Конечно, и Земля, в свою очередь, создает моменты такой же величины и противоположного направления, действующие соответственно на Солнце и на Луну. Момент, действующий на Луну, оказывает заметное влияние на ее орбиту. Аналогичным образом экваториальное вздутие воздействует на движение искусственных спутников Земли. Масса искусственных спутников мала и поэтому не оказывает заметного влияния на движение Земли. В то же время орбиты спутников изменяются, и их изменение дает наиболее точные сведения о крупномасштабных отклонениях Земли от сферической симметрии.

Геоид, построенный по спутниковым данным (рис. 2.4), по форме мало отличается от эллипсоида. Эти отклонения в 1000, а может быть и более раз меньше сжатия эллипсоида. Тем не менее, их можно обнаружить, прослеживая изменения элементов спутниковых орбит.

Изучение орбит искусственных спутников Земли значительно расширило наши знания о глобальной структуре гравитационного поля Земли и, кроме того, позволило в 30 раз повысить точность определения сжатия. Экваториальное вздутие Земли заметно влияет на орбиту движения спутника. Если спутник движется к северо-востоку и пересекает экватор в северном направлении, то точка пересечения его орбиты с экватором будет постепенно смещаться к западу (рис. 2.5 а). Скорость перемещения орбиты к западу позволяет вычислить сжатие.

Сжатие для Земли постоянной плотности, вычисленное Ньютоном, равно $1/230$. Французская геодезическая экспедиция XVIII века в результате своих измерений получила значения, находящиеся в пределах $1/310 - 1/178$. До наблюдений искусственных спутников для сжатия обычно использовалось значение $1/297,3$, найденное Джеффрисом с ошибкой около $1/300$ этой величины по материалам гравиметрических измерений на поверхности Земли. Наблюдения орбит искусственных спутников дают величину $1/298,25$ с точностью $1/30000$.

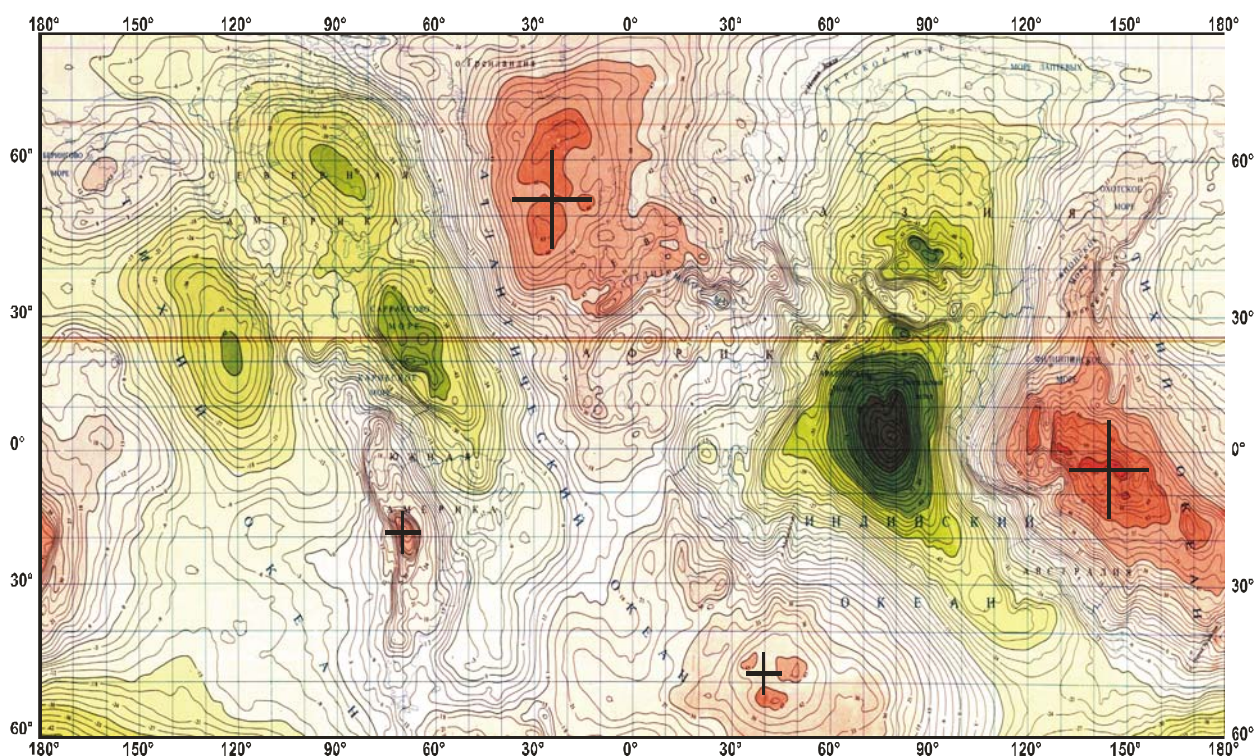


Рис. 2.4. Мировая карта высот квазигеоида, м 1:50000000 [Демьянов, Назарова и др. 1996].

Легенда: Карта построена по значениям высот квазигеоида для регулярной сетки с шагом 1° по широте и долготе, полученным по аномалиям силы тяжести для трапеций $1^\circ \times 1^\circ$ в области с $R \approx 500$ км и по модели гравитационного поля Земли ЦНИИГАиК ГАО-94 – в более дальних зонах. Аномалии силы тяжести для трапеций $1^\circ \times 1^\circ$, собранные и систематизированные в ЦНИИГАиК, снимались с гравиметрических карт масштаба 1:1000000 – 1:5000000. Модель ГПЗ ЦНИИГАиК (ГАО-94), содержащая сферические гармоники разложения аномалий силы тяжести до 180-го порядка, получена с использованием результатов совместного уравнивания гравиметрических (наземных и морских) и спутниковых (орбитальных и альтиметрических) данных. Средняя квадратичная погрешность высот квазигеоида на карте составляет $\pm 1,3-1,5$ м.

Условные обозначения: Крестами обозначены максимальные высоты квазигеоида: большими крестами наибольшие превышения высот – до 60-75 м, малыми – до 42-45 м. Минимальные высоты квазигеоида, также отчетливо видимые по сгущению изолиний, особо не выделялись. Область с наибольшим минимумом высоты квазигеоида до $-(75-90)$ м расположена в Индийском океане. «Система» из трех минимумов высоты квазигеоида меньшей амплитуды располагается вблизи Североамериканского континента: в Карибском море до $-(45-60)$ м и в Тихом океане до -45 м, и в пределах его северной части до -45 м.

Уклонение геоида от сфероида (референц-эллипсоида) лучше всего можно определить по вариациям гравитационного поля на поверхности Земли. Получаемая в результате поверхность называется *квазигеоидом* (рис. 2.4). Наблюдения орбит искусственных спутников Земли позволили значительно усовершенствовать эти определения. Подобные наблюдения доставляют нам более точные данные о вариациях гравитационного поля для более обширных районов, чем измерения, выполняемые в настоящее время на поверхности Земли. Вместе с тем гравиметрические наблюдения на поверхности все еще остаются наилучшим способом изучения локальных вариаций гравитационного поля и геоида в пределах расстояний менее 2000 км.

Один из наиболее известных выводов «спутниковой геодезии» состоит в том, что Земля имеет «грушевидную» форму. В действительности же отклонения геоида от сфероида, создающие грушевидность, меньше 20 м (рис. 2.5 б), в то время как экваториальное вздутие Земли превышает $a - c = 21,385$ км.

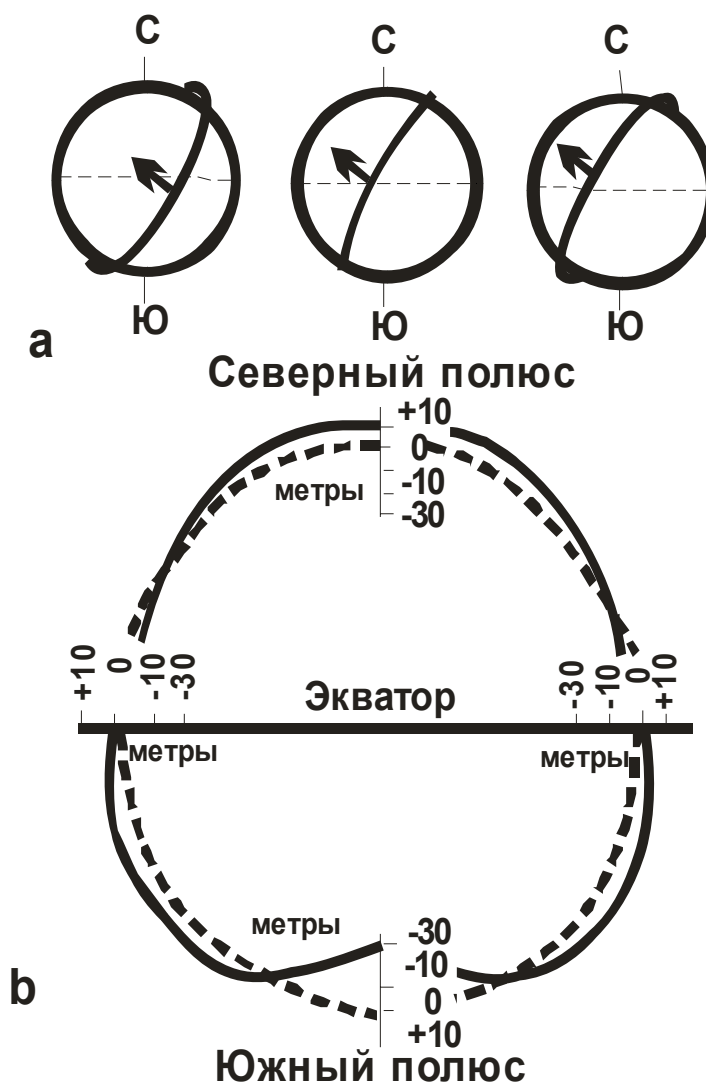


Рис. 2.5. *a* – экваториальное вздутие Земли заставляет поворачиваться к западу орбиту движущегося в восточном направлении искусственного спутника. По скорости поворота орбиты вычисляется сжатие Земли. *b* – высота геоида (сплошная кривая) относительно сфероида со сжатием $1/298,25$ (пунктирная линия) в предположении, что Земля симметрична относительно полярной оси. Вертикальный и горизонтальный масштабы не выдержаны [Ботт, 1974; с. 13].

Интересно, что расположение поднятий и впадин поверхности геоида не связано со строением земной коры (материками и океанами). Это один из самых поразительных результатов, показывающих, что существует компенсация масс (изостазия) в континентальных масштабах. Если бы материки были просто наложены на идеально слоистую эллипсоидальную Землю, то наблюдалась бы четкая связь формы геоида с очертаниями материков, и разница в высотах между поднятиями и впадинами на поверхности геоида была бы в 10 раз большей. Отсутствие связи между формой геоида и материками наводит на мысль, что особенности формы геоида либо определяются различиями плотности в глубоких частях мантии (глубже пластичного слоя в верхней мантии, существование которого, как полагают, обеспечивает изостатическое равновесие), либо зависят от различий в плотности, поддерживаемых динамически (благодаря конвекции). В последнем случае неоднородности в распределении плотности, скорее всего, располагаются в верхней мантии.

Принимая, что распределение плотности известно из сейсмических данных, и допуская, что на всех глубинах существует гидростатическое равновесие, можно вернуться к задаче о фигуре Земли и, пользуясь этими результатами, рассчитать ее фигуру равновесия.

Гидростатическая теория с точностью до первого порядка дана Джеффрисом, который показал, что динамическое сжатие поверхности ε_H можно выразить через полярный момент инерции C следующим образом:

$$\varepsilon_H = \frac{\frac{5}{2}q}{1 + \frac{25}{4}\left(1 - \frac{3}{2}\frac{C}{Ma^2}\right)}. \quad (2.21)$$

В этой формуле q , как и выше, равно отношению центробежной силы к притяжению на экваторе:

$$q = \frac{\omega^2 a^3}{GM} = 3,4678 \cdot 10^{-3} \sim \varepsilon. \quad (2.22)$$

Однако, формула (2.21) недостаточна для того, чтобы по ней можно было установить различие между сжатием по гидростатической теории и наблюдаемым сжатием. Поправка к (2.21) была получена численно с использованием данных о распределении плотности в Земле. Проведенные вычисления позволили для величины динамического сжатия Земли получить значение:

$$\varepsilon_H = 1/299,7. \quad (2.23)$$

Видно, что различие между сжатием ε и динамическим сжатием ε_H несомненно: Земля сжата примерно на 0,5% сильнее, чем следует из гидростатической теории.

Отклонение от условий гидростатического равновесия означает, что в мантии существуют касательные напряжения, поддерживаемые статически и динамически. Их величина должна быть порядка 10^8 дин/см.

«Избыточное» сжатие не так уж и велико. Если в разложении потенциала силы тяжести рассматривать только члены второго порядка и вычесть «равновесное» сжатие, то Земля оказывается трехосным эллипсоидом с главными моментами инерции $A' > B' > C'$, причем $(C' - A')/(B' - A') \approx 2$. Если такое тело вращается, то на его форму накладывается вздутие, вызванное вращением. Если тело неидеально упругое (т.е. может течь), то вздутие принимает равновесную (гидростатическую) форму, накладывающуюся на исходное сжатие. При этом тело поворачивается так, что ось наибольшего исходного (неравновесного) момента инерции совпадает с осью вращения.

Полученные данные показывают, что Земля может рассматриваться с позиций гидродинамической теории. При этом самым естественным находят свое место в теории фигуры равновесия и сфероиды Маклорена-Клеро, и трехосные эллипсоиды Якоби, и грушевидные формы Ляпунова–Пуанкаре. Вращение Земли и прецессии ее полюса при этом могут рассматриваться как такие процессы, которые позволяют «перекачивать» энергию вращения Земли и энергию ее взаимодействия с другими космическими телами солнечной системы и Галактики в энергию «внутренних» процессов и наоборот.

Очевидно, можно ожидать, что найдут свое место в теории фигур равновесия и другие, более экзотические, чем дыни и патиссоны Ляпунова–Пуанкаре, геологические

образования и геофизические явления, такие как вихревые, спиральные и др. геологические структуры и геофизические процессы. Роль ротационных явлений и торсионных полей при этом, очевидно, должна быть определяющей.

Литература

- Ботт М.* Внутренне строение Земли. М.: Мир. 1974. 376 с.
- Бровар В.В., Магницкий В.А., Шимберев Б.П.* Теория фигуры Земли. М.: Геодезиздат, 1961. 256 с.
- Бровар В.В., Юркина М.И.* Михаил Сергеевич Молоденский, жизнь и творчество // М.С. Молоденский. Избранные труды. М.: Наука, 2001. С. 3-24.
- Буллен К.Е.* Плотность Земли. М.: Мир, 1978. 444 с.
- Викулин А.В., Кролевец А.Н.* Чандлеровское колебание полюса и сейсотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 6. С. 996-1009.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. 297 с.
- Геодезия. Картография. Геоинформатика. Кадастр. Энциклопедия. Т. 1. / Ред. А.В. Бородко, В.П. Савиных. М.: Геодезкартиздат, 2008а. 496 с.
- Геодезия. Картография. Геоинформатика. Кадастр. Энциклопедия. Т. 2. / Ред. А.В. Бородко, В.П. Савиных. М.: Геодезкартиздат, 2008б. 464 с.
- Грушинский Н.П.* Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976. 512 с.
- Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: Изд-во Иностран. лит-ры, 1963. 264 с.
- Демьянов Г.В., Назарова Н.Г., Майоров А.Н., Таранов В.А.* Мировая карта высот квазигеоида. М.: ЦНИИГАиК, 1996.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В.* Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. М.: Наука, 1971. 384 с.
- Клеро А.* Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики. М.: Изд-во АН СССР, 1947.
- Кондратьев Б.П.* Теория потенциала и фигуры равновесия. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 624 с.
- Кузнецов В.В.* Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 367 с.
- Ламб Г.* Гидродинамика. М.: Гостехиздат. 1947. 928 с.
- Ли Сы-гуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.-Л.: Госгеолтехиздат, 1958. 100 с.
- Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движения. Череповец: Изд-во «Меркурий-ПРЕСС». 2000. 254 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли / Ред. А.О. Глико. М.: Наука, 2006. 390 с.
- Молоденский М.С.* Избранные труды. Гравитационное поле. Фигура и внутреннее строение Земли. М.: Наука, 2001. 569 с.
- Молоденский М.С., Еромеев В.Ф., Юркина М.П.* Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли // Тр. «ЦНИИГАиК». 1960. Вып. 131. 250 с.
- Орленок В.В.* Основы геофизики. Калининград: Калининградский ГУ, 2000. 448 с.
- Поплавский А.А., Соловьев В.Н.* Гипотеза о макросейсмическом дефекте, порождающем землетрясения // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН.. 2000. С. 235-242.
- Пуанкаре А.* Фигуры равновесия жидкой массы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика». 2000. 208 с.

- Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.
- Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир, 1972. 344 с.
- Таблицы физических величин. Справочник / Ред. И.К. Кикоин. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2005. № 5. С. 59-77.
- Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. В 2-х частях. Т. 1. М.: Мир, 1985. 376 с.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.
- Хаин В.Е., Короновский Н.В. Планета Земля от ядра до ионосферы. Учебное пособие. М.: КДУ, 2007. 244 с.
- Шимберев Б.П. Теория фигуры Земли. М.: Недра, 1975. 432 с.
- Эверден Дж.Ф. О чем говорят параметры фигуры Земли $\varepsilon = 1.298$, $C/Ma^2 = 0.333$? // Физика Земли. 1997. № 2. С. 85-94.
- Vikulin A.V., Krolevets A.N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geoph. Pol. 2002. V. 50. # 3. P. 395-411.

3. ФИЗИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Определение науки сейсмологии. Классификация землетрясений по происхождению, глубине очага и силе. Способы оценки интенсивности землетрясений, шкала MSK-64. Географическое распределение, главные пояса сейсмичности. Прогнозирование землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство. Землетрясение, его очаг, гипоцентр, эпицентр, изосейсты. Теория упругой отдачи. Другие теории очага землетрясений. Энергия землетрясений, магнитуда, сейсмический момент. Ротационная упругая модель сейсмического процесса.

Определение науки сейсмологии. Классификация землетрясений по происхождению, глубине очага и силе. Географическое распределение землетрясений

Сейсмология – это наука, изучающая особенности распределения землетрясений, процессов, протекающих в их очагах, и распространение упругих волн в недрах Земли. В перечне наук о Земле наиболее тесно сейсмология «граничит» с тектоникой и физикой недр Земли.

Под землетрясением или трясением Земли обычно подразумевается трясение земной поверхности. В сейсмологии под землетрясением понимают не только трясение земной поверхности, но и процесс разрушения, нарушения сплошности Земли в некоторой области - *области очага землетрясения*, в пределах которой потенциальная упругая энергия, запасенная в недрах планеты, переходит в кинетическую энергию колебаний, уносимую из очага сейсмическими волнами.

В развитии мировой сейсмологии наша страна занимает видное место. Русский академик Б.Б. Голицын является одним из основателей сейсмологии как точной науки.

Задолго до создания сейсмологии в 1757 г. М.В. Ломоносов указывал, что землетрясение есть следствие процессов, происходящих внутри Земли и связанных с горообразованием и изменениями в глубинных горных породах. И.В. Мушкетов и А.П. Орлов составили и опубликовали в 1893 г. «Каталог землетрясений Российской империи», который стимулировал разработку Особой комиссией при Императорском Русском географическом обществе программы наблюдений за землетрясениями и, как следствие, начало создания сети сейсмических станций на территории России [Мушкетов, Орлов, 1893].

Одна из таких станций начала свою работу в Петропавловске-Камчатском в 1915 г., удаленном в то время от научных центров на максимально возможное расстояние. Первый наблюдатель А.А.Пурин в 1917 г. в Петропавловске-Камчатском опубликовал брошюру «О землетрясениях на Камчатке и их регистрация» [Пурин, 1917]. Всего в России в 1915 г. насчитывалось 15 сейсмических станций, что составляло около ¼ всех сейсмических станций мира. Российские станции были оснащены лучшими в то время сейсмографами, сконструированными Б.Б. Голицыным [Голицын, 1960].

Землетрясения – грозное явление природы. Достаточно сказать, что от землетрясений на планете, в среднем, из каждых 8000 человек один погибает и примерно десять - в большей и меньшей степени страдают.

Землетрясения происходят вследствие движения земной коры (тектонические землетрясения), извержения вулканов (вулканические землетрясения), обвалов и оползней (денудационные землетрясения) и деятельности человека – в результате взрывов, сооружения значительных сооружений (плотин и появления водоемов) и разработки месторождений (наведенная сейсмичность). Всем этим типам землетрясений присущи как общие черты – излучение сейсмических волн разной интенсивности, так и отличия. Ниже мы будем касаться только землетрясений, происходящих в земных недрах в результате движения слагающих их блоков и плит – тектонических землетрясений.

Основные географические закономерности распределения землетрясений планеты можно видеть из данных, представленных на рис. 3.1. Видно, что землетрясения, как правило, происходят вдоль границ тектонических плит; десять крупнейших плит планеты представлены на этом рисунке. Плиты перемещаются относительно друг друга по поверхности подстилающих их более мягких пород.

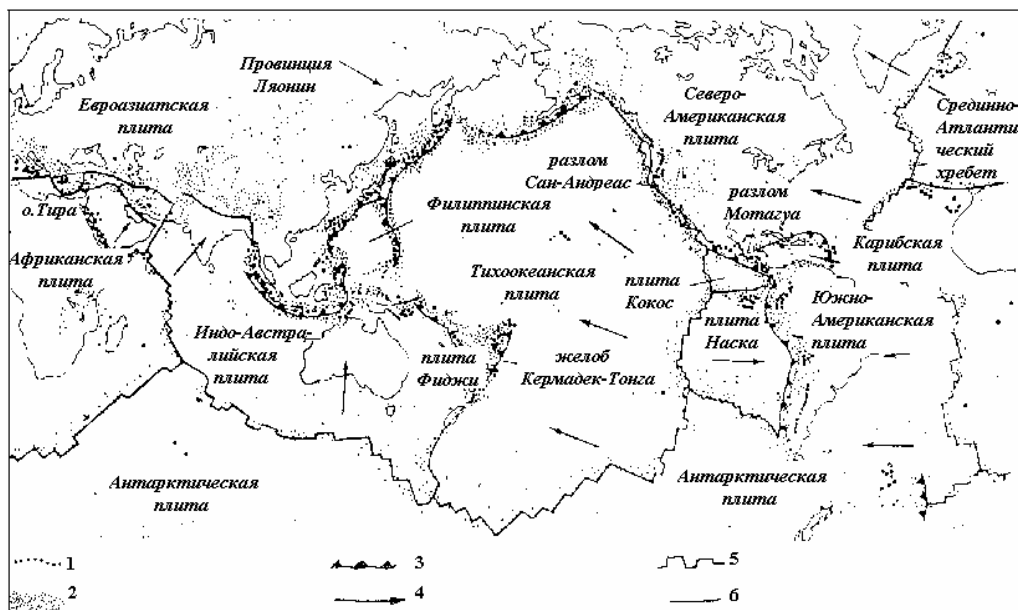


Рис. 3.1 Карта мира, показывающая расположение основных тектонических плит, а также места недавних землетрясений, вулканических извержений. Эпицентра землетрясений обозначены мелкими точками, вулканы – крупными точками.

1- вулканы. 2 – зоны землетрясений. 3 – зоны субдукции (подвига). 4 – направление движения плит. 5 – зоны разрастания дна вдоль океанических хребтов, смещенные трансформными разломами. 6 – зоны столкновения плит.

В краевых частях каждой плиты, там, где она соприкасается с другими плитами, горные породы оказываются под действием больших деформирующих (*тектонических*) сил, вызывающих в них физические и даже химические изменения. Именно на краях плит геологические структуры Земли подвергаются наибольшему воздействию сил, возникающих в результате движения и столкновения плит, и именно там происходят самые крупные геологические преобразования.

К наиболее активным относятся Тихоокеанский (окраина Тихого океана) и Альпийско-Гималайский (пояс, протягивающийся от Индонезии в Индийском океане, через Тибет, Среднюю Азию, Турцию, Средиземное море до Азорских островов в Атлантическом океане) сейсмические пояса, в пределах которых выделяется примерно 80-85% и 10-15% всей сейсмической энергии планеты.

Распределение землетрясений по глубинам гипоцентров можно видеть на сейсмических разрезах (рис. 3.2а, б), построенных по сейсмическим данным, полученным на Камчатке [Гусев, Шумилина, 1976]. Видно, что землетрясения происходят в пределах тонкого слоя, простирающегося под Камчатку под углом примерно 45° . Отметим, что на Камчатке и Курилах происходят землетрясения с глубиной гипоцентра до 600-700 км. Примером такого глубокого сильного ($M = 7,5$) землетрясения является событие, происшедшее 5 июля 2008 г. в пределах сейсмофокальной зоны Южной Камчатки (рис. 3.2). Эпицентр этого землетрясения располагался в Охотском море на расстоянии около 400 км от г. Петропавловска-Камчатского (рис. 3.2а), в котором землетрясение ощущалось с интенсивностью 3-4 балла по 12-балльной шкале *MSK-64*, гипоцентр – на глубине $H = 630$ км (рис. 3.2б).

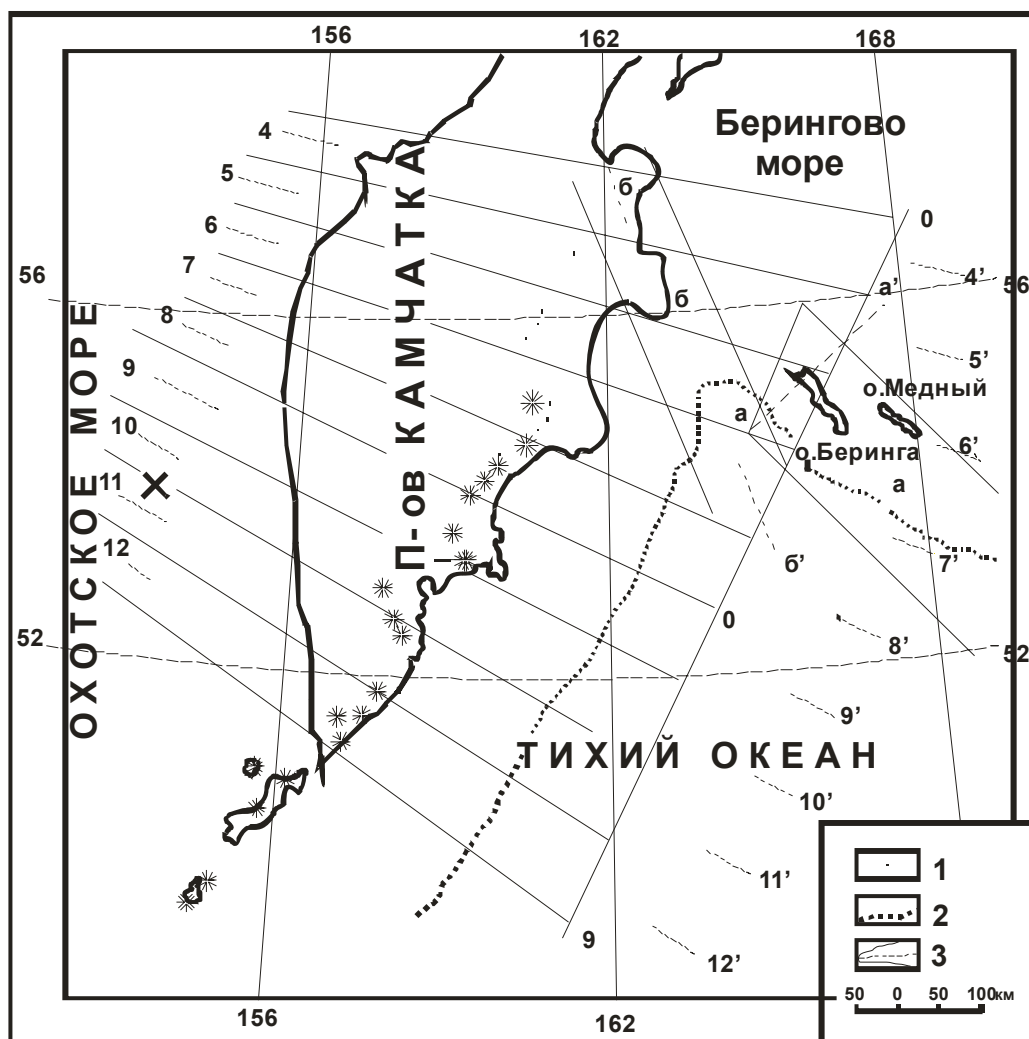


Рис. 3.2.а Схема расположения разрезов сейсмоактивного блока по данным за 1964-1972 гг. 1 – вулканы; 2 – ось глубоководного желоба; 3 – секторы и осевые линии, по которым построены разрезы рис.3.2б. Крестом обозначен эпицентр глубокого ($H = 630$ км) землетрясения 5.07.08 с $M = 7,5$.

Для других участков тихоокеанского пояса распределение землетрясений по глубинам отличаются от описанного распределения для Курило-Камчатской зоны и по максимальным значениям гипоцентров и по «углам наклона» сейсмофокальной зоны, которые изменяются от $20-30^\circ$ до $70-80^\circ$. Сильные глубокие землетрясения происходят чрезвычайно редко. Такие события инструментально отмечены пока только у берегов Боливии в Южной Америке и в районе дуги Тонга – Кермадек.

Принято называть землетрясения с глубинами очагов до 30-50 км – коровыми, с глубинами в диапазоне 30 – 300 км – промежуточными и с глубинами больше 300 км – глубокими.

Способы оценки интенсивности колебаний при землетрясениях: макросейсмические шкалы и 12-балльная шкала MSK-64

Для классификации землетрясений по интенсивности были разработаны макросейсмические шкалы. Первые такие шкалы появились в конце XIX – начале XX веков: шкалы Росси-Фореля (10 балльная) в Европе, шкала Меркали (12 балльная) в США и шкала Японского метеорологического общества JMA (Japan Meteorological Agency, 10

балльная) в Японии. В России принята 12 балльная шкала MSK – 64, которая является близкой шкале Меркали [Медведев, 1968].

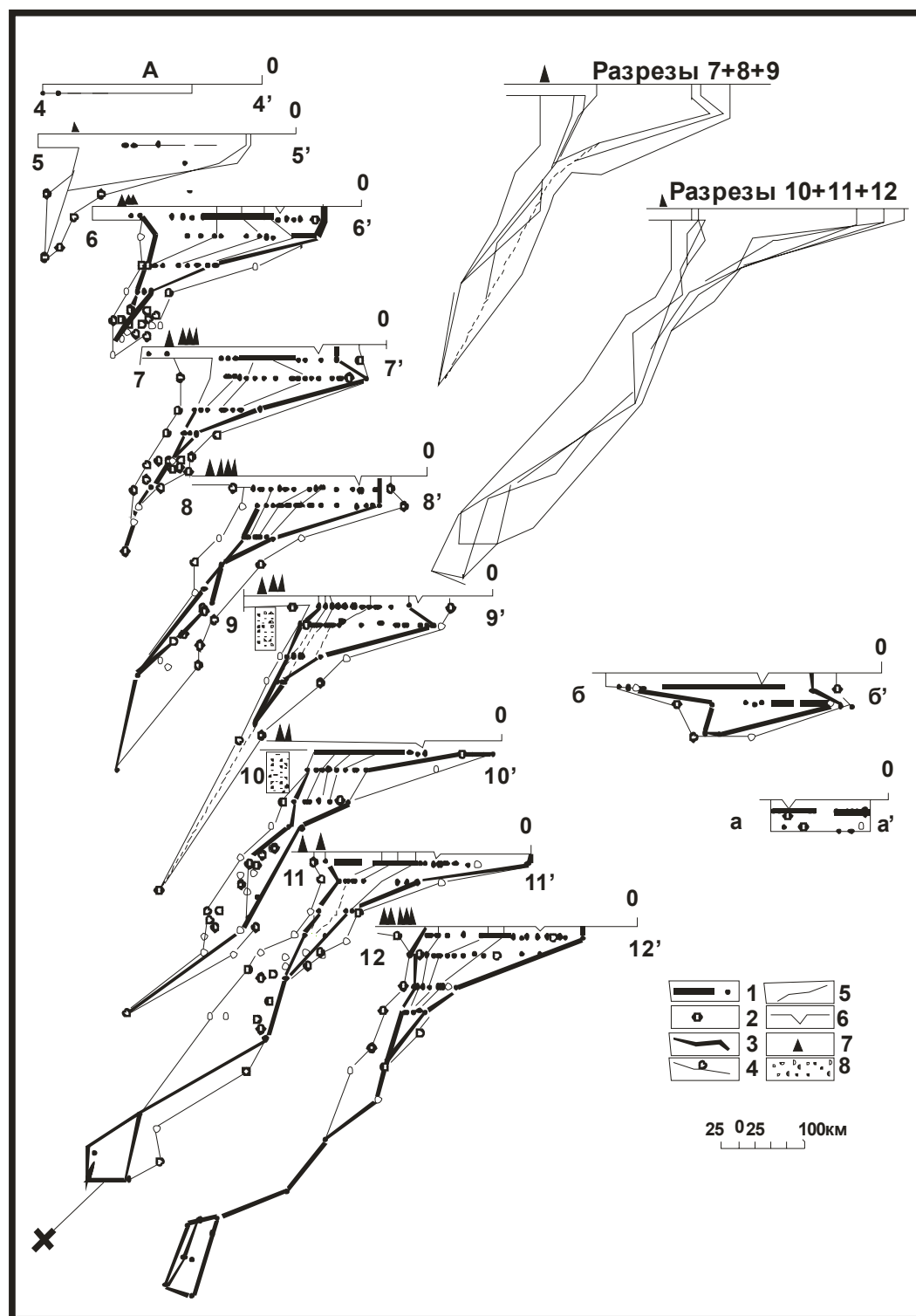


Рис. 3.2.б. Разрезы сейсмоактивного блока. а – вертикальные разрезы по секторам; б – совмещенные разрезы. 1 – очаги землетрясений с $K \geq 11$; 2 – очаги землетрясений с $K = 9 \div 10$; 3 – граница сейсмоактивного блока по землетрясениям с $K > 11$; 4 – границы по землетрясениям с $K > 9$; 5 – линии, отделяющие справа налево 25, 50, 75% землетрясений с $K > 11$; 6 – ось глубоководного желоба; 7 – вулканы; 8 – гипотетический магматический очаг Авачинского вулкана; K – энергетический класс землетрясения. Крестом обозначен гипоцентр глубокого ($H = 630$ км) землетрясения 5.07.08 с $M = 7,5$.

Шкала составлена С.В. Медведевым (Москва), В. Шпонхойером (Sponheuer, Иена) и В. Карником (Karnik, Прага) и принята в 1964 г. [Медведев, 1968].

1. Классификация, принятая в шкале

Типы сооружений

Здания, возведенные без необходимых антисейсмических мероприятий.

Тип А – здания из рваного камня, сельские постройки, дома из кирпича-сырца, глинобитные дома.

Тип Б – обычные кирпичные здания, здания крупноблочного и панельного типа, фахверковые строения, здания из естественного тесаного камня.

Тип В – каркасные железобетонные здания, деревянные дома хорошей постройки.

Количественные характеристики

Отдельные – около 5%

Многие – около 50%

Большинство – около 75%

Классификация повреждений

1 степень. *Легкие повреждения*: тонкие трещины в штукатурке и откалывание небольших кусков штукатурки.

2 степень. *Умеренные повреждения*: небольшие трещины в стенах, откалывание довольно больших кусков штукатурки, падение кровельных черепиц, трещины в дымовых трубах, падение частей дымовых труб.

3 степень. *Тяжелые повреждения*: большие и глубокие трещины в стенах, падение дымовых труб.

4 степень. *Разрушения*: сквозные трещины и проломы в стенах, обрушения частей зданий, разрушение связей между отдельными частями зданий, обрушение внутренних стен и стен заполнения каркаса.

5 степень. *Обвалы*: полное разрушение зданий.

Группировка признаков интенсивности

а) Люди и их окружение

б) Сооружения

в) Природные явления

2. Интенсивность (в баллах)

1 балл. *Неощутимое землетрясение*.

а) Интенсивность колебаний лежит ниже предела чувствительности людей; колебания почвы отмечаются только приборами.

б) –

в) –

2 балла. *Едва осязаемое землетрясение*.

а) Колебания ощущаются только отдельными людьми, находящимися в покое внутри помещений, особенно на верхних этажах.

б) –

в) –

3 балла. *Слабое землетрясение*.

а) Землетрясение ощущается многими людьми, находящимися внутри помещений; под открытым небом – только в благоприятных условиях. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим легким грузовиком. Внимательные наблюдатели замечают легкое раскачивание висячих предметов, несколько более сильное на верхних этажах.

б) –

в) –

4 балла. *Заметное сотрясение*.

а) Землетрясение ощущается внутри зданий многими людьми; под открытым небом – немногими. Кое-где спящие просыпаются, но никто не пугается. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим рядом с домом тяжело нагруженным

грузовиком. Дребезжание окон, дверей, посуды. Скрип полов и стен. Начинается дрожание мебели. Висячие предметы слегка раскачиваются. Жидкость в открытых сосудах слегка колеблется. В стоящих на месте автомашинах толчок замечен.

б) -

в) -

5 баллов. *Пробуждение.*

а) Землетрясение ощущается всеми людьми внутри помещения, под открытым небом – многими. Многие спящие просыпаются. Немногие лица выбегают из помещений. Животные беспокоятся. Сотрясение зданий в целом. Висячие предметы сильно качаются. Картины сдвигаются с места. В редких случаях останавливаются маятниковые часы. Некоторые неустойчивые предметы опрокидываются или сдвигаются. Незапертые двери и окна распахиваются и снова захлопываются. Из наполненных открытых сосудов в небольших количествах выплескивается жидкость. Ощущаемые колебания схожи с колебаниями, создаваемыми падением тяжелых предметов внутри здания.

б) Возможны повреждения 1 степени в отдельных зданиях типа А.

в) В некоторых случаях меняется дебит источников.

6 баллов. *Испуг.*

а) Землетрясение ощущается большинством людей как внутри помещений, так и под открытым небом. Многие люди, находящиеся в зданиях, пугаются и выбегают на улицу. Немногие лица – теряют равновесие. Домашние животные выбегают из укрытий. В немногих случаях может разбиться посуда и другие стеклянные изделия; падают книги. Возможно движение тяжелой мебели; может быть слышен звон малых колоколов на колокольнях.

б) Повреждение первой степени в отдельных зданиях типа В и во многих зданиях типа А. В отдельных зданиях типа А повреждения 2 степени.

в) В немногих случаях в сырых грунтах возможны трещины шириной до 1 см; в горных районах отдельные случаи оползней. Наблюдаются изменения дебита источников и уровня воды в колодцах.

7 баллов. *Повреждение зданий.*

а) Большинство людей в страхе выбегают из помещений. Многие люди с трудом удерживаются на ногах. Колебания отмечаются лицами, ведущими автомашины. Звонят большие колокола.

б) Во многих зданиях типа В – повреждения 1 степени; во многих зданиях типа В – повреждения 2 степени. Во многих зданиях типа А – повреждения 3 степени, в отдельных зданиях этого типа – повреждения 4 степени. В отдельных случаях – оползни проезжих частей дорог на крутых склонах и трещины на дорогах. Нарушения стыков трубопроводов; трещины в каменных оградах.

в) На поверхности воды образуются волны, вода становится мутной вследствие поднятия ила. Изменяется уровень воды в колодцах и дебит источников. В немногих случаях возникают новые или пропадают существующие источники воды. Отдельные случаи оползней на песчаных или гравелистых берегах рек.

8 баллов. *Сильные повреждения зданий.*

а) Испуг и паника; испытывают беспокойство даже лица, ведущие автомашины. Кое-где обламываются ветви деревьев. Сдвигается и иногда опрокидывается тяжелая мебель. Часть висячих ламп повреждается.

б) Во многих зданиях типа В – повреждения 2 степени, в отдельных зданиях этой группы – повреждения 3 степени. Во многих зданиях типа В – повреждения 3 степени, в отдельных – 4 степени. Во многих зданиях типа А – повреждения 4 степени, в отдельных – 5 степени. Отдельные случаи разрыва стыков трубопроводов. Памятники и статуи сдвигаются. Надгробные камни опрокидываются. Каменные ограды разрушаются.

в) Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог; трещины в грунтах достигают нескольких сантиметров. Возникают новые водоемы. Иногда пересохшие колодцы наполняются водой или существующие колодцы иссыкают. Во многих случаях изменяется дебит источников и уровень воды в колодцах.

9 баллов. *Всеобщее повреждение зданий.*

а) Всеобщая паника; большие повреждения мебели. Животные мечутся и кричат.
б) Во многих зданиях типа *В* – повреждения 3 степени в отдельных – 4 степени. Во многих зданиях типа *Б* – повреждения 4 степени и в отдельных – 5 степени. Во многих зданиях типа *А* – повреждения 5 степени. Памятники и колонны опрокидываются. Значительные повреждения искусственных водоемов; разрывы части подземных трубопроводов. В отдельных случаях – искривление железнодорожных рельсов и повреждение проезжих частей дорог.

в) На равнинах наводнения, часто заметны наносы песка и ила. Трещины в грунтах достигают ширины 10 см, а по склонам и берегам рек – свыше 10 см; кроме того, большое количество тонких трещин в грунтах. Скалы обваливаются; частые оползни и осыпания грунта. На поверхности воды большие волны.

10 баллов. *Всеобщее разрушение зданий.*

а) Во многих зданиях типа *В* – повреждения 4 степени, а в отдельных – 5 степени. Во многих зданиях типа *Б* – повреждения 5 степени, в большинстве зданий типа *А* повреждения 5 степени. Опасные повреждения плотин и дамб, серьезные повреждения мостов. Легкие искривления железнодорожных рельсов. Разрывы или искривления подземных трубопроводов. Дорожные покрытия и асфальт образуют волнообразную поверхность.

б) Трещины в грунтах шириной несколько дециметров и в некоторых случаях – до 1 м. Параллельно руслам водных потоков появляются широкие разрывы. Осыпания рыхлых пород с крутых склонов. Возможны большие оползни на берегах рек и крутых морских побережьях. В прибрежных районах перемещаются песчаные и илистые массы; выплескивание воды в каналах, озерах, реках и т.д. Возникают новые озера.

11 баллов. *Катастрофа.*

б) Серьезные повреждения даже зданий хорошей постройки, мостов, плотин и железнодорожных путей; шоссейные дороги приходят в негодность; разрушение подземных трубопроводов.

в) Значительные деформации почвы в виде широких трещин, разрывов и перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях; многочисленные горные обвалы.

Определение интенсивности сотрясения (балльности) требует специального исследования.

12 баллов. *Изменения рельефа.*

б) Сильное повреждение или разрушение практически всех наземных и подземных сооружений.

в) Радикальные изменения земной поверхности. Наблюдаются значительные трещины в грунтах с обширными вертикальными и горизонтальными перемещениями. Горные обвалы и обвалы берегов рек на больших площадях. Возникают озера, образуются водопады; изменяются русла рек.

Определение интенсивности сотрясения (балльности) требует специального исследования.

3. Дополнения

Приводятся числовые характеристики колебаний (смещений, скоростей и ускорений) при землетрясениях различной интенсивности, дается краткая характеристика интенсивности землетрясений и сопоставляются интенсивности колебаний, классифицируемые различными шкалами.

Необходимо еще раз отметить, что шкала *MSK-64* справедлива для классификации сейсмически не укрепленных зданий.

Важные для Камчатки дополнения к шкале *MSK-64* были получены на материале обследования сильного 24.11.1971, $M = 7$ землетрясения, сопровождавшегося в г. Петропавловске-Камчатском и его окрестностях сотрясениями до 8 баллов [Сильные, 1975]. Имеющиеся данные о проявлении землетрясений на Камчатке показывают, что «человеческий» фактор в количественном отношении часто сильно превышает приведенные выше показатели – население постоянно находится в страхе перед сильным

землетрясением, паники возникают только при появлении слуха о возможности сильного землетрясения.

Прогнозирование землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство

Прогноз землетрясений. С целью предупреждения возможных последствий предпринимаются попытки предсказания землетрясений. В этом направлении намечены некоторые успехи, однако, практически важных результатов пока не достигнуто.

Единственный пока случай прогноза сильного землетрясения с эвакуацией населения из эпицентральной зоны был осуществлен в Китае.

Вокруг г. Хайченга были установлены приборы для регистрации наклонов земной поверхности, флуктуаций магнитного поля, изменений содержания хлора и радона в подземных водах. Анализировались и другие предвестники землетрясений – сейсмические (форшоки, рои), а также странные запахи, туман, повышение температуры почвы, свечение. Население просили отмечать изменение уровня воды в колодцах и сообщать о любых странностях в поведении животных. В районе разлома Чинжоу в провинции Ляонин дневная поверхность стала вздыматься в 20 раз быстрее обычного: за девять месяцев высота местности увеличилась примерно на 2,5 мм. Были замечены аномальные флуктуации геомагнитного поля, а также изменения высотных отметок вдоль побережья Ляодунского полуострова [Болт, 1981, с. 171-177; Соболев, 1993, с. 288-292].

С учетом всех этих событий общая тревога была объявлена 2 февраля 1975 г. в 14 часов. Были мобилизованы спасательные средства, закрыты магазины и учреждения, больные вынесены из клиник. Вечером в 19 часов 30 минут, спустя 5,5 часа после объявления тревоги, произошло катастрофическое землетрясение, в результате которого сильно пострадал г. Хайченг со стотысячным населением. Были разрушены сотни домов и фабрик, но погибло около тысячи человек [Гир, Шах, 1988, с. 202].

В 1976 г. в Китае вслед за Хайченгским землетрясением в реальном времени были последовательно предсказаны еще три землетрясения. Оперативный прогноз для каждого из них был сделан своевременно в период от нескольких часов до нескольких дней. Казалось бы, проблема прогноза землетрясений решена. Но прогноз катастрофического Тяньшанского землетрясения 21.07.1976 г., несмотря на наличие явных предвестников, сделан не был. В результате был полностью разрушен многомиллионный промышленный г. Тяньшань и по официальным данным погибло 243 тыс. человек [Гир, Шах, 1988, с. 110-113, 203]. По неофициальным оценкам иностранных специалистов потери при Тяньшанском землетрясении составило 650 тыс. человек погибшими при числе пострадавших до 780 тысяч. [Болт, 1981, с. 173-174]. Известны публикации, в которых сообщалось до одного миллиона погибших [Вокруг, 2007].

Такой может быть цена прогноза!

Как это не может показаться странным, но объективно наиболее благоприятные условия для решения проблемы прогноза землетрясений в настоящее время имеются именно в Петропавловске-Камчатском. Наш город и область за более чем 300-летнее «историческое» существование пережили большое количество природных катастроф. В то же время, с исследований времен первопроходцев и С.П. Крашенинникова был накоплен и преумножен уникальный опыт проведения научных исследований природных явлений и разработки конструкторских решений по сооружению сейсмостойких зданий и сооружений [Рекомендации, 1993]. В течение многих десятков лет в научных и научно-производственных учреждениях города и области проводятся работы по изучению камчатских землетрясений и извержений вулканов и созданы схемы прогноза их активности [Опыт, 1999].

При поддержке федеральных структур (МЧС РФ) на Камчатке действует прогнозный полигон, на котором в рамках утвержденных программ регулярно проводятся мероприятия по отработке мер защиты в результате сильного землетрясения.

Сама постановка проблемы прогноза землетрясений (и природных катастроф вообще) еще ждет своего времени.

Сейсморайонирование. ОСР. В настоящее время в значительно большей степени развито направление сейсмического районирования, т. е. разбиение территории на области с различной интенсивностью колебаний.

Для территории Камчатки такое районирование (общее сейсмическое районирование – ОСР) выполнялось многократно (рис. 3.3) [Проблемы...,2000]. Из данных, приведенных на этом рисунке, видно, что с увеличением наших знаний о сейсмическом процессе, допустимое картой ОСР значение наибольшей интенсивности колебаний почвы для территории г. Петропавловска-Камчатского, в среднем, один раз в двадцать лет увеличивалось на единицу: 7 баллов в 1938 г., 8 баллов в 1963 г., 9 баллов в 1978 г. и более 9 (10) баллов в 1997 г.

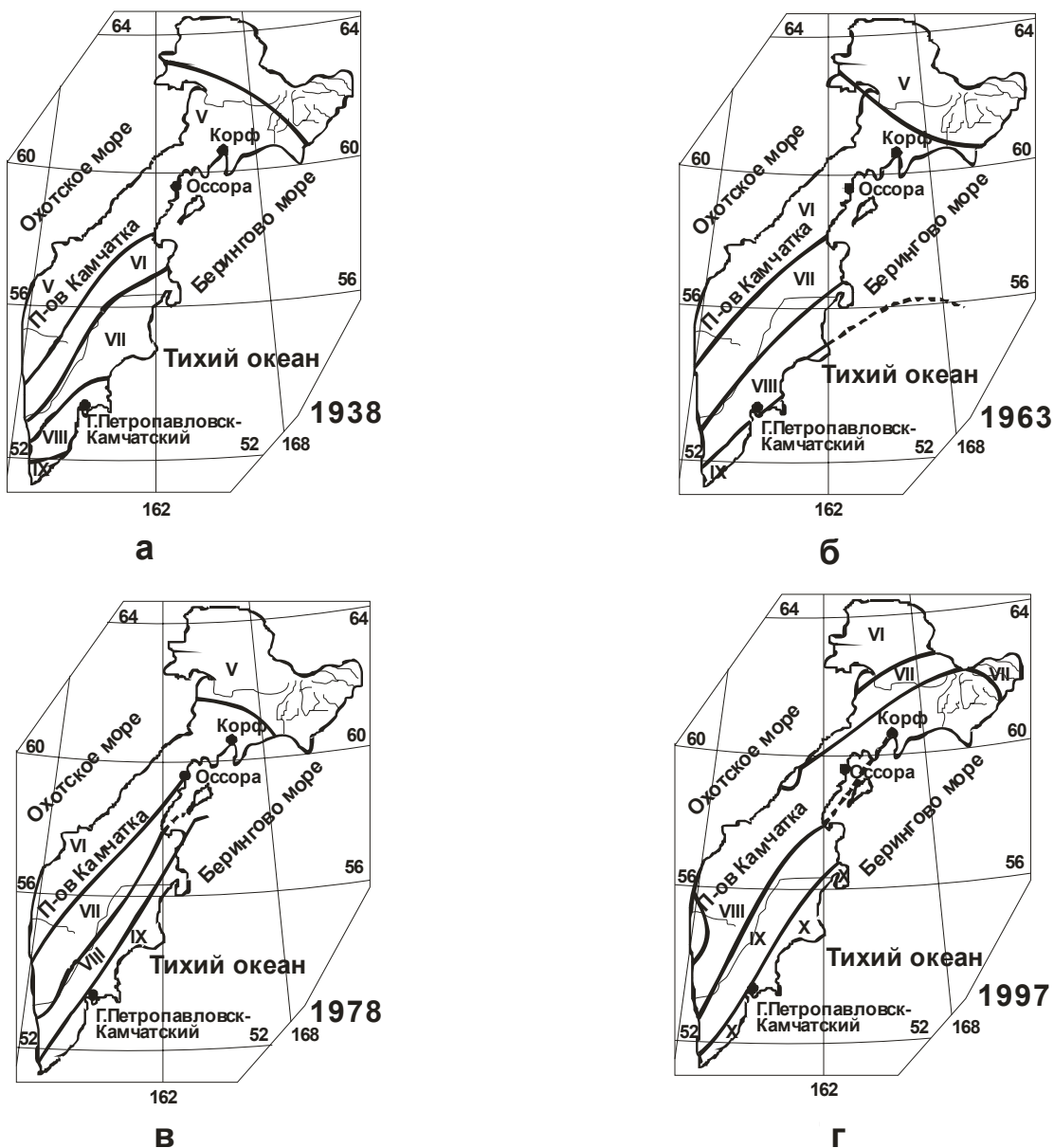


Рис.3.3.Карты общего сейсмического районирования (ОСР) территории Камчатки, построенные в 1938,1963,1978 и 1997 гг

В решении задачи сейсмического районирования территории большая заслуга принадлежит именно камчатским ученым: при составлении последней карты ОСР-97 была

использована новая методика, разработанная и доведенная до практического применения камчатскими учеными [Викулин, 1998; Викулин, Мелекесцев, 2006].

Новая для России методика расчета сотрясаемости была предложена сотрудником ИВиС ДВО РАН А.А. Гусевым и в ходе комплексных работ, выполняемых на территории Северной Камчатки в 1991-1996 гг. [Викулин, 1998; Викулин, Мелекесцев, 2006; Викулин, Дроздюк, Семенец, Широков, 1997, с. 15, 34-39] доведена до практического применения [Гусев, 2002, 2003; Гусев, Шумилина, 1995; Гусев, Петухин, 1996; Строительство, 2000; Уломов, Шумилина, 1998; Gusev et al., 1997]. Разработанная методика развивает принятую идеологию составления карт ОСР [Сейсмическая, 1979] и преодолевает слабые стороны такого подхода. В первую очередь, это использование как коротких рядов сейсмических наблюдений для описания долговременных характеристик сейсмического режима, так и гипотезы линейности графика повторяемости землетрясений при его экстраполяции в область максимально возможных магнитуд; использование в расчетах представлений об очаге как о точечном объекте; неучет разброса балла при заданных магнитуде и расстоянии и др. При построении карты проводилось разбиение территории на условно-однородные зоны и использовались полученные в ходе работ данные полевых геологических работ и результаты дешифрования аэрофотоснимков и космических изображений. Это позволило объединить выявленные в ходе геологических камеральных и полевых работ сейсмодислокации и сейсмообвалы [Егоров, 1996, 2008; Леонов, Егоров, 1998] с полученными ранее данными гравиметрических исследований [Зубин, Таракановский, 1976], глубинного строения [Мороз, 1987] и электропроводности [Мороз, 1991].

Следует отметить, что г. Петропавловск-Камчатский изначально строился с учетом антисейсмических мероприятий. И, как показало сильное ноябрьское землетрясение 1971 года [Сильные, 1975], здания и сооружения города являются, в целом, достаточно сейсмостойкими, что исключает в нашем городе трагедию типа Нефтегорской в 1995 г. Тем не менее, по инициативе С.А. Федотова в советское время было принято несколько исключительно важных для города и области и не имеющих аналогов в нашей стране Постановлений Правительства СССР, направленных на уменьшение сейсмической опасности [Федотов, 2004]. Как результат, с середины 90-х годов прошлого века в нашей области начала действовать федеральная программа «Сейсмозащита», в рамках которой здания и сооружения города и области усиливаются и по настоящее время, в том числе, по проектам, разработанным камчатскими специалистами [Рекомендации, 1993].

Сейсморайонирование. ДСР. МСР. С целью более тщательного районирования территории в случае сооружения на ней особо важных объектов (атомные электростанции, плотины, крупные холодильники, нефтехранилища и т. п.) проводится детальное сейсмическое районирование (ДСР) и микросейсмическое районирование (МСР). В соответствии с этими картами инженерами – строителями разрабатываются соответствующие сейсмостойкие конструкции, которые способны учесть специфику землетрясений и выдержать колебания соответствующей интенсивности [Сейсмическое..., 1977, 1980; Сейсмическая..., 1979].

Землетрясение, его очаг, гипоцентр, эпицентр, эпицентральное расстояние

Всякое землетрясение возникает вследствие внезапного высвобождения значительного количества энергии в некотором объеме внутри Земли. Как правило, при этом в некоторой области в теле Земли происходят разрушение и другие необратимые деформации горных пород. Область, в пределах которой происходит высвобождение накопленной упругой энергии, называется *очагом землетрясения*, проекция очага на дневную поверхность – *эпицентральной областью землетрясения*. Точка, в которой начинается процесс выделения сейсмической энергии, называется *гипоцентром землетрясения*, его проекция на дневную поверхность – *эпицентром землетрясения*. Расстояние вдоль земной поверхности от эпицентра до наблюдателя (сейсмической станции) называется *эпицентральным расстоянием*, которое измеряется в километрах или

в градусах дуги Δ большого (с центром в центре Земли) круга. При этом расстояние, соответствующее одному градусу дуги, определяется из соотношения:

$$360^{\circ} = 2\pi R_0; 1^{\circ} = 111,14 \text{ км},$$

где, как и выше, $R_0 \approx 6371 \text{ км}$ – средний радиус Земли.

В случае неглубокого сильного землетрясения, когда на поверхности Земли появляется трещины и разломы и/или в районе эпицентра располагается достаточно густая сеть населенных пунктов, в которых возможно определение интенсивности колебаний, область очага и/или эпицентральной области выявляется достаточно надежно.

Вне очага землетрясения деформации носят преимущественно характер упругих колебаний, распространяющихся от него по законам упругих сейсмических волн. К таким волнам применяются обычные понятия фронта и луча. Поверхность, во всех точках которой плотность потока сейсмической энергии одинакова, называется изосейсмической. Пересечение изосейсмических поверхностей с поверхностью Земли образуют линии, называемые *изосейстами*.

При расхождении от очага землетрясения сейсмическая энергия распределяется на все большую поверхность. Это ведет к уменьшению плотности потока сейсмической энергии с увеличением расстояния r от гипоцентра. Явление это называется геометрическим расхождением. В однородном изотропном полупространстве для значительно превосходящего размеры очага r расхождение волн изменяется по закону $1/r^2$, для распространяющейся в плоском слое цилиндрической волны – по закону $1/r$. Фактически, вследствие неоднородности Земли, наличия особенностей излучения из очага, поглощения энергии в процессе внутреннего трения, рассеяния энергии волны на различных неоднородностях и границах, спад плотности потока сейсмической энергии происходит по более сложному закону. Для однородной изотропной Земли при значительном удалении от очага изосейсмические поверхности с хорошим приближением можно считать сферами, а изосейсты – окружностями.

Сильное землетрясение часто предваряется и/или сопровождается достаточно большим количеством толчков, гипоцентры (эпицентры) которых располагаются вблизи гипоцентра (эпицентра) главного толчка. Частота повторения сопровождающих сильное землетрясение толчков во много раз превышает обычный «фоновый» режим и изменяется по закону *Омори*: сразу после сильного землетрясения частота афтершоков велика и с течением времени она выходит на «фоновый» режим по гиперболическому закону [Викулин, 2003, с. 20-23]. Сопровождающие сильное землетрясение толчки называются *форшоками* и *афтершоками* соответственно. Отличительной особенностью форшоков и афтершоков является их «компактное» сгущение в пределах примыкающей к гипоцентру (эпицентру) главного толчка области, которая, по сути, также может рассматриваться как очаг (очаговая область) землетрясения (рис. 3.4а, б, в). На рис. 3.4б представлена афтершоковая область Большого Камчатского землетрясения 4.11.1952, $M = 8,5$ ($M_w = 9,0$), которая представлена двумя скоплениями афтершоков, разделенными друг от друга «пустой» областью протяженностью 150 км не содержащей ни одного афтершока. Показано, что это землетрясение представляло собой два толчка (дуплет), происшедшие с интервалом около 5 с, каждому из которых соответствовала своя афтершоковая область (Викулин, 2003, с. 14, 45-48, 64-65).

Часто имеют место следующие «связки» событий: форшоки происходят вблизи гипоцентра главного толчка, а наиболее сильный афтершок, наоборот - на другом конце очага (рис. 3.4б). При этом может выполняться *правило Бота*: магнитуда наиболее сильного афтершока не превышает величины, на две десятых меньшей магнитуды главного толчка.

Размеры очага, определенные по выявленным на поверхности Земли нарушениям или по сгущению форшоков и афтершоков, как правило, пропорциональны магнитуде

главного толчка. Его большие (протяженность) L и меньшие (поперечные) D размеры определяются следующими соотношениями [Викулин, 2003, с. 14-18; Ризниченко, 1985, с. 10-33]:

$$\lg L [\text{км}] = 0,4 \cdot M - 1,0, \quad D \approx 1/2 \cdot L$$

и для землетрясений с магнитудами $M = 5, 6, 7, 8$ достигают размеров $L \approx 10, 20-30, 50-60, 100-200$ км соответственно.

Очаги шести сильнейших землетрясений 1929 - 1965 гг. с $M = 7,9 - 8,5$ в районе Алеутских островов – Аляски не зависят от магнитуды и имеют примерно одинаковые протяженности [Викулин, 2003, с. 14-18]:

$$700 \text{ км} \leq L \leq 1300 \text{ км}; \quad L \approx 1000 \pm 300 \text{ км}.$$

Аномальную протяженность имеют и очаги других наиболее сильных землетрясений: Чилийского 20.05.1960, $M = 8,3$: $L = 1000-2000$ км, и Суматра 24.12.2004, $M = 9,0$: $L = 1200-1300$ км. Все эти землетрясения имеют одну особенность: их моментная магнитуда M_W (см. далее) достигает наибольших значений $M_W = 9,0-9,5$.

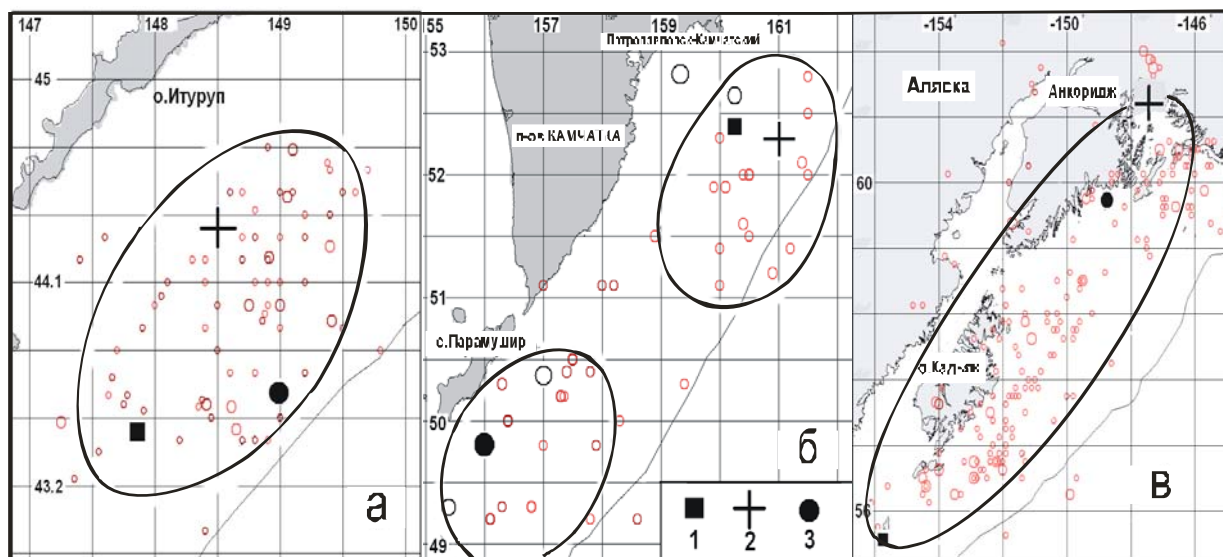


Рис. 3.4. Очаги сильнейших Итурупского 6.11.1958, $M = 8,2$ (а), Большого Камчатского 4.11.1952, $M = 8,5$ (б) и Аляскинского 28.3.1964, $M = 8,3$ (в) землетрясений, определенные по форшокам и афтершокам с $M \geq 5$ (а), $M \geq 6$ (б) и $M \geq 5$ (в) первого года. 1 – эпицентры наиболее сильных форшоков: 21.07.1958, $M = 6,3$ (а), 4.04.1952, $M = 6,8$ (б) и 6.02.1964, $M = 6,9$ (в); 2 – эпицентры главных толчков; 3 – эпицентры наиболее сильных афтершоков: 12.11.1958, $M = 7,5$ (а), 5.01.1953, $M = 7,0$ (б) и 30.03.1964, $M = 6,6$ (в). Толстой линией обведена граница очага, тонкой обозначена ось глубоководного желоба.

Видно, что формы очагов достаточно сильных землетрясений могут быть аппроксимированы эллипсами или овалами. Следовательно, изосейсты – линии, вдоль которых интенсивности сотрясений будут иметь одинаковые значения, в областях, примыкающих к очагам таких землетрясений, также будут представлять собой замкнутые линии по форме близкие к эллипсам или овалам.

Очаги землетрясений (рис. 3.4), определяемые по скоплению афтершоков, японским ученым К. Моги были названы *сейсмическими брешиами первого рода* [Моги, 1988, с. 93-97]. Такие очаги, определенные для наиболее сильных землетрясений, обладают свойством не перекрывать друг друга в пространстве в течение определенного

отрезка времени, названного в 1965 г. С.А. Федотовым [2005] сейсмическим циклом [Викулин, 2003, с. 18-20, 41-42]. Свойства сейсмического цикла С.А. Федотовым было предложено использовать с целью прогноза времени сильнейших землетрясений в пределах сейсмических брешей первого рода [Викулин, 2003, с. 52-55; Федотов, 2005].

Сейсмические дыры [Викулин, 2003, с. 25-32]. Из общих соображений, основанных на теории прочности, ясно, что гипоцентр является физически объяснимой точкой, в окрестности которой сбрасываемые при землетрясении напряжения и их градиенты достигают максимальных значений. Поэтому естественно предположить, что *вблизи гипоцентра* существует область, в пределах которой напряжения и их градиент сначала «накапливаются» до максимальных значений и затем практически полностью «сбрасываются» при главном толчке. Другими словами, вблизи гипоцентра должна существовать область, в пределах которой в течение определенного времени как до, так и после землетрясения наблюдается минимум сейсмической активности, включая и минимум числа форшоков и афтершоков. Такие области сейсмического затишья – *сейсмические дыры*, или по К. Моги [1988, с. 110-118] – *сейсмические брешии второго рода*, были выявлены в эпицентральных областях землетрясений во всех регионах планеты.

Размеры сейсмических дыр, как и очагов землетрясений, также пропорциональны магнитудам. При магнитудах главных курило-камчатских землетрясений $M = 5$ и 8 протяженности соответствующих им сейсмических дыр равны $l = 10-15$ и $50-60$ км соответственно. Их поперечные размеры d удовлетворяют соотношению $d \approx l/2$. Оказалось, что сейсмические дыры друг относительно друга в пределах сейсмофокального блока располагаются закономерным образом, как и очаги сильнейших землетрясений в пределах островной дуги или всего пояса - не перекрывая друг друга.

На рис. 3.4в представлена афтершоковая область Аляскинского землетрясения 28.03.1964, которая «отделена» от эпицентра главного толчка $M = 8,3$ «пустой» областью протяженностью $50-60$ км – сейсмической дырой.

Видим, что при магнитудах $M \approx 5$ размеры сейсмических брешей первого и второго рода становятся равными друг другу $L_{M=5} \approx l_{M=5} = l_0 \approx 10 - 20$ км. Это позволяет предположить существование «элементарного» сейсмофокального блока l_0 , который может рассматриваться как минимальный пространственно-временной детерминированный «кирпичик» сейсмического процесса.

Землетрясения Луны и Марса [Пузырев, 1997, с. 86-87]

Первые сейсмографы на Луне были установлены в 1969 г. с американского космического корабля «Аполлон». За нескольких полетов корабля было установлено пять низкочастотных сейсмографов с периодами 2.2 и 15 с, разнесенных на расстояние до 1000 км друг от друга. Регистрирующая аппаратура позволяла передавать сейсмические сигналы на Землю в цифровом виде. Станции работали до 1977 г., регистрируя ежегодно от 600 до 3000 событий. Подавляющее число толчков имели магнитуду менее двух.

Зарегистрированные лунотрясения разделяются на три группы: приливные с глубиной очагов 800-1000 км, тектонические с глубинами, в среднем, 25-200 км и толчки от падения метеоритов различной массы.

Сейсмограммы для всех типов лунотрясений имеют близкий друг другу облик. Главная их особенность, отличающая их от земных, состоит в большой протяженности записи и слабым затуханием колебаний со временем. При регистрации на относительно высокочастотной аппаратуре на ряде сейсмограмм удалось выделить вступления продольных, поперечных и обменных волн. На лунных сейсмограммах не удалось выделить поверхностных волн. Возможно, что это связано с тем, что они «маскируются» резонансными колебаниями.

Сейсмическая аппаратура на Марс была доставлена спускаемым аппаратом «Викинг» в 1976 г. К сожалению, сейсмографы не удалось выгрузить на грунт, и они остались в модуле. Поскольку на Марсе дуют сильные ветры, то при регистрации, которая продолжалась три месяца, трудно было выделить сейсмические сигналы на очень высоком фоне помех. Тем не менее, применение различных способов селекции позволило обнаружить только одно событие, которое с достаточно большой степенью вероятности можно отнести к марсотрясению. Предполагается, что регистрация такого марсотрясения произошла в период такого затишья. На сейсмограмме идентифицированы вступления продольных и поперечных волн, по которым удалось оценить эпицентрального расстояние в 110 км и магнитуду, равную 3. Предполагается, что соответствующий очаг относится к тектоническому типу. Важно отметить, что, в целом, структура марсотрясения сопоставима с таковой для землетрясения.

Характер деформаций в очаге по теории упругой отдачи и за его пределами

18 апреля 1906 г. вблизи г. Сан-Франциско (США) произошло памятное для мировой сейсмологии землетрясение: его исследование привело к формулировке теории, являющейся фундаментом всех основополагающих моделей процессов в очаге землетрясения до настоящего времени [Линьков, 1987, с. 9].

Это землетрясение произошло в густонаселенном районе. Значительные деформации поверхности грунта, наблюдавшиеся в течение продолжительного времени до землетрясения, и деформации, имевшие место сразу после землетрясения, в деталях были отмечены и зафиксированы многими наблюдателями, что впоследствии позволило их достаточно наглядно проинтерпретировать в рамках простой модели.

«Грандиозное землетрясение и пожар. Магнитуда составила $M_S = 8,3$. Интенсивность сотрясений до XI баллов (по 12-балльной американской шкале Меркалли, близкой шкале *MSK-64* – А.В.). Сильнейшие разрушения в Сан-Франциско и в Санта-Розе. Разлом Сан-Андреас вспоролся на протяжении 430 км. Горизонтальное смещение по разлому Сан-Андреас достигало 6,5 м» [Болт, 1981, с. 223; Гир, Шах, 1988, с. 198]. «При землетрясении прошло больше минуты, пока разлом Сан-Андреас вспоролся более чем на 200 км от гипоцентра в графстве Мэрин к югу через полуостров Сан-Франциско до точки южнее г. Сан-Хуан-Баутиста. Видим, что источником, или очагом, землетрясения является не только точка гипоцентра, но и движущийся фронт вспарывания разлома, и это объясняет, почему сильные землетрясения длятся гораздо дольше, чем слабые» [Гир, Шах, 1988, с. 86-87]. «На небольшом расстоянии к югу от Сан-Хуан-Баутиста смещение по разлому постепенно уменьшалось до нескольких сантиметров и затем полностью затухло. ... Когда составили карту силы сотрясения, стало ясно, что зона интенсивных колебаний грунта имеет (сильно – А.В.) вытянутую форму, небольшую ширину» и располагается вдоль разлома Сан-Андрес с обеих его сторон [Болт, 1981, с. 32].

Следует отметить, что примерно за полвека до Сан-Францисского землетрясения, 9.01.1857 г. примерно в том же месте, в Форт-Техон, произошло одно из сильнейших ($M_S = 8,3$) землетрясений Тихоокеанского побережья Америки в историческое время. «Разлом Сан-Андреас вспоролся на протяжении более 400 км; смещения вдоль разлома достигали 9 м. Разрушены постройки, повалены большие деревья» [Болт, 1981, с. 197; Гир, Шах, 1988, с. 35, 197]. Как видим, по своему проявлению землетрясение в Сан-Франциско в значительной степени повторяло землетрясение в Форт-Техоне, что убеждало и продолжает убеждать исследователей этих землетрясений и их последователей в универсальном характере последствий землетрясений в Сан-Франциско и в Форт-Техоне, присущим всем землетрясениям вообще.

Смещения поверхности грунта при Сан-Франциском землетрясении 1906 г. схематично изображены на рис. 3.5. На этом рисунке прямыми *AA* и *BB* представлены разлом Сан-Андреас и дорога, пересекавшая разлом задолго (примерно за 50 лет) до

землетрясения, соответственно; кривой $B'OB'$ - дорога непосредственно перед землетрясением; двумя отрезками прямых линий $B'b'$ - дорога сразу после землетрясения и стрелками - направления, вдоль которых переместились примыкающие к разлому блоки I (слева) и II (справа). На этом же рисунке двумя кривыми b/B в координатных осях XU схематично изображено изменение величины горизонтальных перемещений вдоль оси OX (поперек разлома Сан-Андреас, прямой AA), амплитуда перемещений Ob' , как отмечено выше, достигала 6,5 м.

Такие данные позволили исследователю Сан-Францисского землетрясения Ф. Рейду [Reid, 1910] сформулировать следующие основные положения, заложенные им в основу *теории упругой отдачи* [Линьков, 1987, с. 9]:

1. Разрыв сплошности горных пород, вызывающий землетрясение, наступает в результате накопления упругих деформаций выше предела, который может выдержать горная порода. Деформации возникают при перемещении блоков земной коры друг относительно друга.

2. Относительные перемещения блоков нарастают постепенно.

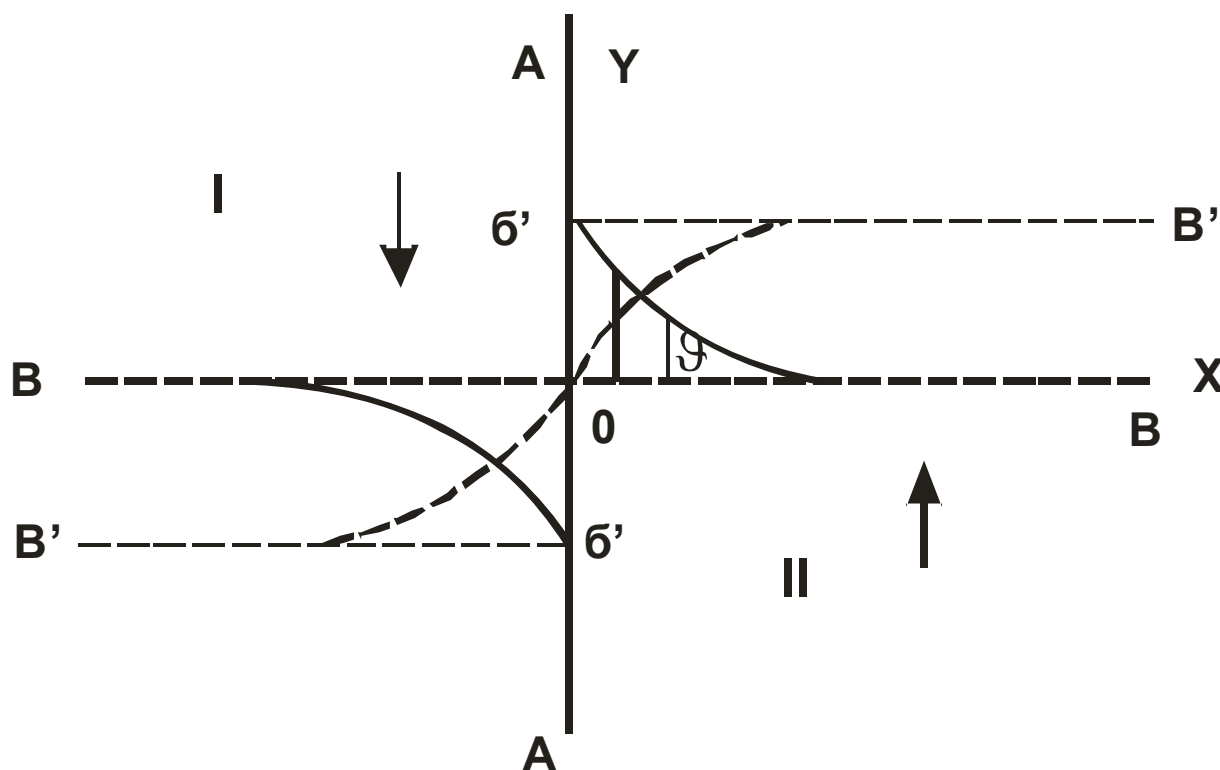


Рис. 3.5. Схема, поясняющая механизм упругой отдачи. Обозначения в тексте

3. Движение в момент землетрясения является только упругой отдачей: резкого смещения сторон разрыва в положение, в котором отсутствуют упругие деформации.

4. Сейсмические волны возникают на поверхности разрыва - сначала на ограниченном участке, затем площадь поверхности, с которой излучаются волны, растет, но скорость ее роста не превосходит скорости распространения сейсмических волн. Энергия, освобожденная во время землетрясения, перед ним была энергией упругой деформации горных пород.

5. Энергия, освобожденная во время землетрясения, перед ним была энергией упругой деформации горных пород.

Путем непосредственных измерений были получены до сих пор довольно немногочисленные данные о величинах подвижек вблизи видимых на поверхности разрывов, вскрывшихся при катастрофических землетрясениях. На рис. 3.6, например,

приведена карта векторов смещений, зарегистрированных при землетрясении в районе Танго (Япония) в 1927 г.

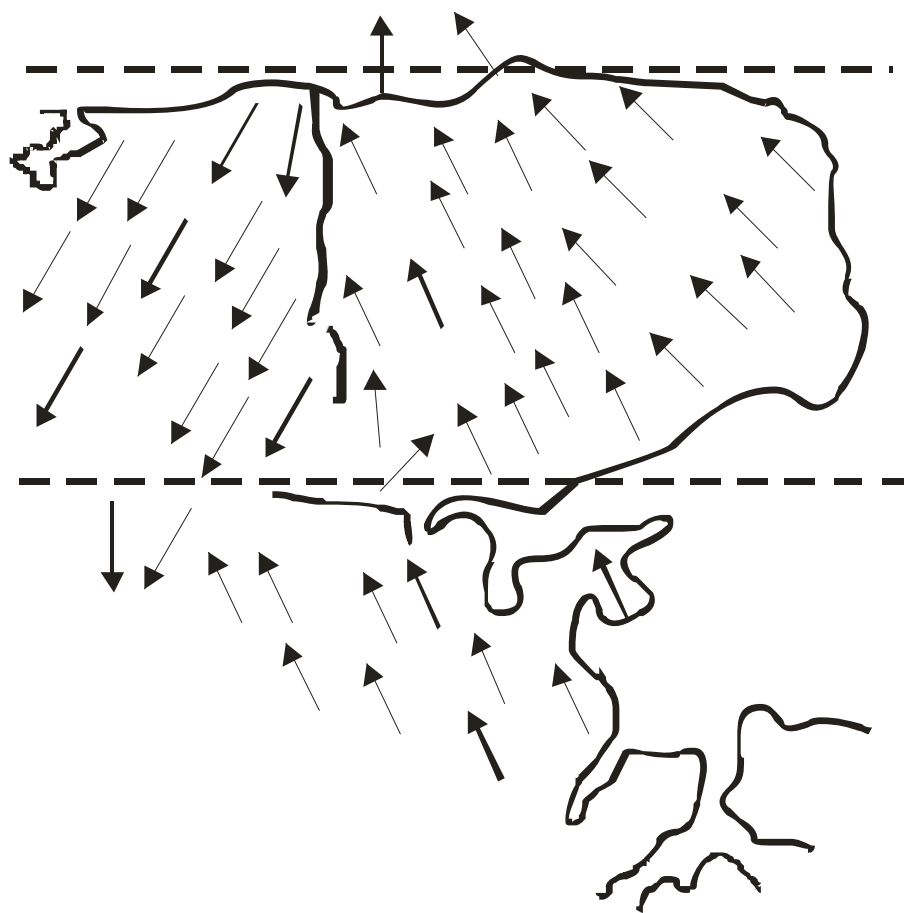


Рис. 3.6. Векторы смещений поверхности грунта (стрелки) и положение разломов Гомура и Ямада (жирные вертикальная и горизонтальная линии) в очаге землетрясения Танго (Япония) в 1927г. [Рикитакэ, 1979, с. 86-88].

Изменение значений экспериментально определенных величин горизонтальных смещений поперек разлома Гомура количественно в точности совпадает с «экспоненциальными» кривыми Bb' на рис. 3.5 при наибольшей величине перемещения на разломе Ob' до 1,5 - 2 м и спаданием их до нуля на расстоянии около 30-40 км от разлома.

Энергия землетрясения [Пузырев, 1997, с. 81-84]

Интенсивность колебаний I в эпицентральной области, хотя и связана с характеристиками очага, не может считаться его энергетическим параметром по причине некоторой субъективности макросейсмических шкал и неучета ими глубин очагов землетрясений.

В сейсмологической практике энергетическая величина землетрясения оценивается с помощью трех параметров: магнитуды (M), энергии (E) и сейсмического момента (M_0). Первые два из них являются объективными величинами не связанными непосредственно с той или иной моделью очага. В то время как третья определяется на основании того, что тектоническое землетрясение представляет собой подвижку определенной массы земной коры вдоль некоторой поверхности.

Наиболее распространен параметр M , принятый во всех странах мира под названием шкалы Рихтера.

Согласно [Ванек, Кондорская, Христосков, 1980], основные принципы магнитудной шкалы в 1935 г. впервые были четко сформулированы и успешно применены для инструментальной классификации близких землетрясений Калифорнии Ч. Рихтером [Richter, 1935]. Построения Ч. Рихтера основывались на следующих результатах предшественников.

В 1915 г. Б.Б. Голицын [1960] и затем в 1923 г. Г. Джеффрис [Jeffreys, 1923] создали методы для определения энергии упругих волн, излучаемых из очагов землетрясений, по записям на сейсмограммах поверхностных и объемных волн.

Идея Б.Б. Голицына определения энергии землетрясения, по сути, является «точечной» [Ризниченко, 1985, с. 11]. В пункте наблюдения определяется плотность энергии поверхностных сейсмических волн, приходящаяся на единицу длины фронта. Она интегрируется по всему фронту с центром в очаге, как в «точечном» источнике сейсмической радиации с круговой симметрией. С учетом поглощения волн в среде в результате получается энергия очага, излученная им в волны данного типа. Это рассуждение было обобщено Г. Джеффрисом на объемные волны.

Существенные результаты по изучению энергии землетрясений, амплитуд и затухания объемных сейсмических волн были получены несколько позже Г. Джеффрисом [Jeffreys, 1926, 1931]. Интересные исследования амплитудного поля близких землетрясений в связи с изучением механизма глубоких очагов района Японии были проведены Г. Кавасуми [Kawasumi, 1934]. Следует отметить работу К. Вадати [Wadati, 1931], в которой по выражению самого Ч. Рихтера, была подсказана методика построения магнитудной шкалы. К. Вадати строил графики зависимости амплитуды колебаний почвы от эпицентрального расстояния и применил их для распознавания неглубоких и глубоких землетрясений, вычисляя при этом коэффициенты затухания волн из очагов нескольких сильных землетрясений и одновременно проводя сравнения их интенсивностей.

Введенная таким образом величина M , названная по предложению Вуда [Richter, 1935] магнитудой (magnitude), определяется из следующего простого уравнения:

$$M = \log A - \log A_0,$$

где A – максимальная амплитуда на записи стандартного сейсмографа для данного землетрясения на определенном эпицентральном расстоянии, A_0 – максимальная амплитуда на записи того же сейсмографа для землетрясения, выбранного как эталонное для того же эпицентрального расстояния.

Выражение $\log A_0$ – есть, по сути, калибровочная функция, определяемая экспериментальным путем; она представляет собой изменение десятичного логарифма максимальной амплитуды с расстоянием для эталонного землетрясения с магнитудой $M = 0$. Для определения уровня калибровочной функции Ч. Рихтер принял, что для эталонного землетрясения максимальная амплитуда на записи стандартного сейсмографа на расстоянии $\Delta = 100$ км от источника равняется 0,001 мм [Richter, 1935]. На основании этого определения за магнитуду землетрясения принимается логарифм максимальной амплитуды сейсмической волны на записи (в микронах смещения почвы), которая была бы зарегистрирована стандартным короткопериодным сейсмографом, если бы он был установлен на эпицентральном расстоянии 100 км.

Впервые в 1936 г. В. Гутенберг и Ч. Рихтер [Gutenberg, Richter, 1936] показали принципиальную возможность определения магнитуд удаленных землетрясений на основании изучения изменения максимальных амплитуд поверхностных волн с эпицентральным расстоянием. Впоследствии Б. Гутенберг опубликовал почти

одновременно работы по методическим основам определения магнитуды как для поверхностных [Gutenberg, 1945a], так и для объемных сейсмических волн [Gutenberg, 1945b, c]. По своей сущности эти работы являются основополагающими для классификации землетрясений по величине их магнитуды на телесейсмических расстояниях.

В настоящее время для расчета магнитуд по объемным и поверхностным волнам в России и странах СНГ используется формула:

$$M = \log\left(\frac{A}{T}\right)_{\max} + \sigma(\Delta, h) + \sum \delta M, \quad (3.1)$$

где $A_{\max}$ - максимальная амплитуда в волне, $T_{\max}$ - максимальный период в секундах, $\sigma(\Delta, h)$ - калибровочная функция, определяемая на основе статистической обработки данных для землетрясений, магнитуды которых достаточно надежно определены. Последний член в (3.1) представляет поправку к магнитуде, учитывающую как локальные условия расположения той или иной сейсмической станции, так и специфику очагов землетрясений.

В случае нормальных по глубине очагов землетрясений и наличия на сейсмостанции регистрирующего канала, осуществляющего запись сейсмических сигналов в пределах достаточно широкополосного диапазона, σ для объемных P - и S -волн изменяется в пределах 6 - 7 при $20^\circ \leq \Delta \leq 90^\circ$. При использовании поверхностных волн функция $\sigma(\Delta)$ в тех же пределах Δ изменяется в пределах 5,5 - 6,6. Что касается зависимости σ от глубины очага h , то она носит достаточно сложный характер, причем для отдельных интервалов Δ она имеет существенно различный вид. Для каждой сейсмоактивной области калибровочная функция может видоизменяться по мере накопления экспериментальных данных.

Упругая энергия, выделяющаяся в очаге

Впервые способ определения энергии землетрясения по записям упругих волн на сейсмограмме был предложен в 1915 г. Б.Б. Голицыным [1960, с. 365-370]. Достаточно подробно он воспроизведен в работе [Саваренский, Кирнос, 1955]. Суть вычислений энергии землетрясения, согласно [Пузырев, 1997], сводится к следующему.

Если E_Δ представляет собой энергию объемной волны, приходящуюся на единицу площади на эпицентрального расстояния Δ , то энергию E в очаге, в случае его небольшой глубины, можно оценить, исходя из соотношения:

$$E_\Delta = \frac{E}{2\pi\Delta^2} e^{-k\Delta}, \quad (3.2)$$

где первый сомножитель определяет затухание волн с эпицентрального расстоянием Δ , а экспоненциальный множитель их поглощение, k – коэффициент поглощения волны в среде. Величина E_Δ , являясь плотностью кинетической энергии, протекающей в единицу времени «через» пункт наблюдения, равна:

$$E_\Delta = 1/2 \rho c^2 v, \quad (3.3)$$

где ρ - плотность среды, c – скорость движения частиц среды в волне, v – скорость распространения волны (V_P - продольной, V_S - поперечной или V_R – поверхностной, в зависимости от того, по каким волнам определяется значение энергии). В предположении

синусоидальных колебаний с частотой f и амплитудой a , величина скорости c может быть представлена в виде

$$c = 2\pi af. \quad (3.4)$$

Решая уравнение (3.2) относительно E , принимая во внимание два последних соотношения (3.3) и (3.4) и предполагая, что процесс длится в течение времени t , окончательно получаем:

$$E = 4\pi^3 \rho v \Delta^2 f^2 t e^{k\Delta}. \quad (3.5)$$

Если колебания носят более сложный характер, то вместо выражения $a^2 f^2 t$, очевидно, следует рассматривать сумму $\sum a_i^2 f_i^2 t$, в которой суммирование проводится по каждому колебанию на сейсмограмме.

Вычисления могут быть проведены и для поверхностных волн Рэлея (V_R). При этом следует воспользоваться известным свойством поверхностных волн, согласно которому подавляющая часть их энергии сосредоточена в приповерхностном слое Земли мощностью, равной длине волны λ . Исходные предпосылки в этом случае, в целом, остаются такими же, как и в рассмотренном выше случае объемной волны. Необходимо только учесть, что E_Δ в случае поверхностной волны обратно пропорциональна не второй степени эпицентрального расстояния Δ , как в случае объемных волн (3.2), а первой степени Δ . Окончательная формула для величины энергии волны, определяемой по поверхностным волнам, в случае ее длительности t и записи в произвольной форме, имеет вид:

$$E = 4\pi^3 \rho v \Delta e^{k\Delta} \sum a_i^2 f_i^2 \lambda t. \quad (3.6)$$

Энергетический класс

Энергия землетрясения может выражаться в эргах и в джоулях. В случае, если энергия выражается в джоулях, может быть определена величина $\lg E_{\text{Дж}} = K$, где K – энергетический класс землетрясения. Магнитуда, введенная Ч. Рихтером в 1935 г. для калифорнийских землетрясений, по сути, являлась энергетическим классом. Энергетический класс K вычисляется только для близких землетрясений с эпицентральным расстоянием до 1500 км. На практике нередко вместо непосредственного использования приведенных формул расчеты проводятся по эмпирическим зависимостям. При этом величина K относится к поверхности референц-сферы с радиусом 10 км от гипоцентра. Последнее условие, естественно, приводит к ограничению рассчитанных величин K приблизительно до 15-16.

Энергетические величины M и K не являются полностью независимыми и связаны между собой с помощью корреляционных соотношений. Среди наибольшего количества таких соотношений, полученных при различных выборках, наиболее часто используется следующая зависимость:

$$K = 4 + 1.8M. \quad (3.7)$$

Попутно отметим, что интенсивность I колебаний в эпицентральной зоне также связана с магнитудой. Для количественной характеристики макросейсмического поля часто используется следующее соотношение:

$$I = 1.5M - 3.5 \lg R + 3.0, \quad (3.8)$$

где R – гипоцентрально расстояние.

Зависимости (3.7) и (3.8) имеют достаточно высокий коэффициент корреляции – порядка 0.9.

Для камчатских землетрясений соотношение между магнитудой и классом [Викулин, 1983] и классом и магнитудой [Сейсмическая, 1979, с. 155-172] выражаются следующим образом:

$$M = 0,74K_{F68} - 4.00, \quad (3.8)$$

$$K_{F68} = 4.6 + 1.5M, \quad (3.9)$$

где K_{F68} - энергетический класс, введенный С.А. Федотовым в практику сейсмологических исследований на Камчатке в 1968 г. [Федотов, 1972]. Уравнения макросейсмического поля для камчатских землетрясений имеют следующий вид [Сейсмическая, 1979, с. 155-172]:

$$I = -2.1 + K_{F68} - 2.62 \lg R - 0.0087R, \quad (3.10-1)$$

$$I = 2.5 + 1.5M - 2.63 \lg R - 0.0087R. \quad (3.10-2)$$

Зависимость между размерами очага и количеством выделившейся в нем энергии

Важной характеристикой очага землетрясения являются его размеры и связь последних с энергетическими параметрами. Естественно ожидать, что чем больше выделяется энергии при землетрясении, тем больше размеры его очага. По имеющимся оценкам, которые нельзя считать строгими, размеры очагов (гипоцентральных областей) для слабых толчков, по-видимому, не превышают нескольких тысяч кубических метров. О размерах очагов очень крупных, особенно катастрофических, землетрясений можно судить по наблюдаемым при этом разрывам сплошности земной поверхности, которые нередко протягиваются на сотни километров. В этом случае, скорее всего, следует говорить не столько об объеме очага (гипоцентральной области), сколько о линейных размерах нарушений. В случае таких больших землетрясений иногда бывает трудно строго определить центральную точку очага (гипоцентр, в которой начинается процесс выделения упругой энергии) и, следовательно, ее проекцию на земную поверхность - эпицентр.

В соответствии с мировой зависимостью, размеры очага землетрясения L , измеряемые в км, с его магнитудой M связаны соотношением [Ризниченко, 1985, с. 27-30]:

$$\lg L[\text{км}] = 0.44M - 1.29. \quad (3.11)$$

Для наиболее сильных ($M \geq 7$) землетрясений Японии, Курильских островов, Камчатки и Алеутских островов – Аляски зависимость $L(M)$, в соответствии с данными в [Викулин, 2003, с. 14-15], является близкой (3.11):

$$\lg L[\text{км}] = 0.39M - 1.00, \quad (3.12)$$

при этом размеры очагов алеутских сильнейших ($M \geq 7.9$) землетрясений оказались независимыми от магнитуды и, как отмечалось выше, равными:

$$L [\text{км}] \approx 1000 \pm 300 \text{ км.} \quad (3.13)$$

Сейсмический момент M_0

Если говорить о механизме очага, то следует считать доказанным, что его нельзя рассматривать как центр давления, например, взрыва, так как в этом случае в любой точке вокруг источника, в том числе на поверхности Земли, наблюдалась бы только продольная волна сжатия. Кроме того, при сферическом источнике не должны наблюдаться столь устойчивые и интенсивные поперечные волны, которые по всюду отмечаются при землетрясениях. Еще в 20-х гг. прошлого столетия японскими учеными установлено, что направления колебаний во вступлениях первой продольной волны в различных азимутах не остаются постоянными. Другими словами, сейсмографами регистрируются как волны сжатия, так и волны растяжения.

Теоретические расчеты показывают, что излучение из очага землетрясения волн сжатия и растяжения возможно в том случае, если в источнике происходит перемещение двух блоков относительно друг друга по некоторой поверхности, которую в первом приближении можно считать плоскостью. Движение осуществляется в виде вспарывания шва с наличием как вертикальных, так и горизонтальных подвижек (дислокаций). При этом скорость вспарывания не может превышать скорости распространения поперечных волн в среде. Отметим, что вертикальные и горизонтальные подвижки в эпицентральных зонах достаточно сильных землетрясений часто можно наблюдать визуально (см. далее, рис. 3.5 и 3.6). Обширная система трещин шириной до 10 см в грунте и на асфальте в районе рыбного порта в г. Петропавловске-Камчатском образовалась 24.11.1971 г. после землетрясения, с очагом, расположенным под городом на глубине $H = 100\text{--}120 \text{ км}$.

В процессе таких подвижек вдоль плоскостей, разделяющих блоки земной коры, за счет сил сухого трения возникают напряжения, которые можно имитировать в виде двух ортогональных пар сил без момента, причем одна из пар отражает сжимающие усилия, другая – растягивающие. Эти силы направлены под углом 45° к плоскости разрыва (главные оси напряжений), проекция которой совпадает с осью OZ . Если теперь из центра площадки разрыва провести сферу и разделить ее двумя плоскостями, совпадающими с координатными плоскостями YOZ и XOZ , то в такой модели очага направления «сжимающих» и «растягивающих» сил и укажут на расположение нодальных плоскостей, разделяющих вступления P -волн различных знаков. Знание положения нодальных линий еще не дает полной информации о направлении сжимающих и растягивающих усилий на поверхности Земли. Для этого необходимо знать истинное направление разрыва, которое определяется дополнительно как по инструментальным данным, так и по макросейсмическим наблюдениям.

С источником дислокационного (сдвигового) типа тесно связано понятие сейсмического момента M_0 как некоторой скалярной величины, имеющей размерность энергии (работы). С физических позиций M_0 представляет собой произведение площади подвижки S на величину дислокации (перемещения) D и модуля сдвига μ :

$$M_0 = \mu SD. \quad (3.14)$$

Массовые определения величины сейсмического момента M_0 Гарвардской группой и группой NEIC (США) дали основу для определения моментной магнитуды M_w [Гусев, Мельникова, 1990]:

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10,7, \quad (3.15)$$

где M_0 измеряется в $\text{дин} \cdot \text{см}$.

Важно отметить, что сейсмический момент следует рассматривать в качестве меры потенциальной энергии, необходимой для осуществления разрыва и перемещения масс по его поверхности.

На основе обработки экспериментальных данных показано, что между сейсмическим моментом и магнитудой существует следующая корреляционная зависимость [Ризниченко, 1985]:

$$\lg M_0 = 15.4 + 1.6M. \quad (3.16)$$

Сейсмический момент M_0 – по определению (3.15) – длиннопериодная характеристика величины дислокации, вызываемой разрывом в среде, которая навсегда (во всяком случае – на весьма продолжительный отрезок времени) остается после землетрясения. Представление об очаге как о дислокации вытекает из опыта полевых наблюдений над разрывами, вышедшими на поверхность Земли. Осмысливание этого аспекта начал после землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. Ф. Рейд и в конце 1950-х гг. продолжил японский ученый К. Касахара [1985]. Понятие о сейсмическом моменте впервые в начале 1960-х гг. ввел японский ученый К. Аки [1983]. В настоящее время определение величины сейсмического момента «прочно» введено в практику сейсмологических наблюдений.

График повторяемости землетрясений

«Землетрясения, что звезды на небе, чем они сильнее, тем их меньше». Это один из основных законов сейсмологии. Его математическое выражение можно записать в виде:

$$\lg N = -\gamma K + a = -bM + A,$$

где N – число землетрясений, K , M – их энергетические классы или магнитуды, a , A – коэффициенты, называемые сейсмической активностью, $\gamma > 0, b > 0$ – углы наклона графика повторяемости (см. рис. 11.16).

Долговременные измерения параметров закона повторяемости показали, что значения углов наклона графика повторяемости в целом для Земли могут быть, в среднем, приняты равными:

$$\gamma \approx 0,5, \quad b \approx 1.$$

Для различных регионов значения углов наклона повторяемости могут отличаться друг от друга. Так, для Камчатки, долговременное значение угла наклона графика повторяемости равно $\gamma = 0,47 - 0,49$. Углы наклона имеют разное значение для различных участков сейсмофокальной зоны, находящихся в разных стадиях сейсмического цикла. Вариации значений углов наклона использовались с целью прогноза землетрясений.

Величина сейсмической активности определяется нормированным (на единицу поверхности и на единицу времени) числом землетрясений. Так, долговременная величина сейсмической активности для сейсмофокальной зоны Камчатки близка $a \approx 1$, то есть примерно равна одному землетрясению 10 энергетического класса, происходящему на площади 1000 км^2 в течение одного года.

Величина сейсмической активности в очаге сильного землетрясения сразу после толчка может быть очень большой и при магнитуде главного толчка $M \approx 8$ приближаться к 1000.

Магнитуды M_G , M_R , M_S , m_b , M_W и другие

Исторически первые магнитуды, введенные в 1945 г. в практику для классификации землетрясений в рамках мировой системы сейсмических станций, определялись по поверхностным волнам и обозначались M_G – магнитуда Б. Гутенберга [Гутенберг, Рихтер, 1961; Gutenberg, 1945a, b, c]. В системе Единой сети сейсмических станций СССР магнитуды определялись аналогичным образом и обозначались M_R – магнитуда по поверхностным волнам Релея (Reyleigh). Принято также магнитуды определять по поперечным (S) волнам, имеющим наибольшую амплитуду, они обозначаются M_S .

Проведенные исследования показали, что все эти магнитуды являются близкими друг другу [Викулин, 1983; Гусев, Мельникова, 1990]:

$$M_G \approx M_R \approx M_S \approx M.$$

В практике групп Гарварда и NEIC используется определение магнитуды землетрясения по короткопериодным продольным P -волнам – m_b .

Используются в сейсмологической практике определения магнитуд землетрясений и по другим волнам [Ванек, Кондорская, Христосков, 1980].

Практически все магнитудные шкалы при больших значениях магнитуд «насыщаются», в пределе достигая значений:

$$M_{max} \approx 8,5; m_b \approx 7,0-7,5,$$

что, в том числе, в областях больших значений магнитуд проявляется в виде нелинейностей графиков повторяемости землетрясений. В этой связи для классификации достаточно сильных ($M \approx 7,5$ и выше) землетрясений в настоящее время часто используется моментная определяемая на основании соотношения (3.15) магнитуда M_W , которая [Гусев, Мельникова, 1990]:

$$M_W \approx M \text{ при } M \leq 7,5-8,0; M_W > M \text{ при } M > 8,0.$$

Максимальные моментные магнитуды, по-видимому, могут достигать значений

$$M_{W, max} \approx 9,5 - 10.$$

На сегодняшний момент максимальное значение моментной магнитуды, равное $M_W \approx 9,5$, имело только одно землетрясение: Чилийское 20.05.1960 г. Возможно, такое же или большее значение, имели некоторые из землетрясений 16-18 вв. с очагами в том же районе - вблизи тихоокеанского побережья Южной Америки.

Связи между всеми магнитудными и энергетическими шкалами, в том числе, применяемыми на Камчатке, Курилах и Дальнем Востоке России, установлены в работах [Ванек, Кондорская, Христосков, 1980; Викулин, 1983; Гусев, Мельникова, 1990].

Везде в дальнейшем, если не оговорено особо, для классификации землетрясений будем использовать магнитуду M .

Магнитуда – энергия очага – сейсмический момент [Ризниченко, 1985, с. 13-17]

За многие десятилетия, прошедшие со времени пионерской работы Ч. Рихтера [1935], магнитуда как показатель величины землетрясения в очаге, несмотря на все ее недостатки, стала главенствующей в сейсмологии. Сейсмическая энергия как бы отошла на задний план. Чем определяется такой успех магнитуды по сравнению с энергией?

Преимущества. Этот успех определяется в первую очередь тем, что магнитудный подход позволяет разделить две задачи: установление величины землетрясения в очаге и установление строения и свойств Земли на пути распространения волн от очага к месту наблюдения. При установлении магнитуды знание свойств промежуточной среды заменяется построением эмпирических зависимостей интенсивности от расстояния, которые никак не интерпретируются; при желании это можно сделать отдельно. При установлении же сейсмической энергии очага знание и свойств промежуточной среды или, по крайней мере, выражение их какой-то вполне определенной моделью совершенно необходимо. Если модель недостаточно совершенна, то результаты определения энергии очага по наблюдениям на разных расстояниях окажутся плохо согласуемыми между собой.

Следует отметить, что условием применимости описанного выше метода Голицына определения энергии землетрясения, все же, остается не слишком большое приближение к очагу. Для малых ($K < 10$, $M < 3$) – километры, для средних ($10 < K < 15$, $3 < M < 7,5$) – десятки и сотни, для больших ($K > 15$, $M > 7,5$) – сотни и тысячи.

Недостатки. Главных недостатков магнитуды – два. Первый – ее условность, косвенной характер, отсутствие функциональной связи с какой-либо вполне определенной объективной физической характеристикой очага землетрясения, не зависящей от средств и способов измерения. Второй – ее одномерный, скалярный характер.

Первого недостатка, в принципе, лишены такие величины, как сейсмическая энергия и сейсмический момент и ряд других скалярных характеристик, которыми так или иначе может быть описана величина землетрясения в очаге. Вторым же недостатком присущ и каждой из этих скалярных физических величин в отдельности.

Преимущества и недостатки сейсмического момента. Главное преимущество сейсмического момента (имеющего размерность энергии!) перед магнитудой в разных ее модификациях состоит в том, что момент в противоположность магнитуде есть явно сформулированная физическая величина. В этом отношении он подобен сейсмической энергии. В некоторых отношениях он даже лучше сейсмической энергии: он сохраняет смысл и в ближней зоне, где смысл сейсмической энергии расплывается.

Но сейсмический момент обладает тем же коренным недостатком, что и магнитуда и сейсмическая энергия: он не содержит частотной зависимости. Тензорное понимание сейсмического момента этого недостатка не устраняет. Будучи связанным лишь с остаточными смещениями, сейсмический момент не имеет прямого отношения к сейсмической энергии в области частот $f \gg 0$, которые и производят собственно «трясение Земли», воздействуют на ощущения человека, разрушают дома. Так, в результате «тихого» землетрясения, быстрого крипа, может образоваться заметный момент при ничтожно малой магнитуде и энергии толчков в сейсмологическом, инженерном диапазоне частот.

В последнее время сейсмический момент привлекает все большее внимание сейсмологов – теоретиков и практиков. Возможности его приложения еще далеко не исчерпаны.

О повторяемости землетрясений

Известно большое количество примеров повторяемости сильных землетрясений в одном месте через определенные интервалы времени. Обзор мировых данных по повторяемости землетрясений с обширной библиографией приведен в [Викулин, 2003]. Наиболее яркими примерами, отчетливо иллюстрирующими повторяемость землетрясений, являются Япония, Перу и Камчатка, для которых имеются достаточно продолжительные ряды наблюдений. Например, юго-западнее г. Токио землетрясения с $M \geq 7,9$ происходили в 1498, 1605, 1707, 1854 и 1944 гг., т.е., в среднем, один раз в 112 ± 18 лет. Сильнейшие землетрясения с $M \geq 8$ в Перу в районе Кальяо происходили в 1513-

1515, 1586, 1687, 1746, 1942 гг., в среднем, один раз в 110 ± 50 лет. Сильнейшие землетрясения с $M > 8$ с очагами в Авачинском заливе против г. Петропавловска-Камчатского происходили 17.10.1737, 17.05.1841 и 4.11.1952 гг., в среднем, одно событие в 107 ± 4 лет. В целом, обобщая все имеющиеся данные по окраине Тихого океана, был сделан вывод о повторяемости сильнейших землетрясений в одном месте с периодом:

$$T_1 = 100 \pm 50 \text{ лет.} \quad (3.17)$$

Исследования особенностей пространственного (sp) распределения очагов сильнейших землетрясений позволили сформулировать концепцию сейсмического цикла [Федотов, 2005], продолжительность которого для северо-западной окраины Тихого океана, включающей Японию, Курильские острова, Камчатку, Алеутские острова и Аляску, составляет [Викулин, 2003, 2008]:

$$T_{sp} = 190 \pm 40 \text{ лет.} \quad (3.18)$$

Исследовались свойства распределения чисел землетрясений северо-западной окраины по временным интервалам (t) между ними [Викулин, 2003, 2008]. Оказалось, что для сейсмического процесса характерно свойство квазипериодичности (почти периодичности) с периодом:

$$T_t = 230 \pm 60 \text{ лет.} \quad (3.19)$$

Полученные оценки (3.17) – (3.19) физически прозрачны. Действительно, при ширине сейсмофокальной зоны в пределах северо-западной окраины Тихого океана около 100 - 150 км, когда поперек зоны без существенного взаимного перекрытия могут расположиться только два очага сильнейших землетрясений, продолжительность сейсмического цикла

$$T_{ss} \approx T_{sp} \approx T_t = 210 \pm 50 \text{ лет,} \quad (3.20)$$

очевидно, должна быть близка

$$T_{ss} \approx 2T_1. \quad (3.21)$$

В научной литературе для регионов, для которых имеются достаточно продолжительные ряды наблюдений (Китай, Турция и др.) содержатся указания на существование периодичностей продолжительностью от нескольких сотен лет до одной тысячи лет и более.

С целью проверки проведенных оценок проводился анализ мирового каталога землетрясений [Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007]. Каталог содержит все известные данные о землетрясениях планеты с 2150 г. до н.э. до 1899 г. включительно, а также данные о сильных ($M \geq 6$) землетрясениях за 1900 – 2005 гг., общее число которых составляет $N = 10678$. Исследовались числа землетрясений каталога по временным интервалам между ними. Продолжительность интервалов осреднения данных составляла 90, 100 и 110 лет. Формирование выборок осуществлялось по всему каталогу и с разбиением каталога на выборки, включающие только данные для окраины Тихого океана и только для Альпийского пояса. Данные для Тихого океана также разбивались на две примерно равные выборки, в каждую из которых включались события Восточного и Западного побережий. В каждой из исследуемых совокупностей число событий было достаточно большим и составляло многие тысячи. Выявление периодичностей осуществлялось методом Фурье.

Анализ показал, что выделяется достаточно большое количество периодов, продолжительности которых расположены в пределах 100 – 800 лет. Периодичности с большими периодами выявлены не были по причине, очевидно, достаточно малой продолжительности исходного ряда наблюдений.

Проведенный анализ показал существование «устойчивых» периодов: для всех выборок без исключения характерными периодами оказались интервалы, продолжительности которых составляют:

$$\frac{1}{2}T_0 \approx 116 \pm 1 \text{ лет}, \quad (3.22.1)$$

$$T_0 \approx 195 \pm 6 \text{ лет}, \quad (3.22.2)$$

$$2T_0 \approx 388 \pm 4 \text{ лет}, \quad (3.22.3)$$

$$4T_0 \approx 786 \pm 9 \text{ лет}. \quad (3.22.4)$$

Комментарии, как говорится, излишни. Полученные данные подтверждают вывод о квазипериодичности сейсмического процесса и, в частности, показывают, что продолжительность сейсмического цикла

$$T_{ss} \approx T_0 \quad (3.23)$$

является основным периодом сейсмического процесса, характерным как для окраины Тихого океана, так и для Альпийского пояса.

Выявление периодичностей сейсмического процесса по данным мирового каталога землетрясений проводилось в ходе выполнения курсовой работы студентами 4 курса кафедры Информатики КамчатГТУ, которым автор выражает свою признательность.

Дислокационные теории очага землетрясения [Соболев, 1993, с. 111-135]

Еще раз об энергии [Ризниченко, 1985, с. 11]. Возможен и другой, отличный от «точечного» метода Б.Б. Голицына [1960, с. 365-370], локальный подход к решению задачи об определении очага землетрясения: рассмотрение его как трещины и/или дислокации в напряженной упругой среде в рамках теории упругой отдачи Ф. Рейда [Reid, 1910, 1911]. Исходя из концепции Рейда, следует считать, что энергия землетрясения – это разность потенциальной энергии окружающей среды до и после возникновения трещины и/или дислокации. Часть ее тратится на неупругие процессы в очаге: разрушение материала, трение по разрыву, пластические деформации, физико-химические превращения, а также на работу перемещения масс в поле силы тяжести. Другая часть идет на образование сейсмических волн – переходит в сейсмическую энергию очага. Сейсмогенная потенциальная энергия среды, в основном, упругая, частично – гравитационная и др. Окружающая среда, откуда черпается потенциальная энергия, это Земля в целом. Но чем дальше от разрыва, тем меньшая доля энергии черпается оттуда (принцип Сен-Венана в теории упругости). Поэтому практическим резервуаром энергии землетрясения является все же лишь локальная объемная часть вокруг трещины (дислокации) размером порядка ее длины: 98% освобождаемой энергии исходит из области диаметром примерно в пять раз большим диаметра трещины. Фиксировав «доверительную» долю энергии, можно приближенно установить размеры очага как эффективного источника энергии землетрясения, в том числе сейсмической.

Итак, голицынская волновая сейсмическая энергия очага составляет лишь некоторую часть от рейдовской высвобожденной потенциальной энергии, идущей и на сейсмические волны, и на неупругие процессы в очаге. Какую именно часть?

Этот вопрос неоднократно обсуждался на основе наблюдений над землетрясениями и соответствующими сейсмодислокациями на земной поверхности, при изучении горных ударов в шахтах, а также по наблюдениям разрушения образцов в лаборатории. Повидимому, для неглубоких коровых землетрясений при отсутствии существенного расплавления материала в области разрыва «коэффициент сейсмического действия» составляет только доли процента от полной энергии землетрясения. При частичном расплавлении по разрыву в коре, и особенно под корой, где расплавление может быть полнее, он может быть гораздо больше, приближаясь к полной потенциальной энергии очага, причем тем больше, чем больше землетрясение. Вопрос о том, какую именно часть составляет сейсмическая энергия от полной энергии землетрясения в каждом конкретном случае, представляет одну из труднейших и важнейших теоретических проблем сейсмологии.

Мерить сейсмическую энергию очага несравнимо проще и надежнее, чем находить высвобожденную потенциальную энергию, геометрические размеры очага, смещение по нему и т.п. Если условно принять, что величину землетрясения надо характеризовать лишь одним числом, то лучшей физической величины, чем сейсмическая энергия, пожалуй, не найти. Но для множества запросов теории и практики одной лишь этой скалярной характеристики землетрясения явно недостаточно.

Дилатантно-диффузная (ДД) модель. Данная модель была предложена американскими учеными в 1973 г. и развита с целью объяснить наблюдавшиеся перед землетрясениями бухтообразные изменения отношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, локальный подъем земной поверхности в районе будущего эпицентра, значительное уменьшение кажущегося удельного электрического сопротивления пород и некоторые другие предвестники землетрясений. Экспериментальную основу модели составили, главным образом, результаты лабораторных экспериментов по изучению дилатансии, т.е. неупругого увеличения объема горных пород в процессе их деформации.

Сущность ДД модели сводится к следующему. Процесс подготовки землетрясения (макроразрыва) подразделяется на три стадии. Стадия 1 характеризуется постепенным увеличением тектонического напряжения в рассматриваемом объеме водонасыщенной горной породы. Дилатантная стадия 2 начинается в момент времени, когда уровень напряжений достигает примерно половины прочности водонасыщенной породы и начинается быстрое образование дилатантной зоны за счет заполнения образовавшихся трещин водой. При этом в дилатантной зоне падает и прочность разрушения на сдвиг. По мере заполнения водой вновь образованных дилатантных трещин на 3 стадии прочность породы постепенно падает, что и приводит рано или поздно, в зависимости от скорости изменения тектонических напряжений во время дилатантной фазы, к разрушению среды.

Таким образом, с одной стороны, в рамках ДД модели логически вытекает экспериментально установленная зависимость длительности долгосрочных предвестников от величины землетрясения (магнитуды), что указывает на «жизнеспособность» модели. С другой – с позиции ДД модели плохо объясняются все краткосрочные предвестники землетрясений, что, наоборот, указывает на достаточно ограниченные возможности ДД модели.

Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ). Модель предложена в 1975 г. сотрудниками ИФЗ РАН В.И. Мячкиным, Б.В. Костровым, Г.А. Соболевым. и О.Г. Шаминой. Основу модели составляют два явления: взаимодействие полей напряжений трещин и локализация процесса трещинообразования. В рамках ЛНТ-модели предполагается, что процесс перехода от состояния критической плотности трещин к

макроразрушению происходит путем слияния трещин в районе будущего макроразрушения в результате взаимодействия полей их напряжений.

Теоретически показано, что устойчивость системы благоприятно расположенных трещин резко падает при уменьшении расстояния между трещинами. Таким образом, при статистически равномерном распределении трещин в среде и постепенном увеличении их числа и размеров вследствие медленно возрастающих нагрузок или при воздействии активной среды, благоприятно расположенные трещины будут сливаться, образуя трещины большого размера. Данное свойство используется в *ЛНТ*-модели, утверждающей, что в процессе лавинного трещинообразования постепенно формируется относительно небольшое число длинных разрывов, слияние которых и приводит к макроразрушению горной породы – к землетрясению.

Таким образом, *ЛНТ*-модель, с одной стороны, исходит из фундаментальных положений физики длительной прочности, не зависит от масштаба явления и может применяться к описанию большого круга явлений от землетрясений и горных ударов до разрушения крупных инженерных конструкций, что, несомненно, характеризует ее как физически обоснованную модель. С другой – разработанный математический аппарат позволяет оценить развитие только первой, начальной стадии модели – объемного трещинообразования, кинетика локализации трещин на следующей стадии пока не находит своего теоретического объяснения.

Модель консолидации. Модель предложена в 1984 г. сотрудником ИФЗ РАН И. Добровольским. Ее существо, кратко, состоит в следующем: цикл одиночного землетрясения имеет три фазы, следующие друг за другом в периодической последовательности. Фаза регулярного состояния сменяется фазой консолидации, на которой два или несколько блоков входят постепенно в относительно прочное зацепление, образуя консолидированную область или неоднородность, чьи осредненные свойства отличаются, очевидно, от аналогичных ее свойств до консолидации. Далее, на фазе разрушения происходит распад консолидированной области путем быстрых пластических подвижек, форшоков, магистрального разрыва (или роя землетрясений) и афтершоков, которые приводят среду вновь в фазу регулярного состояния. Часть фазы разрушения, от ее начала до магистрального разрыва (или начала роя землетрясений) названа α -стадией, а оставшаяся ее часть – β -стадией. На α -стадии возникают пластические подвижки, форшоки, краткосрочные предвестники, β -стадия характеризуется афтершоковой деятельностью.

Таким образом, с одной стороны, механизм зацепления блоков в земной коре при их взаимном движении вполне реален и модель дает возможность провести количественные расчеты поля деформаций и связанных с ним предвестников землетрясений. С другой, модель не содержит внутреннего механизма саморазвития процесса на завершающей стадии распада включения.

Модель неустойчивого скольжения. Модель предложена американскими учеными в 1966 г. и до современного уровня доведена в 1990 г. Авторы в качестве физической основы использовали известное из лабораторных опытов явление «stick-slip», заключающееся в неустойчивой подвижке по контакту блоков, сопровождаемой частичным сбросом нагрузки. Сильной стороной предложенной модели является ее качественное и до некоторой степени количественное обоснование в рамках теории трения и подтверждение лабораторными экспериментами с высокой надежностью. С другой – реальные разломы не являются адекватными модельным схемам прямолинейного контакта с трением и, видимо, по этой причине модель не может объяснить большинство предвестников, наблюдаемых вдали от очага землетрясения.

Модель очага со множеством неровностей [Гусев, 1993; с. 24-36]. Такое название отражает главное характерное свойство модели - наличие неровностей и тот факт, что число неровностей в ней может быть весьма велико (сотни уже при магнитуде $M = 7,5$). До работ А.А. Гусева не предпринималось попыток интерпретировать наблюдательный

материал по сильным движениям (в первую очередь акселерограммы и их спектры) и тем более изучать свойства реальных неровностей на разломе.

Модель исходит из того, что сопротивление разлома сдвигу сконцентрировано в неровностях. Поэтому распространение сейсмического разрыва ("вспарывание разлома") фактически сводится к более или менее последовательному разрушению дискретных неровностей, импульсы, генерируемые при разрушении каждой из неровностей, можно рассматривать как случайный импульсный процесс; его свойства и определяют свойства короткопериодного излучения (акселерограммы). Используя результаты предыдущих исследований, А.А. Гусев полагает, что каждый такой импульс соответствует включению на поверхности разлома некоторой силы ("сейсмической силы неровности") с характерным временем нарастания порядка $2R_a/c$, где R_a - радиус условно круговой неровности, c – скорость сейсмической волны.

Таким образом, совокупность наблюдаемых свойств очагов землетрясений в широкой полосе частот может быть объяснена как в частотной, так и во временной области на основе представления о множестве дискретных субочагов – прочных неровностей, последовательно разрушающихся при распространении сейсмического разрыва, причем импульсы от неровностей складываются в некогерентный сигнал.

Модель фазовых превращений. Определенную опасность представляют глубокие землетрясения. Например, землетрясение 24.11.1971 г. с глубиной очага 100-120 км в г. Петропавловске-Камчатском сопровождалось сотрясениями до 8 баллов и незначительными разрушениями старых ветхих построек. Так в районе рыбного порта образовалась система трещин шириной до 10 см. А землетрясения в зоне Вранча с глубиной очага около 100 км в 1940, 1977 и 1986 гг. вызвали в Румынии сильные разрушения и ощущались даже в Москве.

Проблема заключается в следующем. При литостатическом давлении на глубине 100 км около 3 тыс МПа и температуре около 1000°С хрупкое разрушение пород маловероятно [Николаевский, 1980]. Приходится искать другое объяснение причины разрушения. Обзор предложенных механизмов глубинной сейсмичности выполнен В.А. Калинин, М.В. Родкиным и И.С. Томашевской [1989].

Ряд моделей связывает генезис глубокофокусных землетрясений с процессами фазовых превращений.

Важным обстоятельством, способствующим развитию такого рода моделей, является корреляция максимумов сейсмичности с глубинами основных фазовых превращений вещества мантии. Так, максимумы глубокофокусной сейсмичности приурочены к глубинам 350-400 и 500-650 км. На этих же глубинах расположены границы основных фазовых превращений вещества погружающейся плиты: оливин→β-фаза и β-фаза→шпинель→постшпинель соответственно.

К наиболее важным превращениям в группе пироксенов и гранатов следует отнести образование граната в широком интервале глубин от 200 до 550 км, а также ильменита и перовскита на глубинах около 600 км. При этом размытый по глубине переход пироксен→гранат в зависимости от содержания Al_2O_3 будет смещаться к глубине 200 км при высокой концентрации Al_2O_3 или к глубине 550 км при низкой концентрации.

Существенно иная последовательность превращения свойственна базальтовой океанической коре. В интервале глубин до 100 км происходит эклогитизация базальтовых и амфиболитовых комплексов. Несколько ниже 100 км кварц переходит в коэсит, а затем на глубине 300 км – в стишовит.

Приведенное описание происходящих в плите твердотельных превращений является упрощенным, отвечающим идеализированным условиям превращений и обедненному модельному составу плиты. Учет более сложного характера химического состава плиты, например, анализ системы $MgO-FeO-CaO-Al_2O_3-SiO_2$, приводит к появлению значительного числа новых фазовых границ. Традиционные единичные

границы разделов представлены при этом протяженными по глубине областями твердотельных превращений.

Авторами обзора [Калинин, Родкин, Томашевская, 1989] предложена следующая модель очага глубокофокусного землетрясения.

Однородное по химическому составу твердое макроскопическое тело находится в поле внешних негидростатических напряжений. Пусть внутри тела проходит фазовая граница, отделяющая друг от друга две полиморфные модификации. При достаточно высокой температуре, когда процесс превращения не заторможен, изменение термодинамических условий вызовет квазиравновесное перемещение фазовой границы. Так как вещество в процессе фазового перехода становится более пластичным, то по мере смещения границы раздела фаз, действующие на ней скалывающие напряжения будут сниматься посредством пластических деформаций. Очевидно, что происходящее при этом постепенное перераспределение напряжений не должно приводить к землетрясениям.

Если же температура тела невысока и твердотельное превращение заторможено, то изменение P - T -условий приводит к образованию метастабильной фазы. Ее превращение в стабильную модификацию может происходить скачкообразно, точнее, в виде быстрых лавинообразных процессов. При этом внешние условия изменяются медленно и равномерно. Необходимым условием возникновения скачкообразного режима твердотельного превращения при отсутствии быстрых изменений внешних условий является существование положительной обратной связи между скоростью превращения и концентрацией новообразуемой фазы. Такая связь имеет место, если образующаяся новая фаза путем локального изменения термодинамических условий и параметров превращения оказывает каталитическое воздействие на скорость реакции.

Трудности такого рода модели очевидны. Они связаны, в первую очередь, с недостаточным знанием, как химического состава пород мантии, так и реальных термодинамических условий на глубине. Более того, совершенно неясна кинетика процессов, протекающих в глубинах Земли. Это затрудняет использование количественных параметров, получаемых из такого рода моделей, и, как следствие, их строгое обоснование.

Модели сейсмического процесса

Разработан ряд «ударно-волновых» моделей землетрясений, которые «не вписываются» в исторически сложившееся и ставшее уже традиционным направление, опирающееся на представления Ф. Рейда о движущемся фронте прямолинейного разлома, излучающего упругие сейсмические волны. Остановимся на некоторых таких «нерейдовских» моделях.

Ударная модель землетрясения [Мишин, 1980, 1993]. В качестве модели процесса землетрясения рассматривается следующее положение: землетрясение - *это перемещение блока горных пород и удар при его торможении*. В самой общей форме об этом писали многие исследователи прошлого, в том числе, и в 1915 г. Б.Б. Голицын [1960, с. 365-370], обсуждая природу образования Сарезского озера.

Причиной возбуждения сейсмических волн в системах связанных масс всегда является движение в поле силы тяжести массы и ее торможение на контакте с неподвижной средой. Таким образом, землетрясение, по сути, является результатом длительного взаимодействия поля сил давления с полем прочности горных пород. Такое взаимодействие приводит либо к пластическому течению вещества, либо к его разрушению в некоторой зоне. При разрушении высвобождается энергия массовых сил, которая и приводит к движению блока горной породы как целого.

С точки зрения рассматриваемой модели землетрясения имеют ту же природу, что и удары, взрывы, обвалы горных пород, топот ног. Энергия сейсмического излучения, формируемого в очаге, определяется кинетической энергией объектов, входящих во

взаимодействие с неподвижной средой. Отличие землетрясений от этих процессов заключается главным образом в том, что процесс землетрясения до настоящего времени остается невоспроизводимым и о его параметрах приходится судить только по последствиям.

Ударно-волновая концепция сейсмического разрушения сооружения [Смирнов, 1992]. По многочисленным наблюдениям большинство сейсмических разрушений зданий происходит сразу после первых наиболее мощных поперечных толчков. Результатом таких толчков, которые, конечно же, не успевают раскачать здание, т. е. вызвать в нем появление опасных сил инерции, является почти мгновенный срез колонн или стен здания, вследствие чего происходит разрушение здания до попадания его в резонанс.

Поскольку фундаментальные теоретические положения строительной механики и теории предельного равновесия обоснованы многократными экспериментами и неопровержимы, то из анализа многочисленных примеров следует принципиально важный общий вывод: во всех рассмотренных случаях инерционные силы не могли вызвать такие сейсмические разрушения зданий. Все они были вызваны совершенно иным по своей природе, волновым ударно-сдвиговым воздействием, приложенным к зданиям, что привело к их разрушению еще до появления инерционных сил.

Более того, почти все реально возникавшие случаи изгибного разрушения колонн, высоких стен и ядер жесткости, похожие на разрушение от сил инерции, могут быть вызваны действием изгибных напряжений, появление которых сопровождается прохождением волн сдвиговых напряжений по вертикальным элементам зданий. Если волны сдвига имеют длину, превышающую высоту здания, указанные изгибные напряжения достигают очень больших значений и приводят к изгибному разрушению зданий, которое внешне выглядит точно так же, как и разрушение от инерционных сил. Однако такое «изгибное» разрушение происходит раньше появления инерционных сил.

О роли изгибных движений будет много говориться во второй части книги. Здесь отметим только, что роль изгибных движений при землетрясениях достаточно велика. На это указывают многочисленные примеры как поворотов памятников и минаретов, так и разрушений торцевых частей зданий при землетрясениях. В частности, пространственный расчет существующего в Петропавловске-Камчатском пятиэтажного здания показал, что учет эффектов кручения приводит к значительному - в два раза(!) по сравнению со средней рамой, увеличению сейсмической нагрузки на торцевую раму [Дроздюк, 2004].

Как видим, С.Б. Смирнов вполне обоснованно полагает, что им найдено и описано то достаточно очевидное и не укладывающееся в инерционно-силовую концепцию ударно-волновое изгибное сейсмическое воздействие, которое позволяет логично объяснить все случаи *реальных* сейсмических разрушений. Причиной таких разрушений являются волны напряжений сдвига, которые возникают в стенах, диафрагмах и других вертикальных элементах зданий от прохождения горизонтальных сейсмических волн сжатия (или горизонтальных толчков) под зданиями.

Сейсмичность Земли и физика землетрясений. Так называется глава VIII книги В.В. Кузнецова [2008, с. 248-288], в которой в рамках модели «горячей Земли» излагается авторская концепция *сейсмических процессов, протекающих на Земле*. В выделенных словах, на мой взгляд, и заключается новизна подхода В.В. Кузнецова к проблеме сейсмичности, которая видится им не как локальная, очаговая, в смысле Рейда, задача, а как - планетарная.

Действительно, отправным тезисом В.В. Кузнецова является утверждение, согласно которому: «Сейсмичность Земли и способ ее реализации - тектонические землетрясения, являются общепланетарной особенностью. ... Основная причина возникновения подобных явлений на Земле состоит в реализации принципа минимизации её потенциальной гравитационной энергии. ... Сейсмичность Земли является результатом действия на Земле процессов самоорганизации» [Кузнецов, 2000, с. 230].

Предлагаемая *ударно-волновая модель землетрясения* опирается на следующие представления [Кузнецов, 2008, с. 248]: «На первом этапе в нагруженной литосфере происходит образование когерентных структур, основанных на взаимодействии элементов между собой путем обмена звуковыми (акустическими) волнами. Взаимодействие акустических элементов структуры (дилатонов и бризеров (по сути, «квантовых» возбуждений - А.В.)) приводит ... к образованию ударной волны. На сравнительно малых глубинах когерентные структуры возникают за счет взаимодействия раскрывающихся трещин между собой (здесь выделено – А.В.). На больших глубинах, где реология среды не позволяет протеканию процесса образования трещин, когерентная структура может возникнуть за счет ансамбля схлопывающихся кавитирующих «пузырей», образующихся в глубоких слоях литосферы. Второй этап составляет комплекс явлений, связанных с прохождением ударной волны по геологической среде от области ее формирования – гипоцентра землетрясения, до поверхности Земли. На этом этапе землетрясение проявляет себя как *излучатель объемных сейсмических волн*. Энергия землетрясения на этом этапе расходуется практически полностью. Этот процесс является общим и для коровых, и для глубоких землетрясений.

Третий этап включает процессы, происходящие в эпицентре разрушения – районе, где ударная волна выходит на «дневную» поверхность, отражается и взаимодействует с образовавшейся в этом процессе волновой разгрузки (разряжения). При этом на поверхности Земли происходит собственно *«трясение» земли*, т.е. возникновение отколов, разрывов поверхности, вспучивание поверхности и т.п.»

Третий этап у В.В. Кузнецова явно «пересекается» с описанными выше моделями С.М. Мишина и С.Б. Смирнова и, фактически, позволяет их, казалось бы «локальные», в смысле Рейда, ударно-волновые модели связать с сейсмическим процессом Земли, в рамках планетарной структуры, самоорганизация которой обеспечивается взаимодействием элементарных («квантовых») возбуждений - дилатонов.

Ротационно-упругая модель сейсмического процесса [Викулин, 2003, 2008]. В рамках представлений описанных выше «нестандартных» «ударных» моделей ротационно-упругая концепция сейсмического процесса, развиваемая автором, представляется почти очевидной.

Достаточно подробно модель будет описана во второй части книги. Здесь же кратко осветим основные моменты модели с тем, чтобы подчеркнуть принципиальную возможность описания сейсмического процесса в виде взаимодействия «элементарных» объемов, а не трещин, как у В.В. Кузнецова.

В настоящее время считается, что концепция блокового строения геофизической (в смысле М.А. Садовского) и геологической (в смысле А.В. Пейве) сред наиболее полно соответствует всему имеющемуся комплексу геофизических и геологических данных о Земле - как нелинейной среде. Имеющиеся данные прямо указывают на вращательный, крутильный и вихревой характер движения блоков, плит и других геологических структур планеты. Важно, что многие геологи и геофизики отмечают «самостоятельный», «собственный», «с ненулевыми дивергенциями и вихрями» и упругий характер таких движений, прямо связанных с вращением планеты. Имеются данные, согласно которых сильно выраженные нелинейные свойства позволяют горные породы рассматривать как среду с собственными источниками упругой энергии. Более того, по сути, блоковые модели с «собственным моментом количества движения конечного объема сплошной среды» нашли свое развитие и в физике твердого тела, вращения на большие углы в лабораторных условиях экспериментально зафиксированы в поликристаллических материалах.

Все эти данные позволили в 1990 г. предложить и в последующие годы развить *ротационно-упругую концепцию блоковой Земли*, в которой упругое поле вокруг блока вращающейся планеты наследует его собственный момент (циркуляцию).

Отличие нашей ротационной модели от континуума Коссера, наиболее часто применяемого для объяснения влияния ротации планеты на геофизические процессы, заключается в том, что блоки геофизической среды не просто имеют ротационные степени свободы. Они - *имеют собственный момент* (в смысле Л.И. Седова), который в случае вращения среды и приводит к целому ряду интересных специфических следствий, включая и самоорганизацию сейсмического (и геофизического вообще) процесса.

Следствиями принципиального характера являются два вывода модели. Первый – для блоковых вращающихся геофизических сред показано существование нового типа упругих волн – ротационных. Второе – получены выражения, которые позволяют способом, независимым от сейсмометрических измерений, определять значения упругой сейсмической энергии, выделяющейся в очаге землетрясения, и его магнитуды.

Литература

Аки К. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1, 2. М.: Мир, 1983. Т. 1. 520 с., Т. 2. 360 с.

Болт Б. Землетрясения. Общедоступный очерк. М.: Мир, 1981. 256 с.

Ванек Й., Кондорская Н.В., Христосков Л. Магнитуда землетрясений в сейсмологической практике. Волны PV и PV_S . София: Изд-во Болгарской Академии наук, 1980. 264 с.

Викулин А.В. О соотношении между энергетическими и магнитудными классификациями землетрясений Камчатки, Курил и Японии // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 90-98.

Викулин А.В. Природный риск Северной Камчатки // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 2. С. 85-92.

Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. 150 с.

Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. С. 559-570.

Викулин А.В., Водинчар Г.М., Мелекесцев И.В. и др. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. Сборник докладов IV международной конференции. 14-17 августа 2007. Паратунка, Камчатской обл. Петропавловск-Камчатский: ИКИРР ДВО РАН, 2007. С. 275-280.

Викулин А.В., Дроздюк В.Н., Семенец Н.В., Широков В.А. К землетрясению без риска. Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1997. 120 с.

Викулин А.В., Мелекесцев И.В. Уроки Хаилинского 1991, $M = 7,0$ и Олюторского 2006, $M = 7,8$ землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 1. Вып. № 7. С. 36-49.

Вокруг Света. 2007. № 7. С. 48.

Гир Дж., Шах Х. Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. М.: Мир, 1988. 220 с.

Голицын Б.Б. Избранные труды. Т. II. Сейсмология. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 491 с.

Гусев А.А. 1993. Свойства и природа короткопериодного излучения очага землетрясения. // Автореферат диссерт. на соиск. уч. ст. д. ф. – м. н. М.: ИФЗ РАН. 43 с.

Гусев А.А. О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // Физика Земли. 2002. № 12. С. 56-70.

Гусев А.А. Некоторые вопросы сейсмологического обоснования норм сейсмостойкого проектирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 1. С. 32-36.

Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55-63.

Гусев А.А., Петухин А.Г. Методика построения региональной прогнозной зависимости между параметрами сейсмических колебаний грунта, магнитудой и расстоянием при небольшом числе инструментальных записей на примере прогноза максимального ускорения для Камчатки // Bulgarian Geoph. J. 1996. V. XXII. № 4. Р. 40-49.

Гусев А.А., Шумилина Л.С. Геометрия сейсмоактивного объема коры и мантии в районе Камчатки и Командорских островов // Исследования по физике землетрясений / Ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1976. С. 194-200.

Гусев А.А., Шумилина Л.С. Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования // Сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. С. 289-299.

Гутенберг Б., Рихтер К.Ф. Магнитуда, интенсивность, энергия и ускорение как параметры землетрясений. (I). (II) // Слабые землетрясения. М.: Изд-во Иностранной литературы. 1961. С. 45-71. С. 72-119.

Дроздюк В.Н. Кручение зданий при землетрясениях // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПИ, 2004. С. 257-259.

Егоров О.Н. Оценка сейсмичности горных регионов при отсутствии наблюдаемых инструментальных данных // 1-я Международная конференция «Сейсмическая безопасность урбанизированных территорий». 12-16 февраля 1996. Петропавловск-Камчатский. С. 19.

Егоров О.Н. Геодинамика и палеосейсмичность фланговых областей северо-западного сектора зоны перехода Тихий океан – континент. М.: Наука, 2008. 183 с.

Зубин М.И., Таракановский А.А. Тектоника и особенности поля силы тяжести района Ключевской группы вулканов // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 17-28.

Калинин В.А. Родкин М.В., Томашевская И.С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 157 с.

Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985, 264 с.

Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. 1992. Новосибирск Наука. 96 с.

Кузнецов В.В. Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.

Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 367 с.

Леонов В.Л., Егоров О.Н. Обвалы и оползни на территории Корякского автономного округа, связанная с ними опасность и факторы ее определяющие // Вопросы географии Камчатки. 1998. Вып. 11.

Линьков Е.М. Сейсмические явления. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 248 с.

Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 151 – 162.

Мишин С.В. Модель процесса землетрясения // Физические процессы в очагах землетрясений / Ред. М.А. Садовский, В.И. Мячкин. М.: Наука, 1980. С. 166-171.

Мишин С.В. Элементы сейсмометрии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1993. 167 с.

Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.

Мороз Ю.Ф. Глубинное строение юго-западной части Корякского нагорья // Сов. геология. 1987. № 5. С. 118-123.

- Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
- Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи. СПб, 1893. 536 с.
- Николаевский В.Н. Дилатансия и теория очага землетрясения // Успехи механики. 1980. Т. 3. № 1. С. 71-101.
- Опыт прогнозирования сейсмической опасности на Камчатке в 1995-1996 гг. (по материалам работы Межведомственного научно-технического экспертного совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности). Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. 83 с.
- Проблемы сейсмичности Дальнего Востока / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН. 2000. 318 с.
- Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1997. 301 с.
- Пурин А.А. Землетрясения Камчатки и их регистрация. Петропавловск-Камчатский. 1917. 23 с.
- Рекомендации по усилению конструкций блочных и панельных зданий на сейсмические воздействия (на примере Камчатки). Петропавловск-Камчатский – М.: Камчатгражданпроект - КБ по железобетону им. А.А. Якушева, 1993. 207 с.
- Ризниченко Ю.В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
- Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
- Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Госуд. изд-во Техничко-теоретической лит-ры, 1955. 544 с.
- Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 192 с.
- Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1977. 248 с.
- Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. 308 с.
- Сильные камчатские землетрясения 1971 года / Ред. С.А. Федотов. Владивосток: ИВ ДВНЦ АН СССР, 1975. 156 с.
- Смирнов С.Б. Ударно-волновая концепция сейсмического сооружения // Сейсмостойкое строительство. 1992. № 9. С. 70-73.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Строительство в сейсмоопасных районах. СНиП II-7-81*. М.: Госстрой России, 2000. 44 с.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект новых карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмостойкое строительство. 1998. № 4. С. 30-34.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А. Вулканизм и сейсмичность, наука, общество, события и жизнь (статьи, беседы и выступления 1952-2002 гг.). Петропавловск-Камчатский: «Новая книга», 2004. 184 с.
- Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
- Gusev A.A., Gordeev E.I., Guseva E.M., et al. The first version of the $A_{max}(M_W, R)$ relationship for Kamchatka // Pure appl. Geophys. 1997. V. 149. P. 299-312.
- Gutenberg B. Amplitudes of surface waves and magnitude of shallow earthquakes // Bull. Seism. Soc. Am. 1945a. V. 35. P. 3.
- Gutenberg B. Amplitudes of P, PP, and S and magnitudes of shallow earthquakes // Bull. Seism. Soc. Am. 1945b. V. 35. P. 57.

- Gutenberg B.* Magnitude determination for deep-focus earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1945c. V. 35. P. 117.
- Gutenberg B., Richter C.F.* On seismic waves (third paper) // *Gerlands Beitr. Geophys.* 1936. V. 47. P. 73.
- Jeffreys H.* The Pamir earthquake of 1911, February 18, in relation to the depths of earthquake foci // *Month. Not. Royal Astr. Soc., Geophys. Suppl.* 1923. V. 1. P. 22.
- Jeffreys H.* On the amplitudes of bodily seismic waves // *Month. Not. Royal Astr. Soc., Geophys. Suppl.* 1926. V. 1. P. 334.
- Jeffreys H.* Damping in bodily seismic waves // *Month. Not. Royal Astr. Soc., Geophys. Suppl.* 1931. V. 2. P. 318.
- Kawasumi H.* Study of seismic waves // *Bull. Earthqu. Res. Inst.* 1933. V. 11. P. 403.
- Reid H.F.* The California earthquake of April 18 1906. V.2 // *The mechanics of the earthquake.* The Carnegie Inst. Washington, 1910.
- Reid H.F.* The elastic-rebound theory of earthquakes. University of California Publ. Geol. Sci. 1911. V. 6. P. 413-444.
- Richter C.F.* An instrumental earthquake magnitude scale // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1935. V. 25. P. 1.
- Wadati K.* Shallow and deep earthquakes // *Geophys. Mag.* 1931. V. 4. P. 231.

4. СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИИ

Основы теории упругости: тензор деформации, тензор напряжений, закон Гука, упругие модули, однородные деформации, упругие волны в изотропной среде, законы Ферма, Гюйгенса, Снеллиуса. Сейсмические волны. Развитие сейсмометрических наблюдений: сейсмические станции и их сети, годографы, траектории волн внутри Земли. Определение скорости распространения сейсмических волн с помощью уравнения Гертлоца-Вихерта. Скорости продольных и поперечных волн как функции радиуса Земли. Состояние вещества Земли по данным сейсмологии. Земная кора. Литосфера и астеносфера. Сейсмология и глобальная тектоника.

Основы теории упругости [Ландау, Лифшиц, 2003, с. 9-25, 130-144]

Тензор деформации

Механика твердых тел, рассматриваемых как сплошные среды, составляет содержание *теории упругости*. Основные уравнения теории упругости были установлены О.Л. Коши и С.Д. Пуассоном в 20-х годах 19 века (подробнее см. главу 15).

Под влиянием приложенных сил твердые тела в той или иной степени деформируются, т.е. изменяют свою форму и объем. Для математического описания деформации тела поступают следующим образом. Положение каждой точки тела определяется ее радиус-вектором $\mathbf{r}$ (с компонентами $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$) в некоторой системе координат. При деформировании тела все его точки, вообще говоря, смещаются. Рассмотрим какую-нибудь определенную точку тела; если ее радиус-вектор до деформирования был $\mathbf{r}$, то в деформированном теле он будет иметь некоторое другое значение $\mathbf{r}'$ (с компонентами x'_i). Смещение точки тела при деформировании изобразится тогда вектором $\mathbf{r}' - \mathbf{r}$, который обозначим буквой $\mathbf{u}$:

$$u_i = x'_i - x_i. \quad (4.1)$$

Вектор $\mathbf{u}$ называют *вектором деформации* (или *вектором смещения*). Знание вектора $\mathbf{u}$ как функции от x_i полностью определяет деформацию тела.

При деформировании тела меняются расстояния между его точками. Если радиус-вектор между ними до деформирования был dx_i , то в деформированном теле радиус-вектор между теми же двумя точками будет $dx'_i = dx_i + du_i$. Само расстояние между точками до деформирования было равно:

$$dl = \sqrt{dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2},$$

а после деформирования:

$$dl' = \sqrt{dx_1'^2 + dx_2'^2 + dx_3'^2}.$$

Окончательно получаем:

$$dl'^2 = dl^2 + 2u_{ik} dx_i dx_k, \quad (4.2)$$

где

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_l}{\partial x_i} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right). \quad (4.3)$$

Этими выражениями определяется изменение элемента длины при деформировании тела. Тензор u_{ik} называется *тензором деформации*; по своему определению он симметричен:

$$u_{ik} = u_{ki}. \quad (4.4)$$

Как и всякий симметричный тензор, тензор u_{ik} в каждой точке можно привести к главным осям и убедиться, что в каждом элементе объема тела деформацию можно рассматривать как совокупность трех независимых деформации по трем перпендикулярным направлениям – главным осям тензора деформации. Практически почти во всех случаях деформирования тел деформации оказываются малыми. Это значит, что изменение любого расстояния в теле оказывается малым по сравнению с самим расстоянием. Другими словами, относительные удлинения малы по сравнению с единицей.

За исключением некоторых особых случаев, которых касаться не будем, если тело подвергается малой деформации, то все компоненты тензора деформации также являются малыми. Поэтому в выражении (4.3) можно пренебречь последним членом как малой величиной второго порядка. Таким образом, в случае малых деформаций тензор деформации определится выражением:

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right). \quad (4.5)$$

Итак, силы являются причиной возникающих в теле движений (перемещений), а деформации – результатом движений [Хайкин, 1963, с. 176].

Основное допущение классической теории упругости

В недеформированном теле расположение молекул соответствует состоянию его теплового равновесия. При этом все его части находятся друг с другом и в механическом равновесии. Это значит, что если выделить внутри тела какой-нибудь объем, то равнодействующая всех сил, действующих на этот объем со стороны других частей, равна нулю.

При деформировании же расположение молекул меняется, и тело выводится из состояния равновесия, в котором оно находилось первоначально. В результате в нем возникнут силы, стремящиеся вернуть тело в состояние равновесия. Эти возникающие при деформировании внутренние силы называются *внутренними напряжениями*. Если тело не деформировано, то внутренние напряжения в нем отсутствуют.

Внутренние напряжения обуславливаются молекулярными связями, т.е. силами взаимодействия молекул тела друг с другом. Весьма существенным для теории упругости является то обстоятельство, что молекулярные силы обладают очень незначительным радиусом действия. Их влияние распространяется вокруг создающей их частицы лишь на расстоянии порядка межмолекулярных. Но в теории упругости, как в макроскопической теории, рассматриваются только расстояния, большие по сравнению с межмолекулярными. Поэтому «радиус действия» молекулярных сил в теории упругости должен считаться равным нулю. Можно сказать, что силы, обуславливающие внутренние напряжения, являются в теории упругости силами «близкодействующими», передающимися от каждой точки только к ближайшим с нею точкам.

Таким образом, в классической теории упругости силы, действующие на какую-нибудь часть тела со стороны окружающих ее частей, проявляют это действие *только непосредственно через поверхность* этой части тела.

По сути, такой же идеологии применительно к теории упругости вслед за [Ландау, Лифшиц, 2003] придерживается и автор фундаментального труда [Хайкин, 1963, с. 484].

Тензор напряжений

Вывод о том, что все силы проявляют свое действие только через поверхность, является ключевым для классической теории упругости. Он позволяет для любого объема тела каждую из трех компонент равнодействующей всех внутренних напряжений сил $\int F_i dV$ (где F_i - сила, действующая на единицу объема dV) преобразовать в интеграл по поверхности этого объема. В таком случае, как следует из векторного анализа, вектор F_i должен являться дивергенцией некоторого тензора второго ранга, т.е. иметь вид:

$$F_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}. \quad (4.6)$$

Тогда сила, действующая на некоторый объем, сможет быть записана в виде интеграла по замкнутой поверхности, охватывающей этот объем:

$$\int F_i dV = \int \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \oint \sigma_{ik} df_k, \quad (4.7)$$

где вектор $df = \sqrt{df_1^2 + df_2^2 + df_3^2}$ направлен по внешней нормали к поверхности, охватывающей объем dV .

Тензор σ_{ik} называется *тензором напряжений*. Как видно из (4.7), $\sigma_{ik} df_k$ есть i -я компонента силы, действующей на элемент поверхности df . Выбирая элементы поверхности в плоскостях xy , yz , xz , находим, что компонента σ_{ik} тензора напряжений есть i -я компонента силы, действующей на единицу поверхности, перпендикулярную к оси x_k . Так, на единичную площадку, перпендикулярную к оси x , действуют нормальная к ней (направленная вдоль оси x) сила σ_{xx} и тангенциальные (направленные по осям y и z) силы σ_{yx} и σ_{zx} .

Отметим, что сила, действующая со стороны внутренних напряжений на всю поверхность тела, в отличие от (4.7) есть:

$$-\oint \sigma_{ik} df_k.$$

Записывая момент сил M_{ik} , действующих на некоторый объем тела, в виде:

$$M_{ik} = \int (F_i x_k - F_k x_i) dV$$

и требуя, чтобы он выражался в виде интеграла только по поверхности, получаем, что тензор напряжения является симметричным:

$$\sigma_{ik} = \sigma_{ki}. \quad (4.8)$$

К аналогичному выводу можно прийти и более простым путем [Сивухин, 1974, с. 383]. А именно. Момент dM_{ik} прямо пропорционален моменту инерции элементарного объема $dM_{ik} \approx I \approx (dV)^{5/3}$ и, следовательно, получаем $(F_i x_k - F_k x_i) dV = dM_{ik} \approx (dV)^{5/3} \approx 0$, откуда автоматически следует соотношение (4.8).

Симметрия тензора напряжений позволяет его в каждой точке привести его к *главным осям*, т.е. в каждой точке тензор напряжений может быть представлен в виде:

$$\sigma_{ik} = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} . \quad (4.8.1)$$

В равновесии силы внутренних напряжений должны взаимно компенсироваться в каждом элементе объема тела, т.е. должно быть $F_i = 0$. Таким образом, уравнения равновесия деформированного тела имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0 .$$

Если тело находится в поле силы тяжести, то должна исчезать сумма $\mathbf{F} + \rho \mathbf{g}$ сил внутренних напряжений $\mathbf{F}$ и силы тяжести $\rho \mathbf{g}$, действующей на единицу объема, ρ - плотность тела, $\mathbf{g}$ - вектор ускорения свободного падения. Уравнения равновесия в этом случае имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} + \rho g_i = 0 . \quad (4.9)$$

Энергия деформирования

Рассмотрим какое-нибудь деформированное тело и предположим, что его деформация меняется так, что вектор деформации u_i изменяется на малую величину δu_i . Определим работу, производимую при этом силами внутренних напряжений. Умножая силу (4.6) на перемещение δu_i и интегрируя по всему объему тела, получим:

$$\int \delta R dV = \int \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \delta u_i dV .$$

Символом δR обозначена работа сил внутренних напряжений в единице объема тела. Интегрируя по частям, рассматривая неограниченную среду, не деформированную на бесконечности, устремляя поверхность интегрирования в бесконечность, тогда на ней $\sigma_{ik} = 0$, получаем:

$$\int \delta R dV = - \int \sigma_{ik} \delta u_{ik} dV .$$

Таким образом, находим:

$$\delta R = -\sigma_{ik} \delta u_{ik} . \quad (4.10)$$

Полученная формула определяет работу по изменению тензора деформации, которая и определяет изменение внутренней энергии тела.

Если деформация тела достаточно мала, то по прекращении действия вызвавших деформацию сил тело возвращается в исходное недеформированное состояние. Такие деформации называются *упругими*. В этом случае вся работа (4.10) определяет изменение внутренней энергии элемента объема dE :

$$dE = -\delta R. \quad (4.11)$$

При больших деформациях прекращение действия внешних сил не приводит к полному исчезновению деформации. Остается, как говорят, некоторая *остаточная деформация* и состояние тела отличается от того, в каком оно находилось до приложения к нему сил. Такие деформации называются *пластическими*, для пластических тел выражение (4.11) не выполняется.

С учетом (4.10), (4.11) для упругих тел получаем одно из основных соотношений термодинамики деформирования:

$$\sigma_{ik} = \frac{\partial E}{\partial u_{ik}}. \quad (4.12)$$

Закон Гука

При нулевом тензоре деформации $u_{ik} = 0$ тензор напряжений также должен быть нулевым $\sigma_{ik} = 0$. Следовательно, в разложении энергии E по степеням u_{ik} должны отсутствовать линейные члены. Далее, поскольку энергия является величиной скалярной, то каждый член в разложении E должен быть скаляром. Из компонент симметричного тензора u_{ik} (4.5) можно составить два независимых скаляра второй степени; в качестве них можно выбрать квадрат u_{ii}^2 суммы диагональных компонент и сумму u_{ik}^2 квадратов всех компонент тензора u_{ik} . Разлагая E по степеням u_{ik} , получим, следовательно, с точностью до членов второго порядка выражение вида:

$$E = \frac{\lambda}{2} u_{ii}^2 + \mu u_{ik}^2. \quad (4.13)$$

Полученное соотношение является общим выражением для энергии деформированного изотропного тела. Величины λ и μ называются *коэффициентами Ламэ*.

Всякую деформацию можно представить в виде суммы деформаций *чистого сдвига* и *всестороннего сжатия*. Для этого достаточно написать тождество:

$$u_{ik} = (u_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} u_{ll}) + \frac{1}{3} \delta_{ik} u_{ll}, \quad (4.14)$$

где δ_{ik} - символ Кронекера: $\delta_{ik} = 1$ при $i = k$ и $\delta_{ik} = 0$ при $i \neq k$. Первый член в (4.14) представляет собой, очевидно, чистый сдвиг, поскольку сумма его диагональных членов равна нулю (т.к. $\delta_{ll} = \delta_{11} + \delta_{22} + \delta_{33} = 3$). Второй член связан со всесторонним сжатием.

В качестве общего выражения для энергии деформированного состояния изотропного тела удобно написать вместо (4.13) другое выражение, воспользовавшись указанным (4.14) разложением произвольной деформации на чистый сдвиг и всестороннее сжатие. Выберем в качестве двух независимых скаляров второй степени суммы квадратов компонент соответственно первого и второго членов в (4.13). Тогда выражение для энергии (4.13) можно переписать в виде:

$$E = \mu(u_{ik} - \frac{1}{3}\delta_{iki}u_{ll})^2 + \frac{K}{2}u_{ll}^2. \quad (4.15)$$

Величины $K > 0$ и $\mu > 0$ называются соответственно *модулем всестороннего сжатия* и *модулем сдвига*. Величина K связана с коэффициентами Ламэ соотношением:

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu. \quad (4.16)$$

Дифференцируя (4.15), из (4.12) для тензора напряжений получаем соотношение:

$$\sigma_{ik} = Ku_{ll}\delta_{ik} + 2\mu(u_{ik} - \frac{1}{3}\delta_{ik}u_{ll}). \quad (4.17)$$

Нетрудно получить и обратную формулу для тензора деформации через тензор напряжений:

$$u_{ik} = \frac{1}{9K}\delta_{ik}\sigma_{ll} + \frac{1}{2\mu}(\sigma_{ik} - \frac{1}{3}\delta_{ik}\sigma_{ll}). \quad (4.18)$$

Из полученного выражения (4.18) видим, что тензор деформации u_{ik} является линейной функцией тензора напряжений σ_{ik} . Другими словами, деформация пропорциональна приложенным к телу силам. Этот закон, имеющий место для малых деформаций, называют *законом Гука*. Соотношение (4.17) называется *обобщенным законом Гука* [Исакович, 1973, с. 441-442].

Однородные деформации

Рассмотрим простейший случай *однородной деформации*, т.е. деформаций, при которых тензор деформации постоянен вдоль всего объема тела.

Рассмотрим *простое растяжение* (или сжатие) стержня. Пусть стержень расположен вдоль оси z и к его концам приложены силы, растягивающие его в противоположные стороны. Эти силы действуют равномерно на всю поверхность концов стержня; сила, действующая на единицу поверхности, пусть будет p .

Поскольку деформация однородна, т.е. u_{ik} постоянны вдоль тела, то постоянен также и тензор напряжений σ_{ik} , а поэтому его можно определить из граничных условий. На боковой поверхности стержня внешние силы отсутствуют, откуда следует, что $\sigma_{ik}n_k = 0$, поскольку единичный вектор $\vec{n}$ на боковой поверхности перпендикулярен к оси z , т.е. имеет только компоненты n_x , n_y , то отсюда следует, что все компоненты σ_{ik} , за исключением только σ_{zz} , равны нулю. На поверхности концов стержня имеем $\sigma_{zi}n_i = p$, откуда $\sigma_{zz} = p$.

Для однородной деформации растяжения закона Гука (4.18) переписывается в виде:

$$u_{xx} = u_{yy} = -\frac{1}{3}(\frac{1}{2\mu} - \frac{1}{3K})\sigma_{zz}, \quad u_{zz} = \frac{1}{3}(\frac{1}{3K} + \frac{1}{\mu})\sigma_{zz}, \quad \sigma_{zz} = p. \quad (4.19)$$

Компонента u_{zz} :

$$u_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{E} = \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\Delta l}{l}, \quad \sigma_{zz} = p, \quad (4.20)$$

определяет *относительное удлинение стержня* вдоль оси z : $\Delta l/l$, где l – длина стержня до деформирования, $l + \Delta l$ – длина стержня в результате деформирования. Коэффициент при p – $1/E$ называют коэффициентом растяжения, а обратную величину – *модулем растяжения* (или *модулем Юнга*) E :

$$E = \frac{9K\mu}{3K + \mu}. \quad (4.21)$$

В случае однородного растяжения закон Гука примет вид:

$$p = E \frac{\Delta l}{l}.$$

Компоненты u_{xx} и u_{yy} определяют *относительное сжатие стержня* $\Delta a/a$ в поперечном направлении:

$$\frac{\Delta a}{a} = -\frac{1}{3} \left(\frac{1}{2\mu} - \frac{1}{3K} \right),$$

где a – поперечный размер стержня до деформирования, $a + \Delta a$ – поперечный размер стержня в результате деформирования. Отношение относительного поперечного сжатия к соответствующему относительному продольному удлинению

$$u_{xx} = -\sigma u_{zz}. \quad (4.22)$$

называют *коэффициентом Пуассона* σ [Сивухин, 1974, с. 388]:

$$\sigma = -\frac{\Delta a}{a} : \frac{\Delta l}{l}, \quad \sigma = \frac{1}{2} \frac{3K - 2\mu}{3K + \mu}. \quad (4.23)$$

Поскольку K и μ всегда положительны, то коэффициент Пуассона может изменяться в пределах:

$$-1 \leq \sigma \leq \frac{1}{2}.$$

Фактически коэффициент Пуассона меняется только в пределах:

$$0 \leq \sigma \leq \frac{1}{2}, \quad (4.24)$$

так как в настоящее время неизвестны тела, у которых было бы $\sigma < 0$, т.е. которые бы утолщались при продольном растяжении.

Коэффициент Пуассона зависит только от материала тела и является одной из важнейших постоянных, характеризующих его упругие свойства. Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона σ полностью характеризуют упругие свойства изотропного

материала. Все прочие упругие постоянные могут быть выражены через них. Можно показать, что справедливы следующие соотношения:

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1-2\sigma)(1+\sigma)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}, \quad K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}. \quad (4.25)$$

В частности, из (4.25) можно видеть, что для абсолютно несжимаемого тела, для которого $K = 0$, коэффициент Пуассона равен $\sigma = 1/2$.

Соотношение (4.17) можно переписать в виде:

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\sigma} \left(u_{ik}^2 + \frac{\sigma}{1-2\sigma} u_{ll}^2 \right). \quad (4.26)$$

Подставляя в (4.26) выражение для тензора деформации (4.5), уравнения равновесия (4.9) запишем в виде:

$$\frac{E}{2(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} + \frac{E}{2(1+\sigma)(1-2\sigma)} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_i \partial x_l} + \rho g_i = 0, \quad (4.27)$$

где индексы i и l , как и везде выше, принимают значения $i = 1, 2, 3$; $l = 1, 2, 3$. В векторном виде уравнения (4.27) можно переписать в виде одного уравнения:

$$\Delta \vec{u} + \frac{1}{1-2\sigma} \text{grad div} \vec{u} = -\rho \vec{g} \frac{2(1+\sigma)}{E}. \quad (4.28)$$

Адиабатические процессы

Следует отметить, что все модули и коэффициенты упругости, о которых мы говорили выше, и будем говорить в дальнейшем, следовало бы для точности называть *изотермическими модулями и коэффициентами*. Они характеризуют деформации тел в предположении, что температура их поддерживается постоянной. Это обычно имеет место в случае статических деформаций. Но если деформации динамические (например, волны в упругих средах), то они могут происходить настолько быстро, что разности температур, возникшие при деформации, не успевают выравниваться в результате теплообмена. Важнейшим является предельный случай, когда между различно нагретыми частями среды теплообмен совсем не происходит. Соответствующие процессы, модули и коэффициенты упругости называются *адиабатическими* [Сивухин, 1974, с. 389].

В настоящей книге все процессы, связанные с деформированием и распространением волн, рассматриваются как адиабатические.

Продольные и поперечные упругие волны в изотропной среде

Для того чтобы получить уравнение движения упругой среды, надо в соответствии со вторым законом Ньютона приравнять силу внутренних напряжений (4.6) произведению ускорения $\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$ на массу единицы объема тела, т.е. на его плотность ρ :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}. \quad (4.29)$$

Или в векторном виде используя соотношение (4.28):

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}_i}{\partial t^2} = \frac{E}{2(1+\sigma)} \Delta \vec{u} + \frac{E}{2(1+\sigma)(1-2\sigma)} \text{grad div} \vec{u}. \quad (4.30)$$

Поскольку все деформации предполагаются малыми, то рассматриваемые в теории упругости движения представляют собой малые *упругие колебания* или *волны*.

Рассмотрим плоскую упругую волну в неограниченной изотропной среде, т.е. волны, в которой деформация $\vec{u}$ является функцией только от одной из координат, скажем, от x (и от времени t). Все производные по y и z в уравнениях (4.30) исчезают, и для отдельных компонент вектора $\vec{u}$ получаем следующие уравнения:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} - \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = 0 \quad (4.31)$$

(уравнение для u_z такое же, как и для u_y), где введены обозначения:

$$c_l = \left(\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)} \right)^{1/2} = \left(\frac{3K+4\mu}{3\rho} \right)^{1/2} = \left(\frac{\lambda+2\mu}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (4.32)$$

$$c_t = \left(\frac{E}{2\rho(1+\sigma)} \right)^{1/2} = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}. \quad (4.33)$$

Уравнения движения (4.31) можно переписать в векторном виде:

$$\frac{\partial^2 \vec{u}_l}{\partial t^2} - c_l^2 \Delta \vec{u}_l = 0, \quad \frac{\partial^2 \vec{u}_t}{\partial t^2} - c_t^2 \Delta \vec{u}_t = 0. \quad (4.34)$$

Уравнения (4.31) и (4.34) представляют собой обычные волновые уравнения в одном измерении, и входящие в них величины c_l и c_t являются скоростями распространения волны. Видим, что скорость распространения волны оказывается различной для компоненты u_x , с одной стороны, и компонент u_y и u_z - с другой.

Таким образом, упругая волна представляет собой по существу две независимо распространяющиеся волны. В одной из них (u_x) смещение направлено вдоль распространения самой волны; такую волну называют *продольной*, она распространяется со скоростью c_l . В другой (u_y, u_z) - смещение направлено в плоскости, перпендикулярной направлению распространения; такую волну называют *поперечной*, она распространяется со скоростью c_t . Как видно из (4.32) и (4.33), скорость c_l всегда больше скорости c_t :

$$c_l > \sqrt{4/3} c_t. \quad (4.35)$$

В поперечной волне имеются только компоненты u_y и u_z , и, поскольку они не зависят ни от y ни от z , для такой волны $\text{div} \vec{u} = 0$. Таким образом, поперечные волны не

связаны с изменением объема отдельных участков тела. Напротив, для продольных волн $\text{div} \vec{u} \neq 0$; эти волны сопровождаются сжатиями и расширениями в теле.

В монохроматической упругой волне вектор смещения имеет вид:

$$\vec{u} = \text{Re}(\vec{u}_0(r)e^{-i\omega t}), \quad (4.36)$$

где $\vec{u}_0$ - функция координат, ω - частота, Re - обозначает, что берется только реальная часть от соотношения, стоящего в скобках, т.е. $\text{Re}(a + ib) = a$. При подстановке (4.36) в (4.31) или (4.34) получаем:

$$\Delta \vec{u}_l + k_l^2 \vec{u}_l = 0, \quad \Delta \vec{u}_t + k_t^2 \vec{u}_t = 0, \quad (4.37)$$

где $k_l = \omega/c_l$, $k_t = \omega/c_t$ - волновые векторы продольной и поперечной волн.

Поверхностные упругие волны

Особым видом упругих волн являются волны, распространяющиеся вблизи поверхности среды и не проникающие в глубь нее - волны Рэлея, открытые в 1885-1887 гг. английским физиком Дж.У. Рэлеем (D.W. Rayleigh).

Поверхность упругой среды будем предполагать плоской и выберем ее в качестве плоскости xy ; области среды пусть соответствует $z < 0$.

Напишем уравнение движения в виде (4.34):

$$\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - c^2 \Delta \vec{u} = 0, \quad (4.38)$$

где u - какая-либо из компонент векторов; $\vec{u}_l$, $\vec{u}_t$, а c - соответствующая ей скорость c_l или c_t .

Решение уравнения (4.38) будем искать для полупространства $z < 0$ при граничном условии на поверхности $z = 0$, отвечающем свободной поверхности, для которой должно выполняться условие $\sigma_{ik} n_k = 0$. Поскольку вектор нормали $\vec{n}$ направлен по оси z , то отсюда граничные условия можно переписать в виде:

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0, \quad (4.39)$$

откуда

$$u_{xx} = 0, \quad u_{yz} = 0, \quad \sigma(u_{xx} + u_{yy}) + (1 - \sigma)u_{zz} = 0. \quad (4.40)$$

Поскольку все величины не зависят от координаты y , то второе из условий (4.40) дает:

$$u_y = 0. \quad (4.41)$$

Таким образом, в поверхностной волне вектор деформации $\vec{u}$ лежит в плоскости, проведенной через направление распространения волны перпендикулярно к поверхности и частицы среды на поверхности $z = 0$ и под ней движутся по эллипсам в направлении, обратном направлению распространения волны.

Решение для смещения задачи (4.38) – (4.40) будем искать в виде:

$$u = e^{i(kx - \omega t)} f(z). \quad (4.42)$$

Подставляя (4.42) в уравнение движения (4.38) с точностью до множителя A , определяемого условиями возбуждения волны, получим решение для смещения в виде:

$$u = A e^{i(kx - \omega t)} e^{\chi z}, \quad (4.43)$$

где скорость затухания смещения в волне с глубиной z определится соотношением:

$$\chi = (k^2 - \frac{\omega^2}{c^2})^{1/2}. \quad (4.44)$$

Истинный вектор деформации $\vec{u}$ в поверхностной волне является суммой векторов $\vec{u}_l$ и $\vec{u}_t$, компоненты каждого из которых удовлетворяют уравнению (4.38) со скоростью $c = c_l$ для $\vec{u}_l$ и $c = c_t$ для $\vec{u}_t$. В случае объемных волн в неограниченной среде эти две части представляют собой две независимо распространяющиеся волны. В случае же поверхностных волн из-за наличия граничных условий (4.39), (4.40) такое разделение на две независимые части оказывается невозможным. Вектор смещения $\vec{u}$ должен быть определенной линейной комбинацией векторов $\vec{u}_l$ и $\vec{u}_t$. По поводу этих последних надо также отметить, что они отнюдь не имеют теперь смысла параллельных и перпендикулярных к направлению распространения волны компонент смещения.

Подставляя решение (4.43) в граничные условия для скорости поверхностной волны c_R получим выражение:

$$c_R = c_t \xi, \quad (4.45)$$

где ξ есть решение следующего уравнения:

$$\xi^6 - 8\xi^4 + 8\xi^2(3 - 2\frac{c_t^2}{c_l^2}) - 16(1 - \frac{c_t^2}{c_l^2}) = 0. \quad (4.46)$$

Уравнение (4.46) имеет единственное решение. Величина отношения $\frac{c_t}{c_l}$ в соответствии с (4.35) для различных веществ изменяется в пределах:

$$0,874 \leq \xi \leq 0,995. \quad (4.47)$$

Итак, в соответствии с (4.35), (4.45) и (4.47) скорости упругих волн между собой соотносятся следующим образом:

$$c_l > c_t > c_R, \quad (4.48)$$

или, точнее:

$$0,866c_l > c_t = \xi_1 c_R, \quad 1,005 \leq \xi_1 \leq 1,144. \quad (4.49)$$

Отличительной особенностью поверхностных волн является, в соответствии с (4.42) – (4.44), практически полное (около 90%) сосредоточение связанной с волной энергии в приповерхностном слое толщиной порядка длины поверхностной волны

$$\lambda_R = c_R / \nu. \quad (4.50)$$

Поэтому поверхностные волны с большими частотами ν (с меньшими периодами) проникают на меньшую глубину (так называемый скин-эффект).

К важной разновидности поверхностных волн относятся *волны Лява*, существующие в слоистой системе, состоящей из упругого полупространства $z > 0$, $0 \leq x < \infty$, $0 \leq y < \infty$ и слоя $-h \leq z \leq 0$, расположенного над ним [Красильников, Крылов, 1984, с. 204]. В такой слоистой системе могут существовать чисто сдвиговые поверхностные волны. В случае их распространения вдоль оси x , такие волны описываются следующими выражениями:

$$u_y = A \cos(s_1(h+z)) e^{i(kx - \omega t)}, \quad -h < z < 0, \quad (4.51.1)$$

$$u_y = A \cos(s_1 h) e^{i(kx - s_2 z - \omega t)}, \quad z > 0, \quad (4.51.2)$$

где A – постоянная, определяемая условиями возбуждения волны,

$$s_1 = (k_{t1}^2 - k^2)^{1/2}, \quad s_2 = (k^2 - k_{t2}^2)^{1/2}, \quad k_{t1,2} = \omega / c_{t1,2}, \quad (4.52.1)$$

c_{t1} , c_{t2} – скорости поперечных волн в слое и полупространстве соответственно, а волновое число k определяется из дисперсионного уравнения:

$$\operatorname{tg}(s_1 h) = \mu_2 s_2 / \mu_1 s_1. \quad (4.52.2)$$

При условии, соответствующему замедляющему слою:

$$c_{t1} < c_{t2} \quad (4.53)$$

уравнение (4.52.2) имеет действительные корни k_n , лежащие в пределах $k_{t2} < k_n < k_{t1}$, т.е. фазовая скорость волн Лява c_L больше скорости поперечных волн в слое, но меньше их скорости в полупространстве:

$$c_{t1} < c_L < c_{t2}. \quad (4.54)$$

Таким образом, в слоистой системе с $c_{t1} < c_{t2}$ уравнение (4.48), определяющее соотношения между скоростями, переписывается в виде:

$$c_l > c_{t1} > c_L > c_{t2} > c_R. \quad (4.55)$$

Кроме волн Лява в слоистой среде вдоль границы слой-полупространство могут распространяться так называемые *волны Стоунли*, которые правильнее было бы называть *граничными волнами*.

Истинное величие науки состоит в том, что часто можно найти такой способ рассуждения, при котором закон становится очевидным [Фейман, 1967, с. 9]. Поэтому основные законы распространения волн и были установлены задолго до того, как была создана количественная теория, описанная выше. К таким законам, в первую очередь, относятся законы В. Снеллиуса (Snellius van Royen, 1580-1626), П. Ферма (Fermat, 1601-1665) и принцип Х. Гюйгенса (Huygens, 1665-1681).

Впервые общий принцип, наглядно объясняющий закон поведения света, был предложен примерно в 1650 г. П. Ферма и получил название *принципа наименьшего времени* или *принципа Ферма*: свет выбирает из всех возможных путей, соединяющих две точки, тот путь, который требует *наименьшего времени* для его прохождения [Фейман, 1967, с. 9].

В некоторых частных случаях приближенное решение задачи распространения волны в среде можно найти с помощью геометрического построения, основанного на *принципе Гюйгенса*, сформулированного в 1678 г. и опубликованного в 1690 г. создателем волновой теории света Х. Гюйгенсом [Храмов, 1983, с. 95]. Согласно этому принципу, каждую точку среды, до которой в данный момент дошел фронт волны, можно рассматривать как источник вторичных элементарных волн. Принцип Гюйгенса позволяет определить расположение фронта волны в последующие моменты времени, если известно расположение фронта в некоторый начальный момент, а также направление и скорость распространения волн [Шебакин, 1981, с. 216].

Закон Снеллиуса [Ландау, Лифшиц, 2003, с. 133-134]. Рассмотрим отражение и преломление плоской монохроматической (строго одной частоты) упругой волны на границе раздела между двумя различными упругими средами. При этом надо иметь в виду, что при отражении и преломлении характер волны, вообще говоря, меняется. Если на границу раздела падает чисто поперечная или чисто продольная волна, то в результате получаются смешанные волны, содержащие как поперечные, так и продольные части. Характер волны не меняется (как явствует из соображений симметрии) только в случае перпендикулярного падения волны на поверхность раздела и в случае падения под произвольным углом поперечной волны с параллельными плоскости раздела колебаниями.

Соотношения, определяющие направления отраженной и преломленной волн, могут быть получены непосредственно из постоянства частоты и касательных к поверхности раздела компонент волнового вектора. Пусть θ и θ' - угол падения и угол отражения (или преломления), а c , c' - скорости отраженной (или преломленной) волн. Тогда справедливо соотношение, называемое *законом Снеллиуса*:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{c}{c'}. \quad (4.56)$$

Когда скорость распространения отраженной или преломленной волны больше скорости падающей волны, должен существовать критический угол падения, при котором угол отражения или преломления становится равным $\pi/2$. Для углов падения, больших этого угла, соотношение (4.56) перестает быть верным и положение становится подобным тому, которое в оптике известно как *полное внутреннее отражение* [Кольский, 1955, с. 43].

Упругие волны в твердых телах и сейсмические волны

На рис. 4.1 представлена полученная на сейсмостанции Петропавловск-Камчатский сейсмограмма от далекого сильного глубокого землетрясения с очагом в море Флорес

(Индонезия). На сейсмограмме отчетливо выделяется две группы волн. Волны, пришедшие на станцию первыми принято обозначать P , от Prima – первый. Эти волны с максимальной амплитудой записаны на вертикальном (Z) канале и по характеру записи на всех каналах, представляют собой продольные волны, скорости которых в сейсмологии принято обозначать через V_p . Вторую группу волн, пришедших на станцию несколько позже, принято обозначать S , от Second – второй. Наибольшую амплитуду эти волны *всегда* имеют на горизонтальных каналах (в данном случае на канале NS - Север-Юг) и поэтому представляют собой *волны сдвига*.

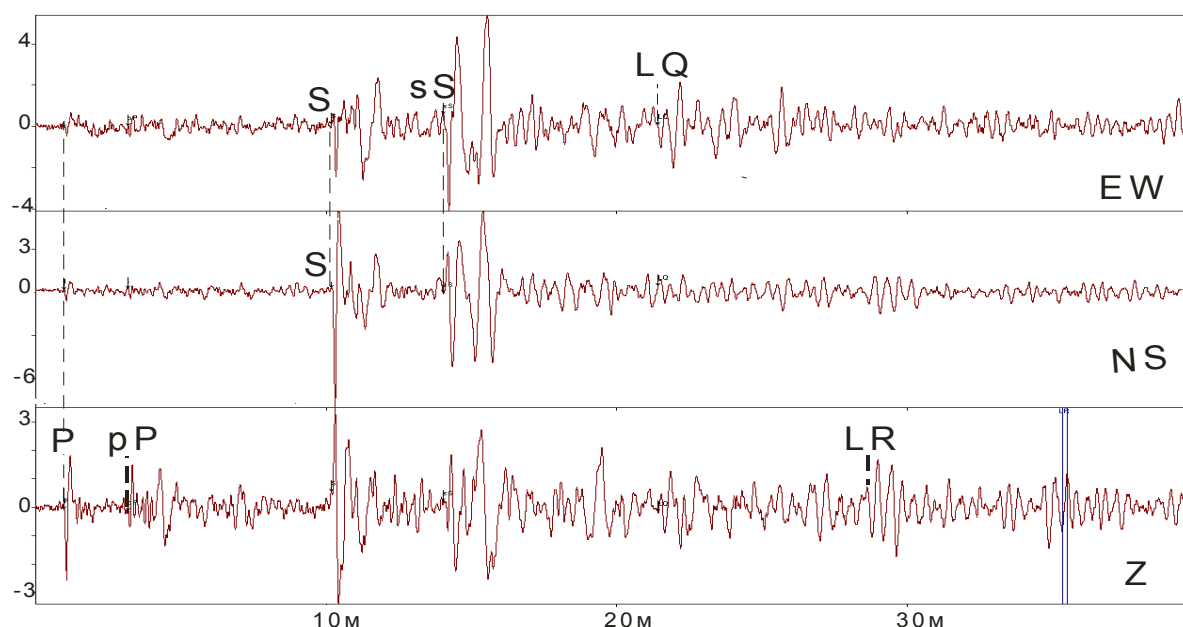


Рис. 4.1. Сейсмограмма глубокого ($H = 572$ км) землетрясения 09.09.2006 с очагом в море Флорес (Индонезия), зарегистрированного сейсмостанцией Петропавловск-Камчатский. Эпицентральное расстояние $\Delta = 69^\circ$. Станционные определения магнитуды: $M_S = 6,3$, $M_{PV} = 5,5$, $M_R = 5,2$; определения NEIS: $M_W = 6,3$. Горизонтальная шкала времени в минутах; вертикальная шкала смещений в микронах. Z , NS , EW – составляющие, ориентированные в вертикальном, Север-Юг и Восток-Запад направлениях. Обозначены вступления пришедших на станцию P и S волн и теоретические времена прихода волн Лява (L_Q) и Рэлея (L_R). Полосой обозначена часть записи, по которой оператором определялось значение магнитуды M_R .

На рис. 4.2 представлена полученная на сейсмостанции Петропавловск-Камчатский сейсмограмма от далекого сильного корового землетрясения 28.03.2005, $M = 8,5$ с очагом примерно в том же месте, что и на рис. 4.1, в районе Индонезии. Видно, что кроме описанных выше продольных P и поперечных S фаз сейсмограмма содержит и цуги «почти постоянных гармонических колебаний» с периодами сначала около 40 сек – фаза L_Q , а затем около 20 сек – фаза L_R . В соответствии с имеющимися в мировой практике данными, фаза L_Q – «это горизонтальные поперечные колебания; их вертикальная и радиальная горизонтальная компоненты близки нулю. Именно» как волны Лява «Гуттенберг впервые так и интерпретировал» их. Относительно волны L_R «горизонтальные приборы ... показывают, что колебания ... происходят в направлении ее распространения, но не в поперечном направлении. Это соответствует ... волне Рэлея» [Рихтер, 1963, с. 248-249].

Как видим данные, представленные на рис. 4.1 и 4.2, показывают, что скорости всех сейсмических волн P , S , L_Q и L_R , зарегистрированных станцией Петропавловск-Камчатский из очага землетрясения 25.04.2005, $M = 8,5$, удовлетворяют соотношению:

$$V_P > V_S > V_L > V_R. \quad (4.57)$$

В такой же последовательности эти же волны из очага землетрясения 28.03.2005, $M \approx 8,5$ были зарегистрированы и на *всех* сейсмических станциях Земли. В последовательности, определяемой соотношением (4.57), сейсмические волны регистрируются из очагов *всех* землетрясений планеты *всеми* расположенными на *всех* и возможных эпицентральных расстояниях и азимутах сейсмическими станциями, число которых с момента их появления на Земле вот уже в течение века составляет многие тысячи.

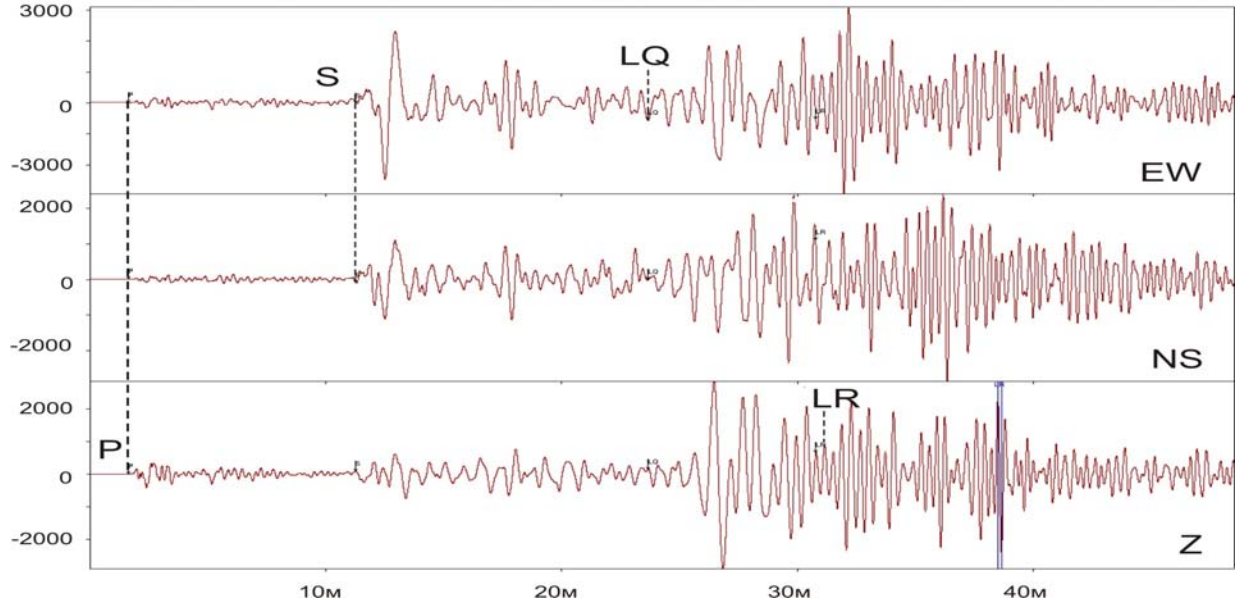


Рис. 4.2. Сейсмограмма корового землетрясения 28.03.2005 с очагом вблизи Индонезии, зарегистрированного сейсмостанцией Петропавловск-Камчатский. Эпицентральное расстояние $\Delta = 78^\circ$. Станционные определения магнитуды: $M_S = 8,7$, $M_{PV} = 8,1$, $M_R = 8,6$; определения NEIS: $M_W = 8,6$. Горизонтальная шкала времени в минутах; вертикальная шкала смещений в микронах. Z, NS, EW – составляющие, ориентированные в вертикальном, Север-Юг и Восток-Запад направлениях. Обозначены вступления пришедших на станцию P и S волн и волн Лява (L_Q) и Рэлея (L_R). Полосой обозначена часть записи, по которой оператором определялось значение магнитуды M_R .

Таким образом, правило (4.57), определяемое порядок вступления сейсмических волн на сейсмических станциях Земли, *всегда* совпадает с законом (4.48) или (4.55), установленным в рамках теории упругости. Это позволяет сейсмические волны P, S, L_Q и L_R интерпретировать как упругие волны c_l , c_t , c_L и c_R соответственно. Другими словами, приведенные данные доказывают: *сейсмические волны, распространяемые из очага землетрясения, с достаточно хорошим приближением можно считать упругими волнами* и, следовательно, количественно описывать их *в рамках теории упругости*.

Тогда в соответствии с (4.32), (4.45), (4.47), (4.54) значения скоростей сейсмических волн определяются из следующих соотношений:

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad \frac{V_P}{V_S} \approx 1,73, \quad V_R \approx 0,92V_S, \quad V_{S1} < V_L < V_{S2}, \quad (4.58)$$

где V_{S1} и V_{S2} – скорости поперечных волн в слое (земной коре) и полупространстве (ниже подошвы земной коры), λ и μ – коэффициент Ламэ и модуль сдвига вещества Земли.

Значения скоростей сейсмических волн по порядку величины близки скоростям в твердом теле, зависят от глубины, увеличиваясь вглубь Земли, и, как будет показано ниже, изменяются в следующих пределах:

$$0 < V_p \leq 14 \text{ км/с}, \quad 0 < V_s \leq 7 \text{ км/с}.$$

Следует отметить, что как сами понятия продольной и поперечной волн, так и первые их физические волновые свойства в физику твердого тела вообще и в теорию упругости в частности в конце 19 – начале 20 вв. пришли именно из сейсмологии. Этому, конечно, способствовало достаточно бурное развитие в одно и то же время и сейсмометрии и мировой сети сейсмических станций, которое проводилось, в значительной степени, по инициативе Б.Б. Голицына. Тем не менее, представляется, что обоснование начал практической сейсмологии вполне возможно провести, не опираясь сколько-нибудь существенным образом на теорию упругости. Эту мысль автор и хотел обосновать в настоящем разделе.

В этой связи отметим два следующих обстоятельства.

Первое. Изначально прочная и безальтернативная связка между сейсмологией и теорией упругости и первые теоретические и практические результаты, достигнутые Б.Б. Голицыным, Ф. Рейдом и Г. Джеффрисом в сейсмологии, на взгляд автора, и предопределили на целое столетие именно «очаговое» направление развития и теории и практики сейсмического процесса. Первые модели сейсмического процесса, как процесса, описывающего поведение в пространстве и во времени *совокупности взаимодействующих очагов землетрясений*, появились, фактически, только в конце 20 – начале 21 вв. Их развитие происходит достаточно вяло. На это, в частности, указывает и то, что даже такие очевидные фактические данные по миграции землетрясений и другим волновым свойствам сейсмичности (подробно см. часть II книги) на протяжении многих десятилетий с момента их открытия так пока и не получили своего надлежащего развития и признания. Правда, здесь существуют и объективные трудности, т.к. до настоящего времени многие из такого рода данных не представляется пока возможным проверить прямыми экспериментальными наблюдениями [Быков, 2005].

Второе. Очаговому направлению развития сейсмологии способствовали и более глубокие корни теоретического плана. Например, принцип Сен-Венана [Ризниченко, 1983, с. 11]. Так, в энциклопедическом словаре [Физический, 1983, с. 675] этот принцип сформулирован в виде фундаментального утверждения. Действительно, согласно принципу Сен-Венана «уравновешенная система сил, приложенная к какой-либо части поверхности однородного упругого тела, вызывает в нем напряжения, очень быстро убывающие по мере удаления от этой части и на расстояниях, существенно превышающих наибольший линейный размер области приложения нагрузок, напряжения и деформации оказываются пренебрежимо малыми».

Однако «фундаментальность» этого принципа для теоретической сейсмологии, на взгляд автора, сейсмологами была сильно преувеличена. Даже не всеми специалистами по теории упругости этот принцип воспринимается как основополагающий, чаще – как некое правило, облегчающее выполнение тех или иных вычислений. Например, в [Седов, 1973, с.364-365] принцип Сен-Венана, подтвержденный «множеством опытных данных и» подкрепленный «многими численными расчетами на частных примерах», «вытекает из ... общего свойства решений задач теории упругости». В работе [Жермен, 1965, с. 125-126] правило Сен-Венана оценивается как такой принцип, «который придает формулировкам граничных условий определенную гибкость и тем самым дает возможность расширить область применения теории упругости». В работе [Амензаде, 1976, с. 51-53, 56-57] принцип Сен-Венана рассматривается как «уравнения совместности в декартовой системе координат», которые позволяют «найти такое поле перемещений, для которого малая деформация «в декартовой системе координат ... является тензором деформаций». В

обстоятельных и фундаментальных учебниках [Ландау, Лифшиц, 2003; Сивухин, 1974; Фейман, Лейтон, Сэндс, 1966; Хайкин, 1963] о принципе Сен-Венана не сказано ни слова. Приведенная в предыдущем разделе этой главы выдержка из работы [Ландау, Лифшиц, 2003] однозначно характеризует принцип Сен-Венана - как локальный, обусловленный действием молекулярных сил. Такой же вывод следует и из книги [Хайкин, 1963, с. 484].

Все эти данные – высказывания и невысказывания, на взгляд автора, однозначно указывают на то, что роль теории упругости в обосновании теоретических и практических основ сейсмологии, с самого начала ее существования как науки, сильно преувеличены. И аналогия между теорией упругости и сейсмологией, проведенная в этом разделе, подтверждает такой тезис. Следовательно, можно ожидать, что результаты и выводы, полученные на сейсмологическом и геофизическом материале, окажется возможным использовать, в том числе, и для развития представлений самой теории упругости. Но это уже тема II части книги.

Развитие сейсмометрических наблюдений

Сейсмическая станция

Землетрясения, несомненно, постоянно «провоцировали» естествоиспытателей к созданию устройства для их регистрации. Пути процесса создания могут быть самыми разными - история науки и техники (см. главу 15) изобилует многими разными примерами. Известно высказывание, восходящее к временам, когда наука, натурфилософия, была единой: «Землетрясения, что звезды на небе: чем они ярче, тем их меньше». Видимо, по этой причине, первый прибор, определяющий направление на очаг землетрясения – сейсмоскоп, был изобретен китайским астрономом Чжан Хэном в 132 г. Он представлял собой бронзовую чашу диаметром 180 см. Восемь драконов – восемь направлений по частям света. В спокойном состоянии рычаги удерживали в пасти каждого из драконов по шарик. Шарик высвобождался из пасти, указывал направление на очаг случившегося землетрясения и с характерным звуком падал в раскрытый рот жабы. Так прибор извещал наблюдателя о происшедшем землетрясении и направлении на его очаг. Экземпляр прибора в натуральную величину выставлен в геологическом музее Лондона. При таких размерах сосуда, как показали современные оценки, прибор мог реагировать на землетрясения, эпицентр которых находился от него на расстоянии до 600 км [Викулин, Дроздук, Семенец, Широков, 1997, с. 81].

Первые сейсмографы – приборы, осуществляющие *запись* колебаний поверхности Земли, появились в середине 19 в. Сейсмограф, соответствующий современному определению, появился, предположительно, в 1880 г.

18 апреля 1889 г. геодезистом Ребер-Паншицем на Потсдамской обсерватории горизонтальными маятниками, следящими за периодическими колебаниями отвесной линии под влиянием лунно-солнечного притяжения, были зарегистрированы колебания, пришедшие, как потом оказалось, из очага землетрясения в Японии на удалении около 9000 км. Тем самым, была доказана принципиальная возможность регистрации сейсмических волн маятниковыми приборами. Как следствие, были усилены работы по созданию сейсмометрических приборов. Их большое разнообразие появляется в конце 19 в. – сейсмографы Вихерта (Геттинген), горизонтальные маятники Дж. Милна и Дж. Юинга (США), Боша (Страсбург) с маятником Омори (Япония) - Боша, Геккера (Потсдам), Фасцинелли (Италия), Шмитта (Утрехт) и др. Однако, все эти приборы для их установки требовали специального помещения и были крайне неудобны для регистрации землетрясений. Например, наиболее совершенный из таких приборов сейсмограф Э. Вихерта, при увеличении около 100-200 требовал для исключения влияния трения пишущего пера на бумагу использования маятника с массой около 1,5 тонн. А были созданы приборы с маятником весом 17 тонн!

В 1902 г. Б.Б. Голицыным был предложен достаточно «компактный» метод гальванометрической регистрации с электродинамическим преобразованием перемещения маятника сейсмографа в электрический ток, позволяющий регистрирующую часть сейсмической станции размещать в удобном месте. Первый опытный горизонтальный сейсмограф Голицына был построен в 1906 г., в этом же году установлен в Пулковской обсерватории и уже в 1907 г. рекомендован к внедрению на сейсмических станциях. В 1910 г. Б.Б. Голицыным был разработан вертикальный сейсмограф и с 1911 г. трехкомпонентные сейсмографы Голицына устанавливаются не только на российских станциях, но и за рубежом. Метод Голицына, по сути, и определил в 20 в. развитие всей сейсмологии [Викулин, Семенец, Широков, 1989, с. 23; Оноприенко, 2002, с. 105-113, 134-164].

Первые сейсмические станции в России появились в 1892-1893 гг. на астрономических обсерваториях - Морской в г. Николаеве и при университетах в гг. Харькове и Юрьев [Оноприенко, 2002, с. 107].

Сейсмическая станция в Петропавловске-Камчатском начала работу в июле 1915 г. Об оборудовании этой станции узнаем из сохранившейся описи приборов: «2 сейсмографа со штативами, 2 регистрационных аппарата с 2 запасными барабанами, контактные часы фирмы «Штрассер-Родэ», 1500 листов бумаги (на 2 года), 3 элемента лекланше с запасом нашатыря и цинков, 3 фунта звонковой проволоки. 16 ящиков (68 пудов)» [Викулин, Синельникова, 1985].

В настоящее время сейсмическая станция Петропавловск-Камчатский содержит широкий комплекс приборов, включая самые современные, позволяющие проводить регистрацию сейсмических событий в цифровом виде и в реальном времени проводить определение их параметров.

Необходимым элементом любой современной сейсмической станции является трехкомпонентная (Z – вертикальный, E – Восток-Запад, N – Север-Юг каналы) регистрация сигнала и наличие службы точного времени с отсчетом от Гринвичского меридиана.

Сети сейсмических станций

Определение параметров очага землетрясения, в первую очередь - координат его эпицентра и гипоцентра, а затем и повышение их точности, привело сначала к пониманию необходимости в определенной расстановке нескольких сейсмических станций, а затем и к созданию сетей сейсмических станций.

Население многих стран страдает от землетрясений. Но только в некоторых из таких стран вопросам сейсмической опасности в конце 19 – начале 20 вв. уделялось должное внимание. Весьма примечательно, что наиболее показательными, с точки зрения создания сети сейсмических станций, являются Япония и Россия.

В Японии землетрясения, как и извержения вулканов, являются неотъемлемой частью самой жизни населения: сильные землетрясения часто приводят к гибели большого количества людей. Именно по этой причине Общественность, а затем и Правительство стали принимать меры к уменьшению последствий землетрясений. И одними из первых действенных шагов в этом направлении явились организация Сейсмологического общества Японии в 1890 г. и создание сети сейсмических станций на территории Японии в 1896-1898 гг., оснащенных горизонтальными сейсмографами Дж. Милна и Дж. Юинга. Подробнее о развитии сейсмологических наблюдений в Японии см. в [Викулин, 2000, 2008, с. 194-209; Викулин, Дроздук, Семенец, Широков, 1997, с. 24-25; Рикитакэ, 1979, с. 44-79].

В России в 1887 г. сразу же после разрушительного землетрясения в г. Верный (Средняя Азия) по предложению Русского географического общества создается Сейсмическая комиссия, которая, фактически, и организовала первую в России сеть

сейсмических наблюдений, собирала и обрабатывала материалы по поступившим сведениям о проявлении землетрясений.

4 февраля 1898 г. в Петербургской академии наук состоялось первое заседание Комиссии по организации наблюдений над сейсмическими явлениями, на котором присутствовали представители Академии наук, Русского географического общества, Главной физической обсерватории и Военно-топографического отдела. Комиссия признала необходимым учредить при Академии наук для руководства сейсмическими наблюдениями в России Постоянную сейсмическую комиссию при участии университетов, Русского географического общества, Военно-топографического отдела Главного штаба и Главного гидрографического управления. На следующем заседании комиссии было предложено организовать сейсмические наблюдения во Владивостоке, Хабаровске, Томске, Омске, Екатеринбурге и Верном, а при Тифлисской, Ташкентской и Иркутской обсерваториях было рекомендовано организовать сети пунктов, оборудованных простейшими сейсмоскопами. Выражаясь современным языком, комиссия признала необходимым организовать единую сейсмическую сеть России, а при некоторых обсерваториях – локальные сейсмические сети. Такая схема, по сути, и существует в настоящее время в России. Одной из региональных сетей является Камчатская сеть сейсмических наблюдений.

Постоянная центральная сейсмическая комиссия (ПЦСК) при Академии наук с участием ряда ведомств и учреждений была учреждена 25 января 1900 г. В результате активной деятельности комиссии сеть сейсмических станций России из трех в 1898 г. выросла общим числом до 17 в 1903 г., куда входили и станции локальных сетей, из которых наиболее многочисленной была Кавказская сеть станций. Остро стояла проблема обеспечения сейсмических станций приборами. Её-то и решил Б.Б. Голицын, предложив новый «компактный» способ гальванометрической регистрации с преобразованием сигнала от маятника в электрический ток.

В результате в 1915 г. Российская сеть сейсмических станций насчитывала 6 трехкомпонентных станций первого разряда (Пулково, Баку (Нобелевская станция), Тифлис, Иркутск, Ташкент и, Юрьев) и 17 станций второго разряда, каждая из которых была снабжена двумя горизонтальными маятниками с магнитным затуханием. Всего сейсмическая сеть мира насчитывала в 1915 г. около 60 станций. Как видим, оснащенная лучшими по тем временам регистрирующими приборами, российская сеть станций занимала ведущее положение в мире [Викулин, Синельникова, 1985; Оноприенко, 2002, с. 191-201].

В 1944 г., по данным Г.П. Горшкова [Оноприенко, 2002, с. 229], в мире насчитывалось около 500 сейсмических станций. Из них в середине 1950-х гг. опорными считались 93 станции, в числе которых российскими были станции в гг. Баку, Москва, Иркутск, Свердловск, Ташкент и Владивосток [Рихтер, 1963, с. 644-646].

В настоящее время сейсмическая сеть мира настывает несколько тысяч сейсмических станций. Эта сеть организована следующим образом. В единую мировую сеть объединены *опорные станции*, расположенные в разных точках Земли. К числу таких станций относится и станция, расположенная в Петропавловске-Камчатском.

Единая сеть сейсмических наблюдений России объединяет опорные станции, расположенные в разных частях нашей страны. Составными элементами в эту сеть входят локальные сети, целью которых является изучение сейсмичности региона.

На Камчатке региональная сеть начала создаваться в 1940-х гг. В декабре 1946 г. Лаборатория вулканологии АН СССР открывает станцию в Ключах. Позднее, в 1958 и 1960 гг. с открытием станций Козыревск и Апохончич создается сеть слежения за активностью Ключевской группы вулканов.

В 1961 г. Тихоокеанской сейсмической экспедицией ИФЗ АН СССР совместно с Камчатской геолого-геофизической обсерваторией, вошедшей в 1962 г. в Институт вулканологии, создается камчатская региональная сеть сейсмических станций. И с тех пор

до настоящего времени сейсмические наблюдения на Камчатке ведутся этой сетью и станцией Петропавловск, входящих в Камчатский филиал Геофизической службы Российской Академии наук [Викулин, Семенец, Широков, 1989, с. 23-33].

Годографы

Данные о временах пробега продольных и поперечных сейсмических волн через земной шар до сейсмических станций представляют первый годограф сейсмических волн, составленный в 1908-1911 гг. Цепринцем и Э. Вихертом. Этим годографом пользовались приблизительно до 1930-1940 гг. для определения расстояний при отыскании положения эпицентра землетрясения.

Таблицы времен пробега Р и S волн в диапазоне от 0^0 до 180^0 и для глубин до 700 км были составлены в начале 1950-х гг. К. Булленом и Г. Джеффрисом [Рихтер, 1963, с. 617-632]. Годограф Джеффриса-Буллена, используемый в настоящее время станциями мира, приведен на рис. 4.3.

Рис. 4.3. Годографы Джеффриса-Буллена

Траектории волн внутри Земли [Стейси, 1972, с. 105-114]

Если поверхностный очаг землетрясения и сейсмическая станция расположены, как на рис. 4.4, то время прихода волны на станцию T , в случае однородной Земли, должно определяться соотношением (4.59):

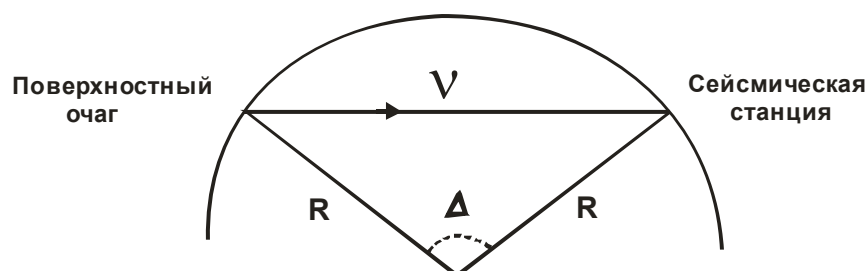


Рис. 4.4. Сейсмический луч v в однородной Земле. В сейсмологии расстояние между двумя точками (эпицентром и станцией) на земной поверхности – эпицентральное расстояние, обычно выражается через угол Δ , под которым они видны из центра Земли.

$$T = 2 \frac{R}{V} \sin \frac{\Delta}{2}. \quad (4.59)$$

Существенная особенность наблюдаемых времен пробега (рис. 4.4) состоит в том, что они возрастают с расстоянием не так быстро, как это следует из (4.59). Это указывает на то, что скорости сейсмических волн в недрах Земли больше, чем у поверхности и сейсмические лучи изогнуты, как показано на рис. 4.5 – 4.9.

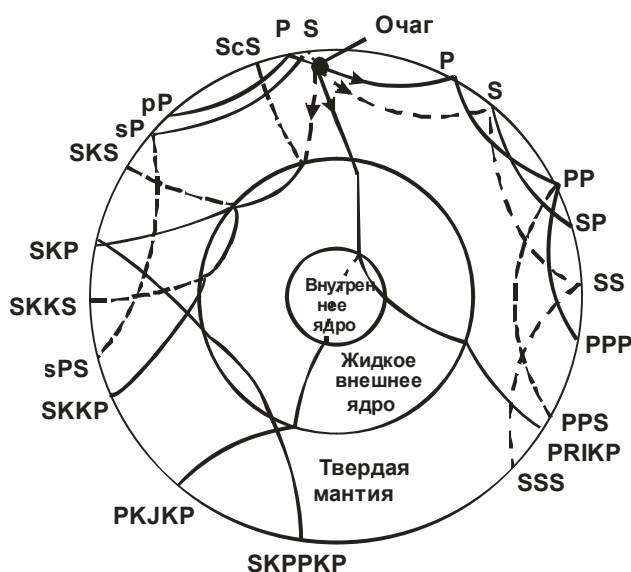


Рис. 4.5. Сейсмические лучи, соответствующие годографам на рис.4.4, по Буллену.
 — лучи P , - - - лучи S .

Для определения скоростного строения Земли достаточно установить зависимость скорости сейсмической волны как функции ее радиуса. Для этого выведем уравнение сейсмического луча.

Рассмотрим три слоя, представленных на рис. 4.7. Применяя закон Снеллиуса (4.56) к границам A и B , получим:

$$\sin i_1 / V_1 = \sin f_1 / V_2, \quad (4.60)$$

$$\sin i_2/V_2 = \sin f_2/V_3. \quad (4.61)$$

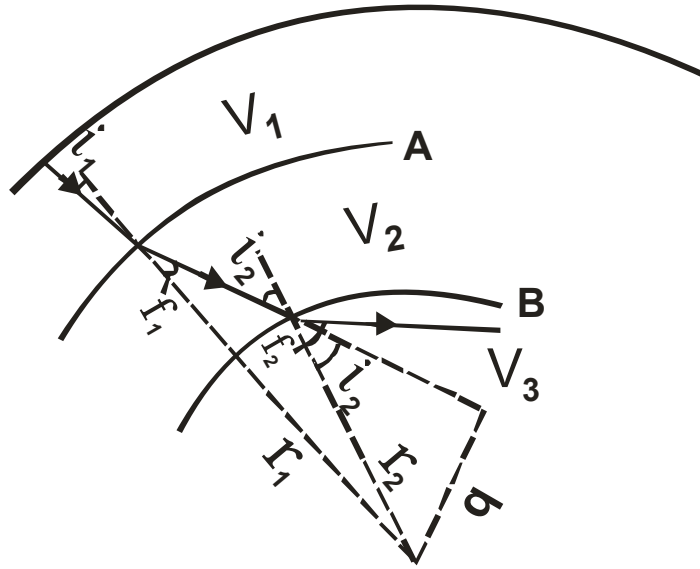


Рис. 4.7. Луч от удаленного землетрясения в трехслойной Земле. Пост роение показывает геометрический смысл параметра p сейсмического луча.

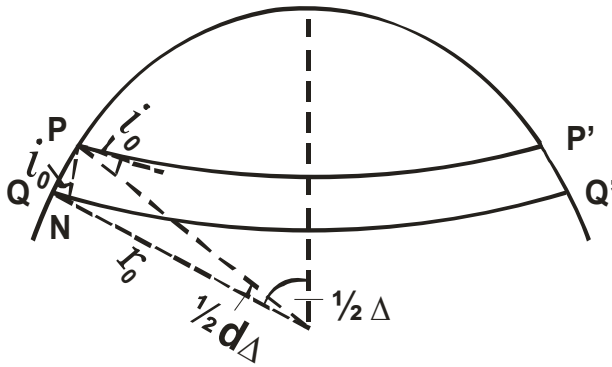


Рис. 4.8.Схема двух близких лучей, используемая для вывода формулы (4.17)

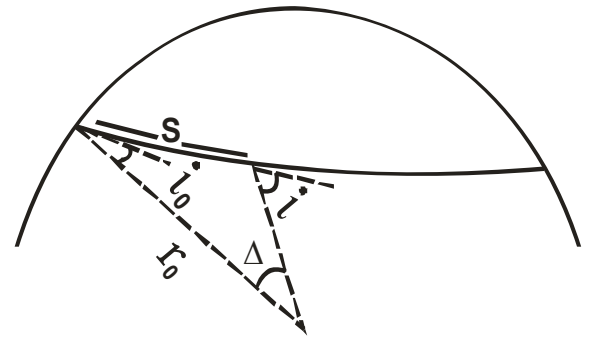


Рис. 4.9. Схема, используемая для вывода формулы (4.18)

Из двух треугольников со сторонами r_1q и r_2q получаем равенства:

$$Q = r_1 \sin f_1 = r_2 \sin i_2. \quad (4.62)$$

Таким образом, получаем:

$$r_1 \sin i_1/V_1 = r_2 \sin i_2/V_2. \quad (4.63)$$

Формулу (4.63) можно распространить на случай преломления на любом числе границ и на случай рефракции в слое с непрерывным нарастанием скорости с глубиной. Т.о., вдоль каждого луча справедливы следующие соотношения:

$$r \sin i/V = \text{const} = p. \quad (4.64).$$

Здесь i - угол между лучом и радиусом в данной точке. Величина p называется параметром луча. Определяя параметр луча, мы тем самым находим величину r/V в точке,

где $\sin i = 1$, т.е. в точке наибольшего проникновения луча. Или, учитывая равенство $\operatorname{ctgi} = dr/r d\Delta$, получаем уравнение луча в дифференциальном виде:

$$\frac{dr}{d\Delta} = \pm \frac{r}{p} \sqrt{\frac{r^2}{V^2} - p^2}. \quad (4.65)$$

Определение скорости распространения сейсмических волн в Земле с помощью уравнения Гертлоца – Вихерта [Стейси, 1972]

Другая важная формула для параметра p получается из простого геометрического рассмотрения бесконечно близких лучей PP' и QQ' (рис. 4.8). Отрезок PN - нормаль, опущенная из PP' на QQ' , т.е. фронт волны. Разность времен пробега по PP' и QQ' будет равна:

$$dT = 2QN/V_0, \quad (4.66)$$

где V_0 - скорость сейсмических волн у поверхности. Но

$$QN = PQ \sin i_0 = 1/2 r_0 d\Delta \sin i_0.$$

Отсюда:

$$\frac{dT}{d\Delta} = \frac{r_0 \sin i_0}{V_0} = p. \quad (4.67)$$

Для получения значения скорости в точке проникновения сейсмического луча на максимальную глубину r_1 можно воспользоваться методом Гертлоца - Вихерта, суть которого заключается в использовании уравнения луча в дифференциальном виде (4.65). В результате получаем интегральное уравнение:

$$\int_0^{\Delta_1} \operatorname{arch}\left(\frac{p}{p_1}\right) d\Delta = \pi \ln\left(\frac{R_0}{r_1}\right), \quad (4.68)$$

где R_0 - радиус Земли. Полученная формула удобна для численного интегрирования по таблицам времен пробега, заданным с равным шагом Δ , так как p , согласно (4.67), - известная функция от Δ , а p_1 - значение p при $\Delta = \Delta_1$. Как видим, (4.68) позволяет найти значение r_1 , соответствующее Δ_1 , и, следовательно, $p_1 = r_1/V_1$. Таким образом, получается зависимость $V(r)$ для интервала r вплоть до самой глубокой точки проникновения сейсмического луча.

Анализ данных о скоростях распространения продольных и поперечных волн по радиусу Земли [Магницкий, 1965; Стейси, 1972]

На основе полученных годографов строят кривые изменения скоростей P и S с глубиной; такие кривые представлены на рис. 4.10. Данные, представленные на этом рисунке, позволяют подразделить недра Земли на основные слои (рис. 4.11): A - земная кора, простирающаяся до глубин 30-40 км, на которые приходятся первые максимумы значений скоростей; мантию - слои B , C и D , простирающуюся до глубин 2900 км; ядро - слои E , F и G . Границам между корой, мантией и внутренним ядром (слой G)

соответствуют скачки значений скоростей продольных и поперечных волн (границы первого рода).

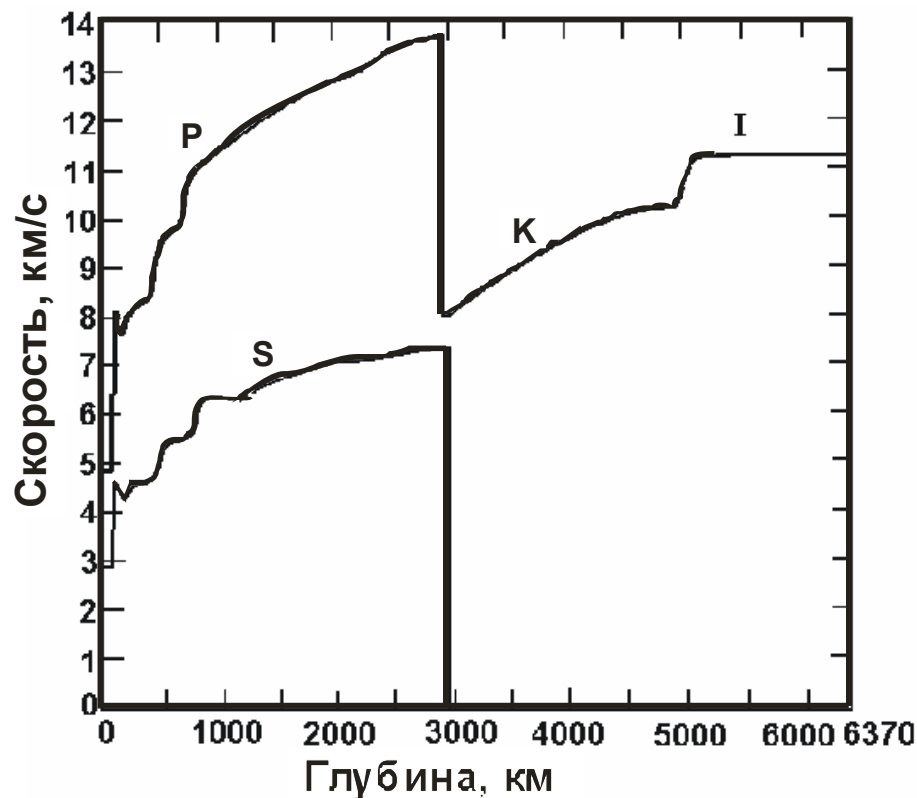


Рис. 4.10. Скорости продольных и поперечных волн в Земле

Слой *B* включает область глубин, связанных с первым минимумом скоростей и простирается на глубине около 200 км, где скорости волн *P* и *S* снова достигают значений, существовавших выше минимума. Слой *C* включает глубины достаточно быстрого увеличения скоростей и заканчивается перегибом графиков скоростей на глубинах около 900 км. Слои *B* и *C* образуют "верхнюю мантию". Слой *D* характеризуется более медленным, по сравнению со слоем *C*, увеличением скоростей.

Проявление внешнего и внутреннего ядер Земли в особенностях выхода объемных сейсмических волн на поверхность Земли [Магницкий, 1965]

Наиболее четкой является граница между мантией и ядром. Четкость этой границы доказывается интенсивными, отраженными от нее волнами *PcP* и *ScS*. При вертикальном падении волн условием отражения будет $\left| 2\pi \frac{\delta}{T} \frac{1}{\Delta V} \right| \ll 1$, где δ - толщина переходного слоя между средами, ΔV - разность скоростей в средах, T - период колебаний. Для случая границы ядра и продольных волн имеем $\Delta V = 5,5$ км/сек, $T \approx 10$ сек. Это составляет толщину переходного слоя $\delta \ll 10$ км.

Состояние слоев вещества Земли по данным сейсмологии. Распределение скоростей и сейсмических волн в земной коре (континентов и океана), типы земной коры (по данным сейсмологии) [Магницкий, 1965]

На основании изложенных выше данных можно сделать ряд выводов о свойствах и состоянии основных оболочек Земли.

Прохождение поперечных волн через слои *B*, *C* и *D* позволяет сделать вывод, что вещество их находится в эффективно твердом состоянии. Факт не обнаружения волн *S*, прошедших через ядро Земли (слой *E*), позволяет предполагать, что слой *E* или находится в жидком состоянии, или обладает очень сильным поглощением. Однако это поглощение не может быть вызвано внутренним трением в твердых телах.

V_p, V_s , км/сек

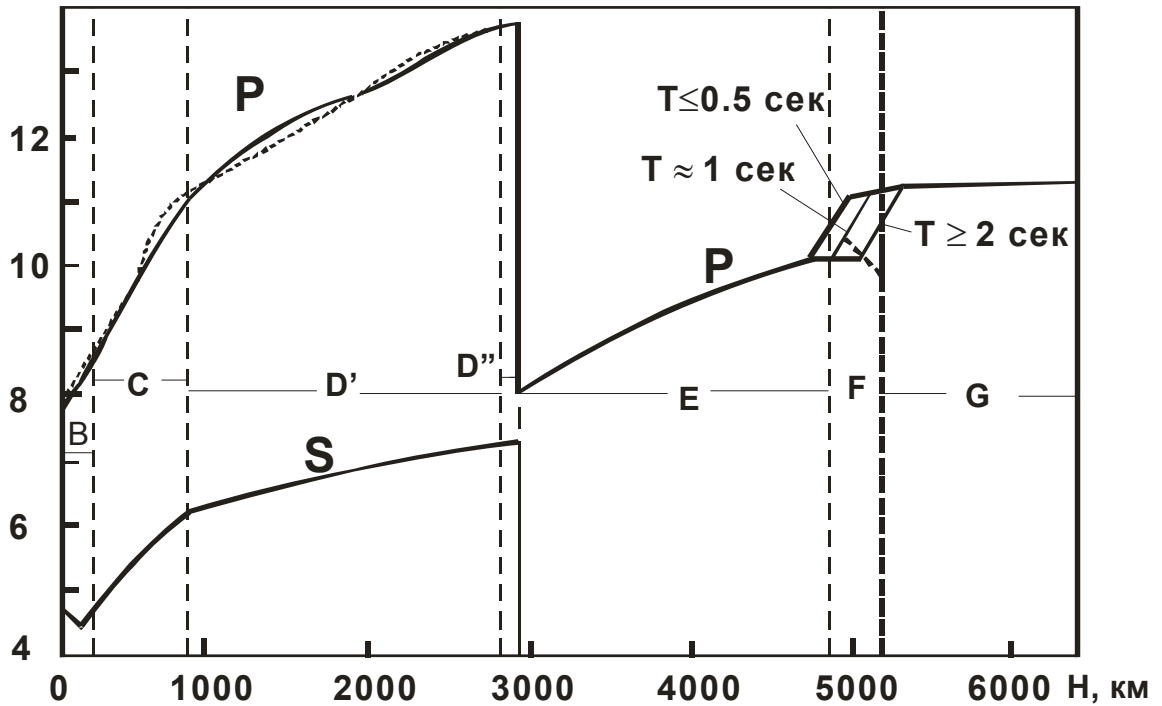


Рис. 4.11. Основные слои Земли *A – G*. Пояснения в тексте

Знание скоростей V_p и V_s на разных глубинах позволяет определить важные механические характеристики вещества Земли:

$$\frac{\mu}{\rho} = V_s^2;$$

$$\frac{K_s}{\rho} = V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2 = F;$$

$$\frac{K_s}{\mu} = \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - \frac{4}{3}; \quad (4.69)$$

$$\nu = \frac{1 - \frac{2\mu}{3K}}{2 + \frac{2\mu}{3K}}.$$

Здесь K_s - адиабатический модуль сжатия, ν - коэффициент Пуассона. Анализ данных, полученных с помощью этих соотношений, позволяет сделать следующие выводы.

Слой *C* нельзя рассматривать как однородный. В нем происходит или изменение химического состава, или фазовые переходы (или то и другое).

Что касается слоя *B*, лежащего непосредственно под земной корой, то, скорее всего, здесь тоже имеет место некоторая неоднородность и он состоит из таких пород, как дунит, перидотиты, эклогиты.

При изучении землетрясения, происшедшего в 40 км от Загреба (Югославия), А. Мохоровичич в 1910 г. заметил, что на расстоянии больше 200 км от источника первой на сейсмограмме вступает продольная волна другого типа, чем на более близких расстояниях. Он объяснил это тем, что в Земле на глубине порядка 50 км существует граница, на которой скорость внезапно возрастает. Это исследование было продолжено его сыном С. Мохоровичичем после Конрада, который в 1925 г. обнаружил еще одну фазу продольных волн P^* при изучении волн от землетрясений в восточных Альпах. Соответствующая фаза поперечных волн S^* была идентифицирована позже. Фазы P^* и S^* указывают на существование, по крайней мере, одной границы - "границы Конрада" - между подошвой осадочной толщи и границей Мохоровичича.

Волны, возникшие при землетрясениях и искусственных взрывах и распространяющиеся в земной коре, в последние годы интенсивно изучались. Использовались методы как преломленных, так и отраженных волн. Результаты проведенных исследований сводятся к следующему. По измерениям, проведенным разными исследователями, значения продольных V_p и поперечных V_s скоростей оказались равными: в граните - $V_p = 4.0 \div 5.7$, $V_s = 2.1 \div 3.4$, в базальте - $V_p = 5.4 \div 6.4$, $V_s \approx 3.2$, в габбро - $V_p = 6.4 \div 6.7$, $V_s \approx 3.5$, в дуните - $V_p = 7.4$, $V_s = 3.8$ и в эклогите - $V_p = 8.0$, $V_s = 4.3$ км/с.

Кроме того, в различных областях были получены указания на существование волн с другими скоростями и границами внутри гранитного слоя. С другой стороны, под океаническим дном за пределами шельфов не имеется указание на существование гранитного слоя. Во многих континентальных областях подошвой гранитного слоя является граница Конрада.

В настоящее время имеются указания на дополнительные ясно выраженные границы между поверхностями Конрада и Мохоровичича; для нескольких континентальных областей даже указаны слои со скоростями продольных волн от 6,5 до 7 и от 7 до 7,5 км/с. Было предположено, что могут существовать слой "диорита" ($V_p = 6,1$ км/с) и слой "габбро" ($V_p = 7$ км/с).

Во многих океанических областях глубина границы Мохо под дном океана меньше 10 км. Для большинства континентов ее глубина увеличивается с увеличением расстояния от побережья и под высокими горами может достигать более 50 км. Эти "корни" гор впервые были обнаружены по гравитационным данным.

В большинстве случаев определения скоростей ниже границы Мохо дают одни и те же цифры: 8,1 - 8,2 км/с для продольных волн и около 4,7 км/с для поперечных.

Земная кора [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 39-52]

Земная кора представляет собой верхний слой жесткой оболочки Земли – ее литосферы и отличается от подкорковых частей литосферы строением и химическим составом. Земная кора отделяется от подстилающей ее литосферной мантии границей Мохоровичича, на которой скорости распространения сейсмических волн скачком возрастают до 8,0 – 8,2 км/с.

Поверхность земной коры формируется за счет разнонаправленных воздействий тектонических движений, создающих неровности рельефа, денудации этого рельефа путем разрушения и выветривания слагающих его горных пород, и благодаря процессам осадконакопления. В результате постоянно формирующаяся и одновременно

сглаживающаяся поверхность земной коры оказывается достаточно сложной. Максимальная контрастность рельефа наблюдается только в местах наибольшей современной тектонической активности Земли, например, на активной континентальной окраине Южной Америки, где перепад уровней рельефа между Перуано-Чилийским глубоководным желобом и вершинами Анд достигает 16-17 км. Значительные контрасты высот (до 7-8 км) и большая расчлененность рельефа наблюдается в современных зонах столкновения континентов, например, в Альпийско-Гималайском складчатом поясе.

Океаническая кора

Океаническая кора примитивна по своему составу и, по существу, представляет собой верхний дифференцированный слой мантии, перекрытый сверху тонким слоем пелагических осадков. В океанической коре обычно выделяют три слоя, первый из них (верхний) осадочный.

Нижняя часть осадочного слоя обычно сложена карбонатными осадками, отложившимися на глубинах менее 4-4,5 км. На глубинах больше 4-4,5 км верхняя часть осадочного слоя сложена в основном только бескарбонатными осадками – красными глубоководными глинами и кремнистыми илами. Второй, или базальтовый, слой океанической коры в верхней части сложен базальтовыми лавами толеитового состава. Общая мощность базальтового слоя океанической коры, судя по сейсмическим данным, достигает 1,5, иногда 2 км. По сейсмическим данным, мощность габбро-серпентитового (третьего) слоя океанической коры достигает 4,5-5 км. Подгребнями срединно-океанических хребтов мощность океанической коры обычно сокращается до 3-4 и даже до 2-2,5 км непосредственно под рифтовыми долинами.

Общая мощность океанической коры без осадочного слоя, таким образом, достигает 6,5-7 км. Снизу океаническая кора подстилается кристаллическими породами верхней мантии, слагающими подкоровые участки литосферных плит. Под гребнями срединно-океанических хребтов океаническая кора залегает непосредственно над очагами базальтовых расплавов, выделившихся из вещества горячей мантии (из астеносферы).

Площадь океанической коры приблизительно равна 306 млн км², средняя плотность океанической коры (без осадков) близка к 2,9 г/см³, следовательно, массу консолидированной океанической коры можно оценить значением $(5,8-6,2) \cdot 10^{24}$ г. Объем и масса осадочного слоя в глубоководных котловинах мирового океана, по оценке А.П. Лисицына, составляет соответственно 133 млн км³ и около $0,1 \cdot 10^{24}$ г. Объем осадков, сосредоточенных на шельфах и материковых склонах, несколько больший – около 190 млн км³, что в пересчете на массу (с учетом уплотнения осадков) составляет примерно $(0,4-0,45) \cdot 10^{24}$ г.

Океаническая кора формируется в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов за счет происходящей под ними сепарации базальтовых расплавов из горячей мантии (из астеносферного слоя Земли) и их излияния на поверхность океанического дна. Ежегодно в этих зонах поднимается из астеносферы, изливается на океаническое дно и кристаллизуется не менее 5,5-6 км³ базальтовых расплавов, формирующих собой весь второй слой океанической коры (с учетом же слоя габбро объем внедряемых в кору расплавов возрастает до 12 км³). Эти грандиозные тектономагматические процессы, постоянно развивающиеся под гребнями срединно-океанических хребтов, не имеют себе равных на суше и сопровождаются повышенной сейсмичностью.

В рифтовых зонах, расположенных на гребнях срединно-океанических хребтов, происходит растяжение и раздвижение дна океанов. Поэтому все такие зоны отмечаются частыми, но мелкофокусными землетрясениями с доминированием разрывных механизмов смещений. В противоположность этому под островными дугами и активными окраинами континентов, т.е. в зонах поддвига плит, обычно происходят более сильные землетрясения с доминированием механизмов сжатия и сдвига. По сейсмическим данным,

погружение океанической коры и литосферы прослеживается в верхней мантии и мезосфере до глубин около 600-700 км. По данным же томографии, погружение океанических литосферных плит прослежено до глубин около 1400-1500 км и, возможно, глубже – вплоть до поверхности земного ядра.

Океанскому дну присущи характерные и достаточно контрастные полосчатые магнитные аномалии, обычно располагающиеся параллельно гребным срединно-океаническим хребтам (рис. 7.8). Происхождение этих аномалий связано со способностью базальтов океанского дна при остывании намагничиваться магнитным полем Земли, запоминая тем самым направление этого поля в момент их излияния на поверхность океанского дна.

«Конвейерный» механизм обновления океанского дна с постоянным погружением более древних участков океанической коры и накопившихся на ней осадков в мантию под островными дугами объясняет, почему за время жизни Земли океанические впадины так и не успели засыпаться осадками. Действительно, при современных темпах засыпки океанических впадин сносимыми с суши терригенными осадками $2,2 \cdot 10^{16}$ г/год весь объем этих впадин, примерно равный $1,37 \cdot 10^{24}$ см³, оказался бы полностью засыпанным приблизительно через 1,2 млрд лет. Сейчас можно с большой уверенностью утверждать, что континенты и океанические бассейны совместно существуют около 3,8 млрд лет и никакой значительной засыпки их впадин за это время не произошло. Более того, после проведения буровых работ во всех океанах теперь мы достоверно знаем, что на океанском дне не существует осадков древнее 160-190 млн лет. Но такое может наблюдаться только в одном случае – в случае существования эффективного механизма удаления осадков из океанов. Этим механизмом, как теперь известно, является процесс затягивания осадков под островные дуги и активные окраины континентов в зонах подвига плит.

Континентальная кора

Континентальная кора, как по составу, так и по строению резко отличается от океанической. Ее мощность меняется от 20-25 км под островными дугами и участками с переходным типом коры до 80 км под молодыми складчатыми поясами Земли, например, под Андами или Альпийско-Гималайским поясом. В среднем, мощность континентальной коры под древними платформами приблизительно равна 40 км, а ее масса, включая субконтинентальную кору, достигает $2,25 \cdot 10^{25}$ г. Рельефу континентальной коры присущи и максимальные перепады высот, достигающие 16-17 км от подножий континентальных склонов в глубоководных желобах до высочайших горных вершин.

Строение континентальной коры очень неоднородное, однако, как и в океанической коре, в ее толще особенно в древних платформах, иногда выделяются три слоя: верхний осадочный и два нижних, сложенных кристаллическими породами. Под молодыми подвижными поясами строение коры оказывается более сложным, хотя общее ее расчленение приближается к двухслойному.

Мощность верхнего осадочного слоя континентальной коры меняется в широких пределах – от нуля на древних щитах до 10-12 и даже 15 км на пассивных окраинах континентов и в краевых прогибах платформ. Средняя мощность осадков на стабильных протерозойских платформах обычно близка к 2-3 км. Среди осадков на таких платформах преобладают глинистые отложения и карбонаты мелководных морских бассейнов.

Верхняя часть разреза консолидированной континентальной коры обычно представлена древними, в основном, докембрийскими породами. Иногда эту часть разреза жесткой коры называют «гранитным» слоем, подчеркивая тем самым преобладание в нем пород гранитоидного ряда и подчиненность базальтоидов.

В более глубоких частях коры (приблизительно на глубинах около 15-20 км) часто прослеживается рассеянная и непостоянная граница, вдоль которой скорость распространения продольных волн возрастает примерно на 0,5 км/с. Это так называемая

граница Конрада, оконтуривающая сверху нижний слой континентальной коры, иногда условно называемый «базальтовым».

Гетерогенность континентальной коры особенно ярко видна даже при простом взгляде на геологическую карту материков. Обычно отдельные и тесно переплетенные неоднородные по составу и строению блоки коры представляют собой разновозрастные геологические структуры – остатки древних складчатых поясов Земли, последовательно примыкавших друг к другу в процессе роста континентальных массивов.

Литосфера и астеносфера

[Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 96-97]

Достаточно детально сейсмическими и другими геофизическими методами изучена верхняя мантия Земли. Эта часть Земли наиболее доступна для геофизического изучения и наиболее важна для жизни человечества. Верхняя мантия простирается от границы Мохо до глубины 400 км. В состав верхней мантии входит нижняя часть литосферы и верхняя часть астеносферы. Литосфера представляет собой каменную (твердую и прочную) верхнюю оболочку Земли. Ее толщина меняется от 50 до 150 км в разных регионах Земли, следовательно, литосфера включает земную кору и часть верхней мантии, в которой мантийное вещество настолько остыло, что превратилось в горную породу.

Глубже литосферы находится зона пониженных скоростей (по сравнению с таковыми в литосфере) сейсмических волн. Эта зона, простирающаяся от подошвы литосферы до ~ 300-400 км, называется астеносферой. Слои астеносферы легко деформируются под действием сдвиговых напряжений за счет пластичности (ползучести) астеносферного вещества. Такое поведение вещества связано с его частичным плавлением. Прохождение поперечных сейсмических волн через астеносферу указывает на то, что плавление не может быть полным и вещество должно находиться в состоянии, близком к твердому. Процент расплава вещества по разным косвенным данным изменяется от нескольких единиц до 20%. Такое состояние астеносферы приводит к достаточно сильному затуханию поперечных сейсмических волн. Существуют участки под литосферой, где астеносфера не фиксируется.

Литосфера в зависимости от географических координат изменяется не только по толщине, она вообще не является однородной монолитной оболочкой. Основную структуру литосферы можно понять, рассматривая строение поверхности Земли. В первом приближении поверхность разделяется на приподнятый над средним уровнем моря континентальный регион и опущенный океанский регион. К континентальным примыкает материковая отмель (шельф), затем идет с резким углублением континентальный склон, переходящий в типичное океанское дно. Рассыпанные в океанах острова, цепочки островов, островные дуги, отделяющие от океанов краевые моря, являются самостоятельными структурами, имеющими свое особое строение и историю. Средний уровень океанского дна расположен на 4,6 км ниже среднего уровня суши.

Если мысленно рассматривать сверху земной шар без его водной оболочки, то можно увидеть горные системы и обширные равнины на океанском дне – линейные системы срединно-океанических хребтов и глубоководных желобов, которые во многих местах разорваны трансформными разломами. Эти линейные системы делят литосферу на части, называемые литосферными плитами. Линейные системы характеризуются высоким уровнем сейсмичности, поэтому на карте их можно выделить по оконтуривающим их узким поясам сейсмичности (рис. 3.1). Как следует из рис. 3.1, разделение литосферы на плиты не связано с разделением на материки и океаны. Большинство плит включает как материковые, так и океанские участки. Только одна крупная плита (Тихоокеанская) имеет исключительно океанскую поверхность. Границы плит бывают трех типов: 1) конструктивные границы, где происходит наращивание плит, 2) деструктивные границы – границы поглощения плит и 3) границы скольжения, связанные с трансформными

разломами. Каждый тип границ имеет свое выражение в рельефе, что позволяет проводить разбиение литосферы на плиты на основе данных о геологическом строении Земли.

Срединно-океанические хребты и внутриконтинентальные рифтовые зоны образуют единую глобальную систему рифтов (разломов). Оба типа структур являются зонами, где действуют напряжения растяжения. Срединно-океанические хребты имеют ширину одну-две тысячи километров и возвышаются над дном океанских котловин на 2-3 км. Полная протяженность хребтов составляет около 80000 км. На осях большинства хребтов расположены рифтовые долины шириной 10-20 км и глубиной (от гребней гор) - 2 км.

Сейсмология и глобальная тектоника

[Гутенберг, 1963; Ле Пишон, Франшто, Боннин, 1977; Новая..., 1974].

Продолжим, по сути, начатое выше обсуждение большой роли глобальной тектоники в вопросах жизни Земли

Рассмотрен вопрос о внутренней согласованности и глобальной совместимости деформаций вдоль мировой рифтовой системы, островных дуг и главных горных поясов. Основной вывод заключается в том, что эти движения довольно точно можно описать в рамках концепции *взаимодействия и относительного движения системы литосферных плит*. То, что современные деформации на поверхности Земли концентрируются в узких вытянутых поясах, известно давно. Эти пояса, обычно совпадающие с главными сейсмическими зонами земного шара, включают мировую рифтовую систему, островные дуги и такие дугообразные структуры, как активные горные пояса и активные континентальные окраины. Эти крупные тектонические структуры не имеют резких окончаний; по-видимому, они связаны воедино в глобальную тектоническую систему.

Данные, приведенные на рис. 3.1 показывают, что большая часть мировой сейсмической активности сконцентрирована в довольно узких поясах и что эти пояса могут рассматриваться как непрерывные. Интерпретация глобальной тектоники при помощи модели взаимодействия нескольких крупных плит литосферы позволяет считать, что большая часть мировой сейсмической активности обусловлена процессами, происходящими на окраинах плит или вблизи них. На рис. 3.1 показано также, что землетрясения значительно чаще происходят в зонах конвергенции (дугах и дугообразных структурах), чем в зонах дивергенции (океанических хребтах). Вдоль океанических хребтов, где осуществляются, по-видимому, менее сложные тектонические процессы, эти зоны узкие; на континентах, где данные процессы наверняка более сложны, зоны шире и отдельные структуры в них выделить нелегко. Зоны глубокофокусных землетрясений (рис. 3.1, 3.2) соответствуют зонам поддвижения. Следовательно, все главные особенности мировой карты эпицентров землетрясений вполне согласуются с новой глобальной тектоникой. Ни одной другой гипотезе не удавалось столь хорошо объяснить распределение землетрясений.

Дугообразная форма активных зон – одна из проблем дисциплины, которую можно назвать механикой литосферы.

Одна из основных проблем сейсмологии – изучение различий между континентальными и океаническими областями.

То, что сейсмология поставляет многочисленную и важную информацию для проверки новой глобальной тектоники, показано многократно. Именно такова направленность проводящихся в настоящее время в связи с этой проблемой сейсмологических исследований. Необходимо, однако, и обратное воздействие новой глобальной тектоники на сейсмологию с целью определения новых направлений сейсмологических исследований.

Важнейшее направление сейсмологии – изучение землетрясений – одним из первых испытывает на себе влияние новой глобальной тектоники. Все еще ждет решения ряд

фундаментальных вопросов: почему землетрясения происходят в основном в узких зонах, разделенных крупными стабильными глыбами (плитами); почему эти зоны развиты в глобальных масштабах; почему сейсмические и связанные с ними тектонические зоны приобрели свою современную конфигурацию; и т. д.

Сейсмология уже давно служит главным источником информации о структуре глубинных частей Земли и, по-видимому, таковым и останется, будь то с участием или без участия новой глобальной тектоники. Обычно применяемым и весьма эффективным методом сейсмологии является использование упрощенных моделей Земли для предсказания некоторых наблюдаемых явлений. Новая глобальная тектоника предусматривает совершенно новый тип модели. Слоистые модели со сферически симметричными оболочками для многих районов земного шара ныне представляются устаревшими.

На некоторые из поставленных выше вопросов, сформулированных авторами новой глобальной тектоники в конце 60-х годов прошлого века, мы постараемся дать ответ ниже.

Литература

- Амензаде Ю.А.* Теория упругости. Учебник для университетов. М.: Высшая школа, 1976. 272 с.
- Быков В.Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46 (11). С. 1179-1190.
- Викулин А.В.* Сейсмические вехи // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. С. 276-281.
- Викулин А.В.* Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.
- Викулин А.В., Дроздюк В.Н., Семенец Н.В., Широков В.А.* К землетрясению без риска. Петропавловск-Камчатский: СЭТО-СТ, 1997. 120 с.
- Викулин А.В., Семенец Н.В., Широков В.А.* Землетрясение будет завтра. Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ РАН, 1989. 82 с.
- Викулин А.В., Синельникова Л.Г.* Начало сейсмологических наблюдений на Камчатке (к 70-летию сеймостанции «Петропавловск») // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 102-106.
- Голицын Б.Б.* Избранные труды. Т. II. Сейсмология. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 490 с.
- Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: Изд-во Иностран. лит-ры. 1963. 264 с.
- Жермен П.* Механика сплошных сред. М.: Мир, 1965. 480 с.
- Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
- Кольский Г.* Волны напряжений в твердых телах. М.: Изд-во «Иностранной литературы», 1955. 192 с.
- Красильников В.А., Крылов В.В.* Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 400 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Физматлит, 2003. 264 с.
- Ле Пишон К., Франишо Ж., Боннин Ж.* Тектоника плит. М.: Мир, 1977. 288 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
- Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. 472 с.
- Онопrienко В.И.* Борис Борисович Голицын / Ред. К.В. Симаков. М.: Наука, 2002.

335 с.

Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408

с.

Рикитаке К. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 390 с.

Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1963.

670 с.

Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. II. М.: Наука, 1973. 584 с.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. I. Механика. М.: Наука, 1974. 520 с.

Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. Учебник / Ред. М.А. Садовничий. М.: Изд-во МГУ, 2002. 560 с.

Стейси Ф. Физика Земли. М.: Мир, 1972. 344 с.

Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.

Фейман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Феймановские лекции по физике. Т. 7. Физика сплошных сред. М.: Мир, 1966. 290 с.

Физический энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.

Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 1963. 772 с.

Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник. М.: Наука, 1983. 400 с.

Шебалин О.Д. Физические основы механики и акустики. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1981. 261 с.

5. ПЛОТНОСТЬ, СИЛА ТЯЖЕСТИ И ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ ЗЕМЛИ

Обзор развития представлений о моделях Земли. Предпосылки создания теории определения плотности. Упругость и плотность Земли. Определение плотности

вещества Земли в рамках подхода Буллена с помощью условий Радо, Молоденского и Адамса-Вильямсона. Распределение упругих модулей, давления и ускорения силы тяжести с глубиной. Мантия и ядро Земли. Распределение плотности, температуры, давления и ускорения силы тяжести в современной Земле в модели Сорохтина.

Обзор развития представлений о моделях Земли

1863 г. - Лорд Кельвин (*Sir W. Thomson, Lord Kelvin*), исследуя деформации однородного несжимаемого упругого шара под действием объемных сил получил оценку модуля сдвига для Земли: $\mu = (1,2 - 1,5) \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ при жесткости стали при атмосферном давлении, равной $\mu = 0,8 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ [Буллен, 1978, с. 94].

1879 г. - Лорд Кельвин и П. Тэйт (*P.G. Tait*) рассмотрели модель Земли, состоящую из ядра однородной плотности ρ_1 радиусом a_1 , окруженного также оболочкой однородной плотности ρ_2 .

1885-1891 гг. - сначала Р. Радо (*R.R. Radau*) затем Е. Вихерт (*E. Wiechert*) выполнили подробные численные расчеты для таких моделей. Радо выбрал плотность оболочки $\rho_2 = 2,7 \text{ г/см}^3$ и получил плотность ядра $\rho_1 = 7,47 \text{ г/см}^3$ и радиус ядра $a_1 = 0,844a = 5383 \text{ км}$. Вихерт положил $\rho_2 = 3,2 \text{ г/см}^3$ и получил $\rho_1 = 8,21 \text{ г/см}^3$ и $a_1 = 0,779a = 4968 \text{ км}$ [Буллен, 1978, с. 82, 84].

1891 - 1896 гг. - Ф. Тиссеран (*F. Tisserand*) получил первую оценку предела плотности в центре Земли ρ , равную $\rho > 7,07 \text{ г/см}^3$. В соответствии с этой оценкой в большинстве моделей, предложенных в то время, значение плотности для центра Земли лежало в пределах $10-12 \text{ г/см}^3$. Такая сравнительно высокая плотность в центре Земли совместно с данными по метеоритам привела к предположению, высказанному Е. Вихертом, что Земля состоит из внешней оболочки (*mantel*), окружающей более плотное металлическое ядро [Буллен, 1978, с. 90, 172].

1897 г. - Е. Вихерт первым предположил, что Земля состоит из мантии и ядра и в каждом из этих подразделений в качестве первого приближения можно допустить плотность постоянной.

1915 г. - В. Классман (*W. Klussman*) распространил уравнения Вихерта на трехслойную модель.

1923 г. - Е. Вильямсон (*E.D. Williamson*) и Л. Адамс (*L.H. Adams*) впервые вычислили плотность в мантии, предположив, что мантия является однородной и изотермической и плотность возрастает с глубиной в соответствии с ростом давления. Кроме того, они предположили, как это обычно делается, что давление является гидростатическим

1925 г. - следующий шаг сделал Х. Хаальк (*H. Haalck*), который предположил, что плотность в верхней части мантии возрастает с постоянной скоростью до разрыва непрерывности второго рода, который, как он считал, находится на глубине 1200 км . Как найдено теперь, этот разрыв непрерывности второго рода расположен на глубине около 950 км .

1936 г. - в своем первом вычислении плотности в Земле К. Буллен (*K.E. Bullen*) предполагал, что отдельные составные части Земли являются однородными. Полученная Булленом зависимость плотности от глубины достаточно близка современным определениям [Гутенберг, 1963, с. 181-183].

1902 г. - Д. Крейхауер (*D. Kreichgauer*), вероятно первый, на основании данных об изменениях климата составил довольно правдоподобную карту предполагаемого движения Северного полюса вращения относительно континентов северного полушария в течение геологических периодов [Гутенберг, 1963, с. 248].

1906 г. - Олдгем привел сейсмические доказательства существования центрального ядра. Он обнаружил значительное запаздывание в прибытии волн P на угловых

расстояниях, превышающих 120^0 от очага землетрясения, и сделал из этого вывод, что Земля содержит центральную область, характеризующуюся заметно меньшей средней скоростью волн P , чем в окружающей оболочке.

Было найдено, что мантия пропускает волны P и S во всех направлениях и, следовательно, является твердой. Никаких волн S не удалось обнаружить глубже мантии, и была высказана догадка, что большая часть ядра находится в расплавленном состоянии [Буллен, 1978, с. 172-173].

1907 г. - *Е. Вихерт* разработал теорию распространения сейсмических волн. *К. Цеппритц* (*K. Zoeppertz*) и *Л. Гейгер* (*L. Geiger*) вычислили скорость продольных волн в мантии [Гутенберг, 1963, с. 31].

К. Цеппритц создал пригодные для практической работы таблицы времен пробега некоторых фаз сейсмических волн [Буллен, 1978, с. 173].

1909-1910 гг. - *А. Мохоровичич* (*A. Mohorovicic*), изучая записи землетрясения, происшедшего в 40 км от Загреба (Югославия), заметил, что на расстоянии больше 200 км от источника первой на сейсмостанции вступает продольная волна другого типа, чем на более близких расстояниях. Он объяснил это существованием на глубине порядка 50 км границы, на которой скорость резко возрастает. Эта граница подошвы земной коры в настоящее время называется границей Мохоровичича или Мохо [Буллен, 1978, с. 173; Гутенберг, 1963, с. 49].

1913-1915 гг. - *Б.Б. Голицын* на основании наблюдений над углами выхода сейсмических волн обнаружил границу на глубине 492 км, с которой связывают залегание слоя с повышенным градиентом скорости [Оноприенко, 2002, с. 170].

1914 г. - *В. Гутенберг* (*B. Gutenberg*) изучал записи землетрясений с эпицентрными расстояниями более 80^0 от Геттингена. Он нашел, что на глубине 2900 км скорость продольных волн скачком уменьшается от 13,25 до 8,5 км/с и что радиус ядра равен приблизительно 3500 км [Гутенберг, 1963, с. 33]. Учитывая, какими данными наблюдений располагал В. Гутенберг, можно считать, что неопределенность его оценки глубины залегания границы между мантией и ядром была порядка 50-100 км [Буллен, 1978, с. 173]. Граница между мантией и ядром на глубине 2900 км в настоящее время называется границей Гутенберга.

Ж. Баррел (*J. Barrell*) назвал слой с относительно малым пределом текучести, который позволяет путем медленных движений постепенно приближаться к состоянию гидростатического равновесия, *астеносферой* [Гутенберг, 1963, с. 98].

1917 г. - *Б.Б. Голицыным* [1960, с. 268-364] был создан оригинальный метод изучения внутреннего строения Земли по наблюдениям над углами выхода сейсмических лучей [Оноприенко, 2002, с. 169].

1925 г. - *В. Конрад* (*V. Konrad*) обнаружил еще одну фазу продольных волн при изучении землетрясения в восточных Альпах. Эта граница, располагающаяся в земной коре между осадочным слоем и границей Мохо, получила название границы Конрада [Гутенберг, 1963, с. 49].

1926 г. - *Дж. Джеффрис* (*J. Jeffreys*), продолжая работу Кельвина, нашел, что средняя жесткость μ_1 земного ядра значительно меньше, чем средняя жесткость μ_2 мантии, и, может быть, даже равна нулю. Этим он подкрепил предположение о том, что большая часть ядра находится в основном в жидком состоянии. Дж. Джеффрис вывел предварительную оценку для средней жесткости мантии: $\mu_2 = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ [Буллен, 1978, с. 174].

1936 г. - *И. Леман* (*I. Lehmann*), интерпретируя некоторые сейсмологические данные, предположила, что ядро состоит из двух частей – внутреннего и внешнего ядра и скорость сейсмических волн во внутреннем ядре больше, чем во внешнем [Гутенберг, 1963, с. 34].

1938 г. - *В. Гутенберг* и *Ч. Рихтер* (*C. Richter*) сделали попытку определить радиус границы между внутренними и внешним ядром и нашли, что переход от внешнего ядра к

внутреннему начинается на расстоянии примерно 1500 км от центра Земли и охватывает зону притяжением около 300 км [Гутенберг, 1963, с. 34].

1939 г. - В. Гутенбергом и Дж. Джеффрисом независимо друг от друга были получены близкие графики изменения значений продольной и поперечной скоростей сейсмических волн с глубиной.

Распределение скоростей P волн, выведенное Дж. Джеффрисом, включало переходный слой, занимающий область между глубинами 4980 и 5120 км. Позднее этот слой был назван зоной F . Никаким простым путем Дж. Джеффрису не удавалось избежать введения в этой области отрицательного градиента для скорости P волны. На нижней границе зоны F Дж. Джеффрис ввел скачек скорости от 9,40 до 11,16 км/с [Буллен, 1978, с. 164, 180].

1942 г. - К. Булленом было предложено деление Земли на семь слоев ($A - G$), границы между которыми определялись на основании найденных к 1939 г. графиков скоростей сейсмических волн с глубиной [Буллен, 1978, с. 181]:

A 0 - 33 км Нерегулярный (коровые слои)

B 33 - 410 км Нормальный (P и S)

C 410 - 1000 км Больше чем нормальный (P и S)

D 1000 - 2900 км Нормальный (P и S), за исключением области, прилегающей к подошве

E 2900 - 4980 км Нормальный (только P)

F 4980 - 5120 км Отрицательный (только P)

G 5120 - 6370 км Очень маленький, но не отрицательный (только P)

1949 г. - изучение физического смысла падения градиентов скоростей до нуля в интервале глубин 2700-2900 км, привело К. Буллена (K. Bullen) к подразделению зоны D на две подзоны: D' (1000-2700 км) и D'' (2700-2900 км) [Буллен, 1978, с. 179].

1950-1953 гг. - сначала Н. Такеучи (H. Takeuchi), затем М.С. Молоденский путем вычислений показали, что жесткость внешнего ядра составляет не более $\mu_1 < 10^9 \text{ Н/м}^2$ и $\mu_1 < 5 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ соответственно [Буллен, 1978, с. 174].

1957-1958 гг. - В. Гутенберг пришел к выводу, что в зоне перехода от внешнего ядра к внутреннему короткие волны распространяются, по-видимому, быстрее, чем длинные, и что это, очевидно, указывает на переходную зону от жидкого к твердому состоянию вещества одного и того же рода [Гутенберг, 1963, с. 34].

1965 г. - выходит в свет фундаментальная монография В.А. Магницкого «Внутреннее строение и физика Земли». Книга представляет собой первое в мировой практике законченное, последовательное и в разумных пределах взаимно согласованное описание практически всех основных разделов (кроме геомагнетизма), характеризующих внутреннее строение Земли и ее физику.

Предпосылки создания теории определения плотности [Буллен, 1978; с. 77]

Во всей теории, описывающей распределение плотности Земли, наиболее твердо установлены соотношения, основанные только на законе всемирного тяготения и сферической симметрии:

$$g = GM / R^2, dm = 4\pi r^2 \rho dr. \quad (5.1)$$

Здесь g – ускорение свободного падения, G – гравитационная постоянная, M – масса Земли, R – ее радиус и ρ – ее плотность. В случае выполнения гидростатического соотношения

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{dP}{dr} = g\rho, \quad (5.2)$$

С. Лаплас нашел одно из основных уравнений, связывающих *радиус планеты с плотностью и давлением в ее недрах*:

$$\frac{dP}{dr} = -4\pi G\rho r^{-2} \int_0^r \rho q^2 dq, \quad (5.3)$$

Здесь P – давление, q – радиус-вектор шарового слоя $0 < q \leq r$. Эти уравнения с учетом дополнительных предположений о состоянии вещества и были впоследствии положены в основу всех моделей плотности вещества Земли и других планет солнечной системы: модели Эмдема, Роша, Дарвина, Лежандра-Лапласа, Вильямсона-Адамса, М.С. Молоденского, В.Н. Жаркова и других. Подробный обзор этих моделей можно найти в обстоятельных монографиях [Буллен, 1978; Джекобс, 1979; Жарков, Трубицын, 1980; Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971].

Упругость и плотность Земли

Данные о скоростях сейсмических волн, полученные в сейсмологии (рис. 4.10, 4.11), не позволяют найти отдельно функции плотности $\rho(r)$, модуля сжатия $K(r)$ и модуля сдвига $\mu(r)$ как функций радиуса r . По полученным выше формулам (4.69) можно найти лишь отношения этих величин.

Для раздельного нахождения этих величин необходимы дополнительные условия.

В качестве таких данных используются в первую очередь значения массы M , момента инерции C Земли или связанной с ними величины $I_2 = \frac{\varepsilon_H C}{Ma^2}$, где ε_H – динамическое сжатие, определяемое соотношениями (2.19) – (2.21), (2.23), a – как и выше, экваториальный радиус Земли.

К упомянутым величинам следует отнести и граничные условия – плотность ρ^0 самых верхних слоев Земли. К сожалению, установить ρ^0 довольно трудно в силу сложности строения земной коры и большого разброса плотностей горных пород. Так как верхние части мантии Земли, как мы видели, по своим свойствам представляются более однородными, то обычно в качестве ρ^0 берут плотность вещества мантии непосредственно под границей Мохоровичича.

Определение плотности вещества внутри Земли с помощью схемы расчета Буллена и условий Роша, Молоденского и Адамса - Вильямсона; соответствующие им плотностные модели [Магницкий, 1965; с. 246-254; Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 64-67]

Схема расчета Буллена. Несмотря на недоступность недр Земли для непосредственных исследований, распределение плотности вещества в мантии и земном ядре удастся определить достаточно надежно по данным о скоростях распространения в этих геосферах сейсмических волн от землетрясений. Впервые разработанная в конце 1950-х гг. К. Булленом [1978] такая методика впоследствии была существенно усовершенствована им и другими исследователями за счет привлечения дополнительной информации о моменте инерции и свободных колебаниях Земли, что значительно повысило достоверность определений.

В основе методики определения распределения плотности в Земле лежат известные уравнения гидростатики (5.1) – (5.3) и термодинамические соотношения, связывающие радиальные градиенты плотности в среде с сейсмическими параметрами среды (уравнения состояния, условие сжимаемости и др.). Скорости сейсмических волн с глубиной, обычно, возрастают (рис. 4.10, 4.11). Поэтому интерпретация сейсмических годографов (рис. 4.3) с целью определения зависимостей этих скоростей от глубины проводится по описанной в предыдущей, четвертой главе методике Герглоца-Вихерта.

Уравнения, связывающие между собой значения сейсмических скоростей с параметрами среды, позволяют определять лишь градиент плотности, а не само значение плотности. Поэтому для построения зависимости плотности от глубины приходится задаваться граничным значением плотности на поверхности Земли ρ^0 . При этом «сшивку» решений, получаемых для отдельных геосфер (например, для ядра и нижней мантии), производят по условию непрерывности давления на границах этих геосфер, а значения плотности в них подбирают таким образом, чтобы расчетные значения массы $M = 5,98 \cdot 10^{27}$ г и момента инерции $C = 0,8038 \cdot 10^{45}$ г·см² Земли совпадали бы с их измеренными значениями при среднем радиусе Земли $R_0 = 6371$ км. Дополнительные уточнения в распределении плотности с глубиной позволяют внести данные о частотном спектре собственных колебаний Земли, возбуждаемых сильными землетрясениями.

Таким образом, любой закон изменения плотности с глубиной должен быть решением следующей задачи, включающей, по крайней мере, три, достаточно жесткие условия:

$$\left. \begin{aligned} \rho^0 &= 3,3 - 3,5 \text{ г/см}^3, \\ 4\pi \int_0^{R_0} \rho r^2 dr &= M, \\ C &= \frac{8\pi}{3} \int_0^{R_0} \rho r^4 dr. \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

Модель Радо. Кроме того, Радо ввел еще очевидное условие неуменьшения плотности с глубиной, вытекающее из (2.11), (2.12):

$$\frac{d\rho}{dr} \geq 0. \quad (5.5)$$

Задача (5.4) - (5.5) позволила Радо, не прибегая к каким-либо гипотезам или дополнительным данным, вычислить для каждой глубины допустимые пределы для плотности с использованием следующей простой схемы.

Пусть ρ - истинный закон изменения плотности, а δ - какой-либо другой закон, предполагаемый нами, но подчиняющийся условиям (5.4). Тогда имеем:

$$\left. \begin{aligned} 4\pi \int_0^{R_0} \delta r^2 dr &= M, \\ \frac{8\pi}{3} \int_0^{R_0} \delta r^4 dr &= C. \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

Вычитая из второго соотношения в (5.4) первое соотношение в (5.6), находим:

$$\int_0^{R_0} (\rho - \delta) r^2 dr = 0. \quad (5.7)$$

Так как r^2 знак не меняет, то каков бы ни был закон изменения δ , существует, по крайней мере, одно значение $r = r_1$, при котором $(\rho - \delta)$ меняет знак.

Аналогично, вычитая из третьего соотношения в (5.4) второе в (5.6), находим:

$$\int_0^{R_0} (\rho - \delta)(r^4 - r_1^2 r^2) dr = 0. \quad (5.8)$$

$(\rho - \delta)$ меняет знак при $r = r_1$, но в этой же точке меняет знак и $(r^4 - r_1^2 r^2)$, следовательно, подинтегральное выражение (5.8) не меняет знака при $r = r_1$. Таким образом, существует еще одно значение $r = r_2$, при котором $(\rho - \delta)$ меняет знак.

Наложим на δ условие Радо (5.5) в виде $\frac{d\delta}{dr} = 0$ везде, кроме точки r_3 , где δ может меняться скачком.

Таким образом, принимаем закон плотности

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 \text{ при } r \leq r_3, \\ \delta &= \delta_2 \text{ при } r \geq r_3. \end{aligned}$$

Значения δ_1 и δ_2 сразу определяются из условий (5.6).

На рис. 5.1. ломаная линия 2-2 представляет закон изменения плотности δ , линия 1-1 - истинный ход плотности δ с глубиной. Из данных, представленных на рис. 5.1, и условия (5.5) видно, что при $r = r_3$ кривая δ обязательно пройдет между значениями $\delta = \delta_1$ и $\delta = \delta_2$. Следовательно, δ_1 и δ_2 будут пределами для плотности Земли на расстоянии r_3 от центра.

К сожалению, пределы Радо еще очень широки и потому не могут дать существенных сведений о плотности внутри Земли.

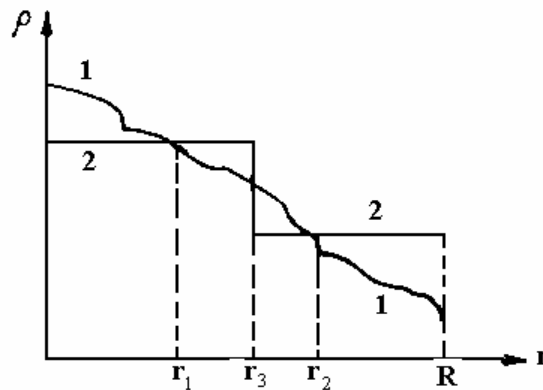


Рис. 5.1. Зависимость плотности от радиуса при условии Радо. Пояснения в тексте

Модель Молоденского. Для сужения пределов изменения плотности М.С. Молоденским было предложено вместо условия Радо (5.5) ввести условие [Молоденский, 1953; 2001, с. 314-317; Молоденский, Еремеев, Юркина, 1962]:

$$-\frac{d\rho}{dr} \geq \frac{g\rho^2}{K}. \quad (5.9)$$

Соотношение (5.9) следует из выполнения следующих упруго-гидродинамических условий. С одной стороны, из закона Гука $d\rho/\rho = dP/K$, с другой – из справедливости гидростатического приближения $dP = -g\rho dr$. Вместе эти два уравнения для однородного вещества дают:

$$-\frac{d\rho}{dr} = \frac{g\rho^2}{K}. \quad (5.10)$$

Взяв в качестве предельного случая соотношение (5.10), можно, учитывая (5.6), методом численного интегрирования вычислить кривые, которые удовлетворяют следующему условию:

$$-\frac{d\delta}{dr} = \frac{g\delta^2}{K}.$$

Если теперь прямые $\delta = \delta_1$ и $\delta = \delta_2$ на рис. 5.1 заменим полученными кривыми, то найдем новые пределы плотности - пределы плотности по Молоденскому, которые на рис. 5.2 проведены пунктиром. Пределы по Молоденскому дают максимально возможный скачек плотности на границе земного ядра, равный $4,6 \text{ г/см}^3$. Однако если допустить, что температура может отклоняться от адиабатической, то эти пределы могут несколько расшириться.

Если скачек плотности на границе ядра будет равняться предельно возможному значению, то будет получен закон изменения плотности с глубиной по Молоденскому, изображенный на рис. 5.2 точечным пунктиром.

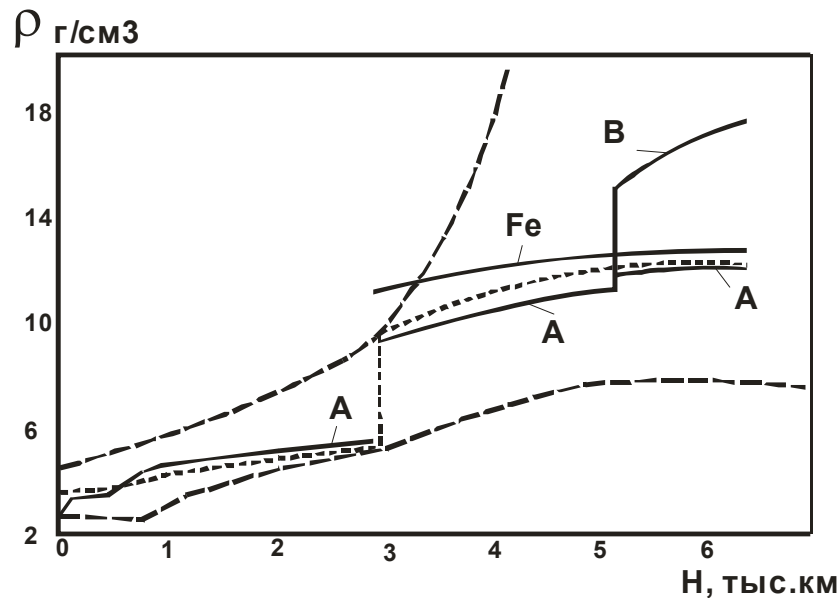


Рис. 5.2. Различные решения для закона изменения плотности с глубиной. *A* и *B* – решения Гуттенберга-Буллена, Буллена. Пунктиром обозначены пределы плотности по Молоденскому, точечный пунктир – плотность по Молоденскому. Пояснения в тексте.

Модель Адамса-Вильямсона. Формула (5.9) в случае химически однородного вещества может быть положена в основу модели Адамса-Вильямсона определения закона изменения плотности Земли с глубиной [Williamson, Adams, 1923].

Для Земли однородного состава изменение плотности с глубиной можно записать в следующем виде $\frac{d\rho}{dr} = \left(\frac{d\rho}{dr}\right)_s + \left(\frac{d\rho}{dr}\right)_\tau$. Здесь $\left(\frac{d\rho}{dr}\right)_s$ - адиабатическое изменение плотности (при постоянной энтропии S); $\left(\frac{d\rho}{dr}\right)_\tau$ - изменение плотности за счет того, что истинный температурный градиент в Земле отличается от адиабатического на величину τ .

Из (5.10) имеем $\left(\frac{d\rho}{dr}\right)_s = -\frac{g\rho}{K_s/\rho} = -\frac{g\rho}{F}$, так как, в соответствии с соотношениями (4.69), величины $K_s/\rho = F = V_p^2 - 4/3V_s^2$, полученные из сейсмических данных, соответствуют адиабатическим условиям. Если теперь α - коэффициент объемного расширения, то приращение плотности при температурном градиенте τ будет $d\rho = \alpha\rho\tau dr$, $(d\rho/dr)_\tau = \alpha\rho\tau$.

Таким образом,

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{g\rho^2}{K_s} + \alpha\rho\tau \quad (5.11)$$

Для большей части Земли, за исключением самых верхних ее частей, адиабатический градиент τ можно считать небольшим. В жидком ядре, по-видимому, можно принять $\tau = 0$. Поэтому, в первом приближении выражение (5.11) можно заменить через (5.10). При этом учет возможности изменения химического состава по глубине можно провести путем перехода от неравенства (5.9) к равенству (5.10) следующим образом:

$$-\frac{d\rho}{dr} = \chi(r) \frac{g\rho^2}{K_s} \quad (5.12)$$

Здесь $\chi(r)$ - функция, учитывающая отклонение вещества Земли от однородного в результате возможных изменений с глубиной, как химического состава вещества Земли, так и фазовых переходов, происходящих при изменении давления и температуры.

В настоящее время имеется много решений уравнения (5.12) при разных предположениях относительно $\chi(r)$. Рассмотрим только самое простое предположение относительно $\chi(r)$, которое состоит в следующем. Земля считается однородной, т.е. полагается $\chi(r) = 1$, везде, кроме границы земного ядра, где, как указывают данные сейсмологии, механические характеристики вещества Земли меняются скачком при переходе от мантии к ядру. И покажем, что имеющиеся данные противоречат такому предположению.

Обозначим через m_l массу части Земли, заключенной внутри шара радиуса r_l :

$m_l = 4\pi \int_0^{r_l} \rho(r')^2 dr'$; ускорение силы тяжести на расстоянии r от центра Земли примем равным $g = Gm/r^2$. Тогда уравнение (5.12) примет вид:

$$-\frac{d\rho}{dr} = G \frac{m\rho}{r^2 F}, \quad (5.13)$$

где, как и выше, $F = V_p^2 - 4/3V_s^2$. Полученное уравнение (5.13) в совокупности с условием

$$dm/dr = 4\pi\rho r^2 \quad (5.14)$$

решаем методом численного интегрирования. В качестве граничных условий выбираем соотношения: $m_1(r_1 \rightarrow R_0) \rightarrow M$, $\rho_1(r_1 \rightarrow R_0) \rightarrow \rho^0$.

Величину скачка плотности на границе ядра при $r_1 = 0,55R_0$ определим из уравнения $\frac{8\pi}{3} \int_0^{R_0} r^4 dr = C$. Полученное таким образом распределение плотности ρ^* (рис. 5.3) позволяет найти момент инерции ядра C_1 .

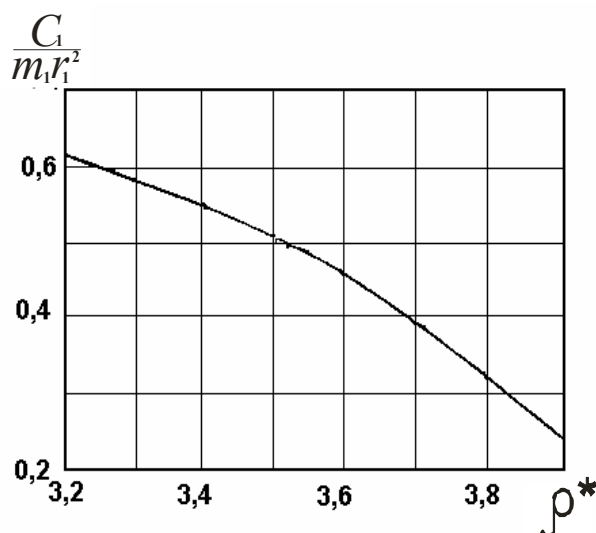


Рис. 5.3. Зависимость между безразмерным моментом инерции ядра и плотностью ρ^* в модели Адамса-Вильямсона.

Полученная зависимость показывает, что, с одной стороны, ρ^* никак не может быть меньше $3,7 \text{ г/см}^3$, т.к. в этом случае момент инерции ядра C_1 становится больше $0,4m_1r_1^2$ и плотность в ядре должна убывать с глубиной, что физически маловероятно. С другой - значение $\rho^* = 3,7 \text{ г/см}^3$, в силу первого соотношения в (5.4) представляется неоправданно большим.

Таким образом, приходится сделать единственно возможный вывод о том, что первоначальное предположение об «однородности» $\chi(r) = 1$ везде, кроме границы ядра, неверно. Другими словами, проведенный анализ показал, что отклонения от однородности вещества следует искать, в первую очередь, в мантии Земли, скорее всего - в слое C.

Модель плотности Гутенберга-Буллена. На рис. 5.2 сплошной линией «А» показан закон изменения плотности, при котором «скачек» плотности на глубине 500 км в соответствии с сейсмологическими данными заменен плавной интерполяционной кривой в виде полинома второй степени. При этом везде, кроме слоя C и границы ядра, Земля считается однородной. Момент инерции ядра при этом составляет $C_1 = 0,387m_1r_1^2$. Полученная в результате плотностная модель строения Земли известна как модель "А" Буллена [Буллен, 1978]. По существу с ней совпадает и модель Земли Гутенберга [Гутенберг, 1963]. Основная разница между ними в том, что при примерно тех же плотностях, как и в модели "А", в модели Гутенберга предполагается изменение скоростей сейсмических волн на глубине в соответствии со скоростным разрезом по Гутенбергу, а не по Джеффису - Буллену, как в модели "А" Буллена.

Модель плотности Буллена. Плотность в модели «В» на рис. 5.2 практически совпадает с плотностью по модели Молоденского, показанной на рис. 5.2 точечным пунктиром. Только во внутреннем ядре в случае модели «В» имеем увеличенную плотность – кривая «В». Однако из-за малого объема внутреннего ядра нельзя судить о его плотности. Существует вариант модели «А», в которой плотность во внутреннем ядре такая же, как и в модели «В»; на распределении плотности в мантии это почти не сказывается.

Из данных, представленных на рис. 5.5, следует, что при переходе к ядру коэффициент сжимаемости K меняется почти непрерывно, что представляется несколько неожиданным, если учесть, что плотность меняется при этом скачком на значительную величину.

Тем не менее, была предложена модель Земли, основанная на постулате о непрерывности K_S . Предполагалось также, что плотность на глубине уже 200 км может быть достаточно велика. В итоге была получена модель Земли, названная модель "В" по Буллену.

Сопоставление моделей. Для плотности внутри Земли, кроме соотношений (5.13) и (5.14), можно получить прямую зависимость от скачка скоростей сейсмических волн, если предположить, что упругие модули в слоях 1 и 2 зависят только от их плотностей ρ_1 и ρ_2 следующим образом:

$$\frac{(V_P V_S^2)_1}{(V_P V_S^2)_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} e^{3\gamma(1-\rho_2/\rho_1)}, \quad (5.15)$$

где параметр Грюнайзена γ определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{\partial \ln(\rho V_P V_S^2)^{1/3}}{\partial \ln \rho},$$

которая получена в предположении, что сейсмические скорости зависят только от плотности вещества.

Сопоставление с моделью "А" Буллена дает полную согласованность с (5.15), применяемой в отдельности к каждому из слоев В, С, D.

Конечно, такое сопоставление не может быть доказательством справедливости принятой модели Земли.

Для оценки близости к истине той или иной модели Земли необходимо привлечение нового экспериментального материала. Такими новыми материалами в последние годы оказались данные наблюдений за собственными колебаниями земного шара. Именно эти сведения позволили отклонить ряд неудачных моделей Земли. В последние годы после Камчатского 1952 г., Чилийского 1960 г., Аляскинского 1964 г. и других сильных землетрясений были измерены периоды более чем 100 тонов собственных колебаний Земли. Значения периодов наблюдавшихся волн, в общем, хорошо согласуются с расчетными для модели "А" Гутенберга - Буллена. И данные о таких периодах позволяют существенно улучшить модель строения Земли.

Распределение упругих модулей с глубиной

Знание закона изменения плотности с глубиной (рис. 5.2) позволяет по формулам (4.69) получить значения упругих модулей K и μ для каждой глубины. На рис. 5.5 приведены значения K_S и μ для модели "А" Гутенберга - Буллена.

Давление и ускорение силы тяжести с глубиной
[Магницкий, 1965; с. 246-254; Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 69]

Если известен закон изменения плотности для Земли, то вычисление хода графиков ускорения свободного падения g и давления p с глубиной не представляет труда, так как:

$$g(r) = G \frac{4\pi}{r^2} \int_0^r \rho(r')^2 dr', \quad (5.16)$$

$$dp = -g\rho dr. \quad (5.17)$$

На рис. 5.6 кривые 1 и 2 показывают изменение g и p внутри Земли в зависимости от плотности Земли, соответствующей модели "А" Буллена - Гутенберга. Из данных, представленных на этом рисунке, видно, что g на протяжении всей мантии Земли примерно постоянно.

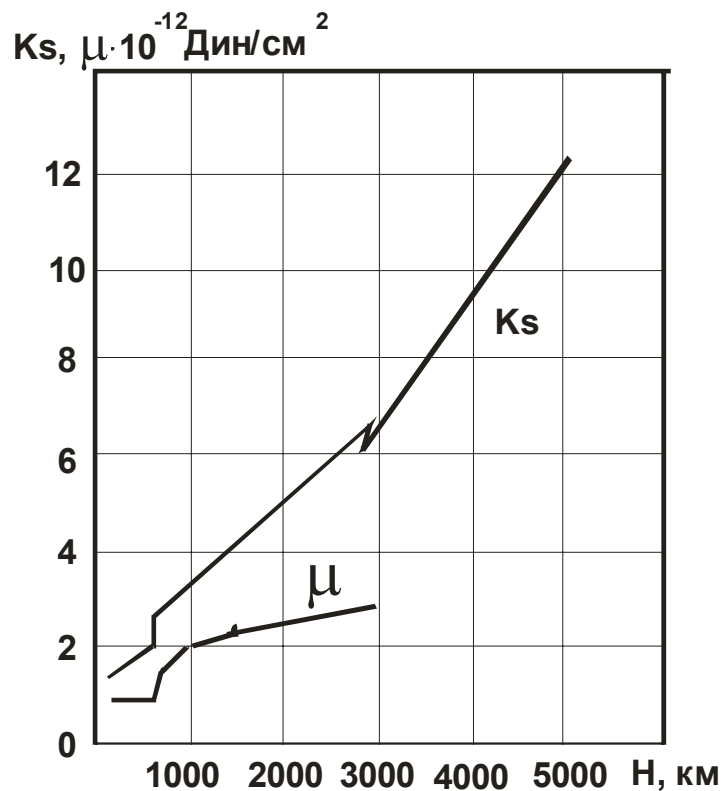


Рис. 5.5. Распределение упругих параметров с глубиной

Мантия Земли [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 52-55]

Силикатная оболочка Земли - мантия, расположена между подошвой земной коры и поверхностью ядра на глубине около 2900 км. Обычно по сейсмическим данным мантию делят на верхнюю (слой В), до глубины 400 км, переходный слой (слой С) в интервале глубин 400-1000 км и нижнюю мантию (слой D) с подошвой на глубине примерно 2900 км. Переходный слой часто называют слоем Голицына - именно Б.Б. Голицын в 1913-1915 гг. впервые выделил границу на глубине 492 км, с которой он связал залегание слоя с повышенным градиентом скорости [Оноприенко, 2002, с. 170]. Под океанами в верхней мантии выделяется еще и слой пониженных скоростей

распространения сейсмических волн – волновод Гутенберга, обычно отождествляемый с астеносферой Земли, в которой мантийное вещество находится в частично расплавленном состоянии. Под континентами зона пониженных скоростей, как правило, не выделяется, либо слабо выражена.

В состав верхней мантии обычно включаются и подкоровые части литосферных плит, в которых мантийное вещество охлаждено и полностью раскристаллизовано. Под океанами мощность литосферы меняется от нуля под рифтовыми зонами до 60-70 км под абиссальными котловинами океанов. Под континентами толщина литосферы может достигать 200-300 км.

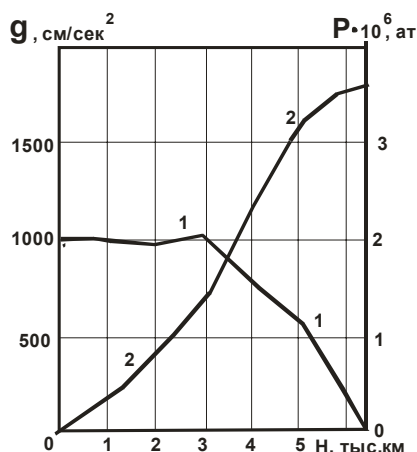


Рис. 5.6. Графики изменения давления P (в млн атм.) и ускорения свободного падения (в см/с^2) как функции глубины (в тыс км)

Как видно из данных на рис. 5.2, плотность верхней мантии (слой B) с глубиной увеличивается от 3,3-3,32 на подошве коры до 3,63-3,70 г/см^3 на глубине около 400 км. Далее в переходном слое Голицына (слое C) градиент плотности резко возрастает, и плотность повышается до 4,55-4,65 г/см^3 на глубине 1000 км. Слой Голицына постепенно переходит в нижнюю мантию, плотность которой плавно (примерно по линейному закону) возрастает до 5,53-5,66 г/см^3 на глубине ее подошвы.

Увеличение плотности мантии с глубиной объясняется уплотнением ее вещества под влиянием все возрастающего давления вышележащих мантийных слоев, достигающего на подошве мантии значений 1,35-1,40 Мбар. Особенно заметное уплотнение силикатов мантийного вещества происходит в интервале глубин 400-1000 км. Как показал А. Рингвуд, именно на этих глубинах многие минералы испытывают полиморфные превращения.

Признание существования в мантии конвективных движений позволяет определить и ее температурный режим, поскольку при конвекции распределение температуры в мантии должно быть близким к адиабатическому, т.е. такому, при котором между смежными объемами мантии не происходит теплообмена, связанного с теплопроводностью вещества. В таком случае теплопотери мантии происходят только в ее верхнем слое – через литосферу Земли, распределение температуры в которой уже резко отличается от адиабатического.

Зная распределение плотности вещества в мантии, можно подсчитать и ее массу: она оказывается равной $4 \cdot 10^{27}$ г, что составляет около 67% от общей массы Земли.

На подошве нижней мантии выделяется еще один мантийный слой толщиной около 200 км, обычно обозначаемый символом D'' , в котором уменьшаются градиенты скоростей распространения сейсмических волн и возрастает затухание поперечных волн. На основании анализа динамических особенностей распространения волн, отраженных от поверхности земного ядра, российским ученым И.С. Берзон и ее

коллегам удалось в конце 1960 – начале 1970-х гг. выделить тонкий переходный слой между мантией и ядром толщиной около 20 км, названный слоем Берзон, в котором скорость поперечных волн в нижней половине убывает с глубиной от 7,3 км/с практически до нуля.

Сама граница перехода от мантии к земному ядру при этом остается достаточно резкой.

Земное ядро [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 55-64]

Земное ядро надежно выделяется по сейсмическим данным и, прежде всего, по четкой тени на годографах рефрагированных в мантии сейсмических волн, по отраженным от его поверхности продольным и поперечным волнам и по полному затуханию во внешнем ядре поперечных волн. Скорость продольных волн в ядре при этом резко уменьшается примерно в 1,7 раза (рис. 4.10, 4.11). Отсюда следует важный вывод, что вещество во внешней оболочке земного ядра (во внешнем ядре или слое *E*) находится в жидком состоянии. С другой стороны, существование обменных волн (волн, испытывающих преобразование от продольных к поперечным и опять к продольным) в центральных областях Земли и другое скачкообразное повышение скорости продольных волн в этих областях, свидетельствует о существовании у Земли еще и внутреннего, эффективно жесткого ядра.

Радиус внутреннего жесткого ядра (слой *G*) примерно равен 1200-1500 км, мощность переходного слоя между внутренним и внешним ядром (слой *F*) приблизительно 300-400 км, а радиус внешнего, жидкого ядра (слой *E*) равен 3450-3500 км – глубины, соответственно, 2870-2920 км. Плотность «ядерного» вещества во внешнем ядре монотонно изменяется от 9,5-10,1 г/см³ на его поверхности до 11,4-12,3 г/см³ на подошве (рис. 5.2). Плотность вещества во внутреннем ядре возрастает примерно на 8-10% и в центре Земли достигает 13-14 г/см³. Масса земного ядра в разных моделях заключена в пределах $(1,91-1,94) \cdot 10^{27}$ г, что составляет 31-32% всей массы Земли.

Проведенная в конце 1980-х гг. А. Дзивонским и его коллегами сейсмическая томография земного ядра показала, что его поверхность неровная и на ней существуют заметные отклонения от равновесной фигуры эллипсоида вращения, достигающие $\pm(6-10)$ км. Выявленные неровности на поверхности земного ядра, вероятнее всего, отмечают собой корни восходящих и нисходящих конвективных потоков в нижней мантии.

Внутреннее ядро, в котором содержится приблизительно $1,1 \cdot 10^{26}$ г вещества, или около 1,8% массы всей Земли, как уже отмечалось, является твердым образованием и, скорее всего, отличается по химическому составу от внешнего ядра.

Тектоническая активность Земли, геохимическая эволюция мантии, ее дегазация и генетически связанные с ними процессы формирования океанов, атмосферы и земной коры с присущими ей месторождениями полезных ископаемых, а также возникновение и развитие жизни на Земле в конце концов приводятся в действие и управляются планетарным процессом выделения земного ядра.

Состав земного ядра. Суммируя теоретические соображения о природе «ядерного» вещества Земли, а также экспериментальные данные о температуре плавления и плотности эвтектических сплавов железа с его окисью при высоких давлениях, можно с большой долей вероятности утверждать, что внешняя (жидкая) часть земного ядра состоит из расплава окиси одновалентного железа Fe_2O или из эквивалентного этому соединению эвтектического сплава Fe_2O , устойчивых только при высоких давлениях. Внутреннее же ядро, вероятнее всего, состоит из железоникелевого сплава $Fe_{0,9}Ni_{0,1}$. Состав переходного слоя *F* между внешним и внутренним ядром естественнее всего считать сульфидным состава FeS .

Распределение плотности, температуры, давления и ускорения силы тяжести в современной Земле в модели Сорохтина

Таблица 2.1.

Распределение плотности, температуры, давления и ускорения силы тяжести в современной Земле [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 70]

Глубина, км	Плотность, г/см ³	Температура, К	Давление, кбар	Ускорение силы тяжести, см/с ²
0	2,85	288	0	981
200	3,30	1770	65,5	990
430	3,60	1940	138	997
430	3,82	2010	- -	- -
600	4,09	2130	218,6	1000
670	4,16	2170	247,2	1001
670	4,37	2110	- -	- -
800	4,49	2170	305,7	1000
1000	4,61	2260	397,7	996
1200	4,72	2360	491	994
1400	4,83	2450	587,8	993
1600	4,94	2540	686	993
1800	5,04	2640	786,3	995
2200	5,25	2820	994,9	1006
2600	5,45	3010	1216,2	1033
2886	5,60	3130	1384	1067
2886	9,92	- -	- -	- -
3000	10,06	3310	1503	1041
3400	10,60	3880	1909	945
3800	11,06	4400	22,87	841
4200	11,43	4870	2628	732
4600	11,72	5280	2926	622
5000	11,97	5620	3175	517
5120	12,04	5710	3242	490
5120	13,00	- -	- -	- -
5400	13,10	5890	3382	386
5800	13,23	6060	3518	227
6000	13,27	6110	3559	155
6200	13,29	6140	3580	68
6371	13,29	6140	3583	0

Литература

- Буллен К.Е.* Плотность Земли. М.: Мир, 1978. 442 с.
- Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: ИЛ, 1963. 264 с.
- Джекобс Дж.* Земное ядро. М.: Мир, 1979. 305 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В.* Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. М.: Наука, 1971. 384 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 379 с.
- Молоденский М.С.* Гравитационное поле. Фигура и внутреннее строение Земли. Избранные труды / Ред. В.Н. Страхов М.: Наука, 2001. 569 с.
- Молоденский М.С.* Плотность и упругость внутри Земли // Труды ГеоФИАН СССР. 19 (146). 3. 1953.
- Молоденский М.С., Еремеев В.Ф., Юркина М.И.* Оценка точности ряда Стокса и некоторые попытки уточнения его теории // Тр. ЦНИИГАиК. 1962. Вып. 145. С. 3-21.
- Онопrienко В.И.* Борис Борисович Голицын. М.: Наука, 2002. 335 с.
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Развитие Земли. Учебник / Ред. В.А. Садовничий. М.: Изд-во МГУ, 2002. 560 с.
- Williamson E.D., Adams L.H.* Density distribution in the Earth // J. Wasching. Acad. Sc. V. 13. N 4. 1923.

6. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Аномальное гравитационное поле. Отклонение Земли от состояния гидростатического равновесия, касательные напряжения в нижней мантии. Волны геоида. Изостазия, теории Пратта и Эри. Отклонение от принципа изостазии. Изостазия и колебательные движения земной коры. Проблема вековых изменений силы тяжести. Редукции силы тяжести, аномалии Фая и Буге. Связь между аномалиями Буге и толщиной земной коры. О моментной природе волн геоида.

Аномалии силы тяжести

Расчеты фигуры Земли, начиная с Ньютона, производились при условии, что Земля находится в состоянии гидростатического равновесия. И, как показано в главе 2, такое приближение достаточно хорошо отражает реальное состояние Земли: как можно видеть из данных, приведенных на рис. 2.4, отклонение поверхности геоида от сфероида (2.9) невелико. Оно не превышает $\pm \Delta_{\max} \approx 70-90$ м и имеет величину порядка *квадрата сжатия Земли* ($\varepsilon^2 \approx 10^{-5}$): $|\Delta_{\max}| \approx \varepsilon^2 R_0$, где, как и выше, $R_0 = 6371$ км – средний радиус Земли, $\varepsilon \approx 1/300$ – ее сжатие.

В этой связи гравитационное поле можно представить в виде двух существенно различающихся по величине слагаемых: *нормального поля* с потенциалом (2.8), который определяет нормальное поле сил тяжести и, соответственно, нормальную фигуру Земли в виде сфероида (2.9), и *возмущенное* ($\approx \varepsilon^2 \approx 10^{-5}$, а потому – *аномальное*) с добавочным потенциалом T . Добавочный потенциал будет содержать все сферические гармоники гравитационного потенциала (2.5), начиная с третьей [Грушинский, 1976, с. 225]:

$$T = \frac{GM}{r} \sum \left(\frac{R_0}{r}\right)^n I_n P_n(\cos \Theta), \quad n = 3, 4, \dots, \infty, \quad (6.1)$$

где, как и в главе 2, P_n – полиномы Лежандра, I_n – соответствующие им моменты.

Рассмотрим некоторые важные следствия, вытекающие из неоднородного строения Земли.

Отклонение Земли от состояния гидростатического равновесия

В случае гидростатического равновесия выражение для полного геопотенциала $W + T$ (или, соответственно, (2.8) + (6.1)) будет содержать только четные моменты I_{2n} , а нечетные будут равны нулю: $I_{2n+1} = 0$. Кроме того, при гидростатическом равновесии величины четных моментов должны быстро спадать с ростом n по закону:

$$I_2 \approx \varepsilon \approx \frac{1}{(300)^2}, \quad I_4 \approx \frac{1}{(300)^2}, \quad I_6 \approx \frac{1}{(300)^3}, \quad \dots, \quad I_{2n} \approx \frac{1}{(300)^n}. \quad (6.2)$$

Однако спутниковые измерения показали, что все гравитационные моменты, начиная с I_3 , примерно одного порядка и равны

$$I_n \approx 10^{-6} \approx \varepsilon^2, \quad n \geq 3. \quad (6.3)$$

Другими словами, все моменты, кроме I_2 , оказались величинами порядка квадрата сжатия ε^2 , причем уменьшение моментов с ростом n происходит значительно медленнее,

чем ожидалось в рамках гидростатического равновесия [Жарков, 1983, с. 66] I_n , что, в первую очередь, должно отразиться на фигуре Земли.

В главе 2 отмечалось существенное различие между значениями сжатия Земли, полученными из экспериментальных наблюдений за спутниками (2.1) $\varepsilon = 1/298,255$ и определенными из гидростатической теории (2.23) $\varepsilon_H = 1/299,7$, и сделан вывод о том, что Земля «значимо» сжата на 0,5% сильнее, чем это следует из гидростатической теории.

Таким образом, общий фундаментальный вывод из спутниковых данных следующий [Жарков, 1983, с. 67; Стейси, 1972, с. 37]: *отклонение Земли от гидростатического равновесия значимо и по величине порядка квадрата сжатия ε^2* . Физически это означает, что в Земле наряду с гидростатическим напряжением – давлением – действуют *касательные напряжения*.

Решалась задача о внутренних напряжениях в гравитирующем шаре [Джеффрис, 1960; Жарков, Паньков, Калачников и др., 1969, с. 253-284]. Показано, что максимальные напряжения, возникающие в шаре, будут сосредоточены в его центральной области, и для космического тела с размерами Луны сдвиговые напряжения в ее центре будут составлять $(1,7 \div 1,8) \cdot 10^7$ дин/см². Обсуждение полученного решения в плане применимости его к Земле показало [Жарков, Трубицын, 1980, с. 157-162; Стейси, 1972, с. 37], что в теле Земли в области нижней мантии касательные напряжения могут достигать достаточно высоких значений

$$\tau \approx (2 \div 10) \cdot 10^7 \text{ дин/см}^2.$$

Поперечные волны проходят через всю мантию, которая, таким образом, до глубин 2900 км должна быть твердой. Поэтому полученный результат показывает, что прочность нижней мантии больше, чем литосферы, в которой, как известно, очаги землетрясений фиксируются на глубинах до 700 км.

Таким образом, появление значительных по величине касательных напряжений в нижней мантии является следствием отклонения Земли от состояния равновесия. Математическим выражением такого вывода является соотношение (6.3). К такому же, по сути, выводу пришел и Ф. Стейси [1972, с. 37]: «по-видимому, неправильно не связывать» возникающие вследствие отклонения гидростатического равновесия касательные напряжения «с членами высших порядков в разложении потенциала силы тяжести».

Волны геоида

По гравиметрическим данным геоид строится в два приема аналогично тому, как внешнее поле тяготения разделяется на нормальное (2.8), (2.8.1) и возмущенное (6.1). Вначале определяют основную фигуру отсчета – нормальную фигуру, а затем определяют высоты геоида (малые по величине) – расстояния геоида от нормальной фигуры.

На первый взгляд можно получить хорошее приближение, если за нормальную фигуру выбрать ньютоновскую сферу со средним радиусом R_0 и средней плотностью. Так как отклонение внешнего потенциала от ньютоновского (MG/r) порядка сжатия ε , то средние высоты геоида над сферой будут порядка $\varepsilon R_0 \approx 21$ км. Эта величина мала по сравнению с размерами Земли, но велика по сравнению с характерными высотами рельефа. Именно поэтому за нормальную фигуру выбирают эллипсоид вращения, который является эквипотенциальной поверхностью для нормального потенциала. Этот эллипсоид иногда называют *референц-эллипсоидом*; значения определяющих его параметров a и ε известны с достаточно высокой точностью.

Карты высот геоида, построенные по данным, полученным к середине 1960-х гг. в результате проведения «наземных» гравиметрических измерений и наблюдений за искусственными спутниками, представлены на рис. 6.1 и 6.2 соответственно. Видна вполне определенная закономерность в расположении минимумов и максимумов высот геоида вдоль поверхности Земли – так называемые *волны геоида* [Магницкий, 1965, с. 209-213, 224]. Сравнение этих первых «неравномерных», полученных по малочисленным точкам результатов, с последними высокоточными данными (рис. 2.4) показывает, что, несмотря на имеющиеся различия, основные черты геоида прослеживаются на всех трех картах. Действительно, с права на лево: четкий максимум к северу от Австралии, глубокий минимум в Индийском океане, опять «протяженный» Африканско - Европейский максимум и меньший минимум в Карибском море и прилегающей к Америке части Тихого океана.

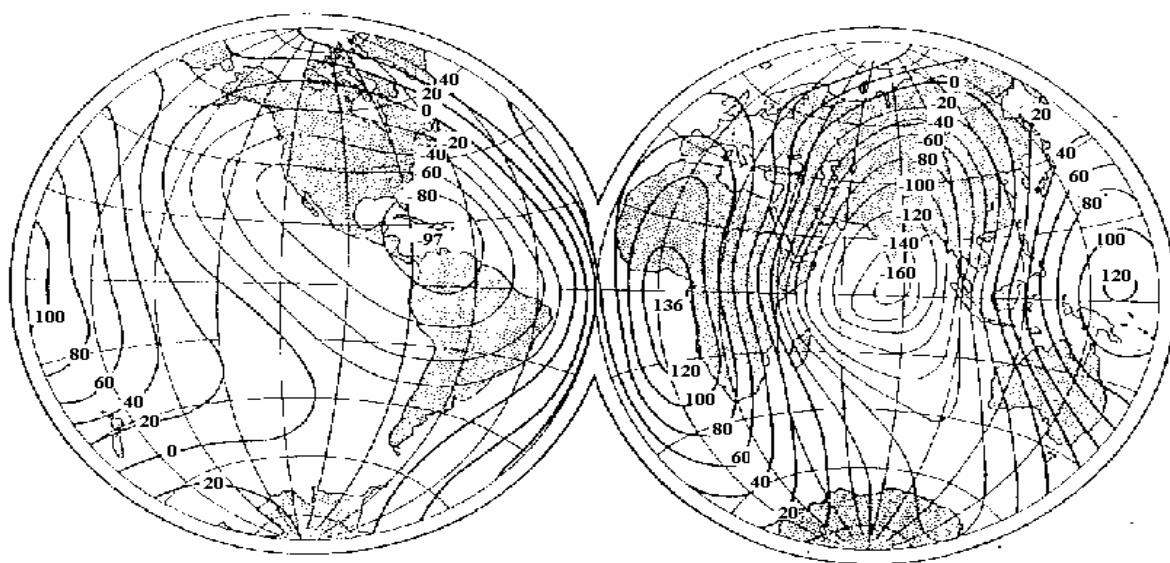


Рис. 6.1. Карта высот геоида (в м), составленная по данным гравиметрических наблюдений

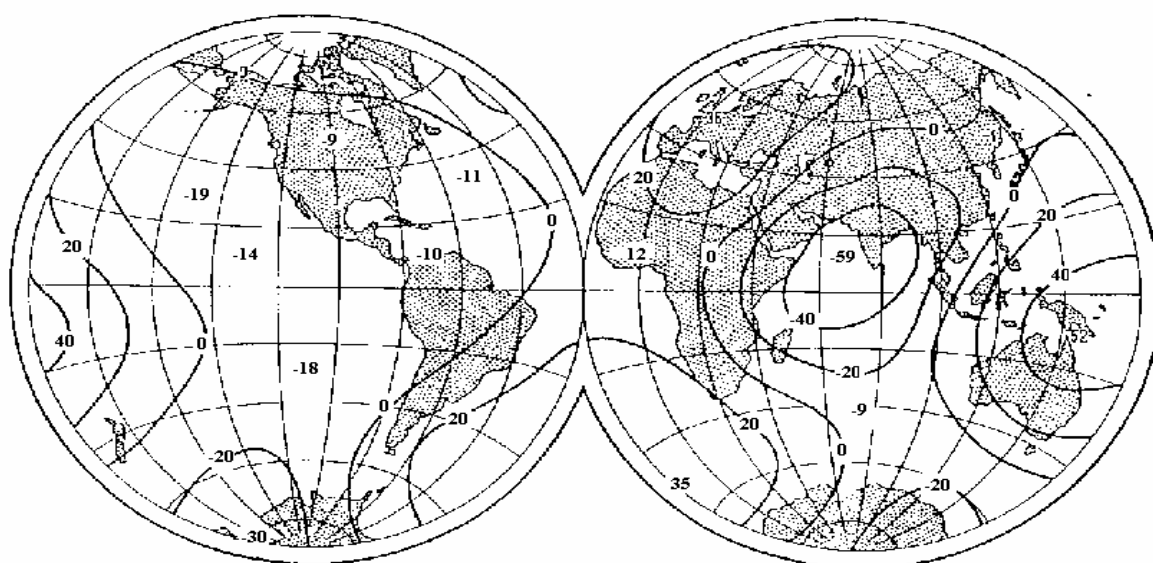


Рис. 6.2. Карта высот геоида (в м), составленная по данным, полученным при обработке наблюдений за движением искусственных спутников

Таким образом, последние высокоточные гравиметрические данные о высотах геоида, представленные на рис. 2.4 [Демьянов, Назарова, Майоров и др., 1996], достаточно убедительно подтверждают вывод, сделанный на основании первых наблюдений более 50 лет назад В.А. Магницким [1965, с. 211-213]: общий «волновой» характер строения поверхности геоида уже выявлен. И дополняют его: кроме отвечающей главным максимумам и минимумам основной, глобальной волны, прослеживающейся в экваториальной ($\varphi \approx 0$, $0 \leq \lambda \leq 360^\circ$) плоскости, геоид содержит и другие минимумы и максимумы, которые определяют и другие (более «мелкие») волны геоида в двухмерном ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$, $0 \leq \lambda \leq 360^\circ$) поле переменных.

Вывод о волновом характере (т.е. закономерно изменяющейся) поверхности геоида, по сути, по [Магницкий, 1965, с. 211-213], представляется *фундаментальным*, поскольку позволяет предположить существование планетарного масштаба механизма, который «регулирует» распределение (перемещение) массы и/или ее плотности (сжатия-разряжения) внутри планеты.

Изоスタзия

[Жарков, 1983, с. 67-71]

Высоты геоида количественно характеризуют отклонение гравитационного поля Земли от нормального поля. В принципе можно было бы предположить, что отклонение гравитационного поля от нормального обусловлено рельефом Земли. Так, можно было ожидать, что в местах, где имеется гора, гравитационное поле сильнее за счет дополнительного притяжения горы, а в местах расположения впадин поле слабее из-за дефицита массы. В действительности же карта высот геоида (рис. 2.4) показывает, что эти отклонения никак не связаны с главными топографическими особенностями Земли: и максимумы и минимумы высот геоида «с одинаковой вероятностью» приходятся и на океанические участки земной поверхности, и на континентальные.

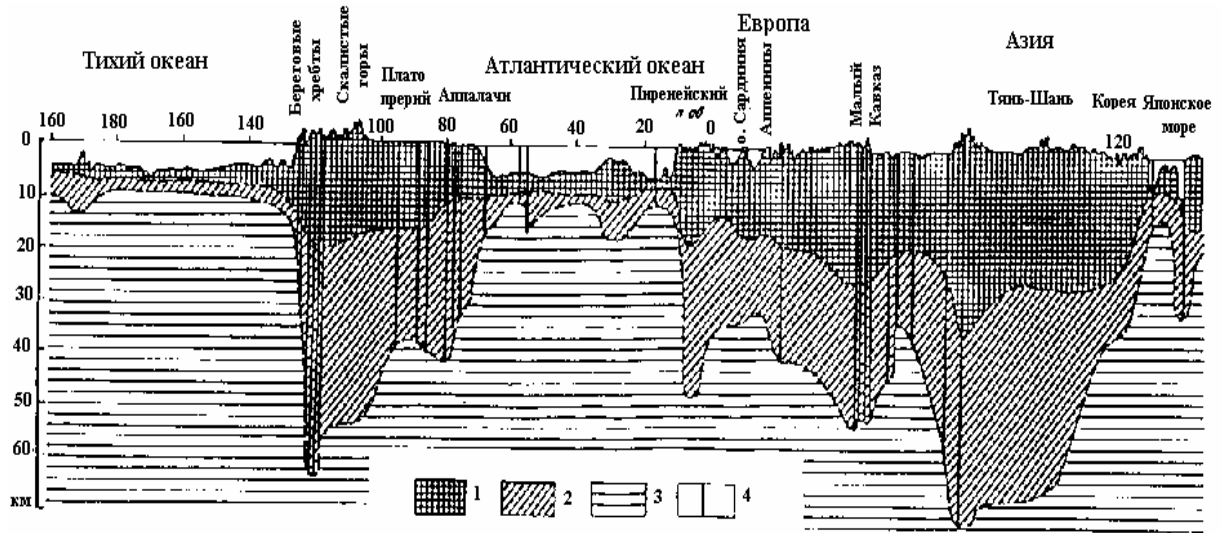
Отсюда следует важнейший вывод о том, что континентальные области изостатически скомпенсированы: материка плавают в подкоровом субстрате подобно гигантским айсбергам в полярных морях. Небольшие же отклонения гравитационного поля Земли от нормального вызваны какими-то флуктуациями плотности в коре и мантии Земли.

Качественно идея изостазии была введена в геофизику в середине 19 века. Эта концепция была выдвинута для объяснения того удивительного факта, что наличие гор почти не сказывается на гравиметрических измерениях. Согласно принципу изостазии, легкая кора, состоящая из гранита и базальта, изостатически уравновешена на более тяжелой мантии (рис. 6.3). Получается так, что масса вещества на единицу площади, измеренная вплоть до некоторой стандартной поверхности в глубине, приблизительно одинакова для всей поверхности Земли. Видим, что легкое вещество земной коры, если оно образует в некотором месте горную систему, погружается на большие глубины в тяжелые мантийные породы. Чтобы описать такую ситуацию, образно говорят, что горы имеют корни, уходящие вглубь.

Исследование изостазии приводит к важным особенностям строения наружных слоев Земли. Эти особенности, показанные на рис. 6.3, подтверждены с помощью детальных сейсмологических исследований.

Вязкости верхней мантии. Получается так, что земная кора как бы плавает в подстилающих мантийных породах. Однако, согласно данным сейсмологии, через мантию проходят поперечные сейсмические волны (см. главу 2) и, таким образом, она должна быть в твердом состоянии. В чем же здесь дело? Ответ заключается в следующем. Для периодических колебаний с периодами порядка секунд, часов, дней (собственно объемные и поверхностные сейсмические волны, собственные колебания Земли, земные приливы) и лет (быстрые и медленные тектонические волны с характерными периодами до сотен лет,

см. главу 11) – мантия ведет себя как упругое твердое тело. Для движений же с периодами порядка десяти тысяч лет и более вещество верхней мантии течет как жидкость. Жидкость с периодом релаксаций порядка десяти тысяч лет и механическими параметрами верхней мантии должна иметь очень большую вязкость – порядка 10^{21} пуаз. Вещество, обладающее такими механическими свойствами, будет течь при нагрузках, действующих на протяжении тысячелетий, и реагировать как упругое тело на периодические процессы в диапазоне от сейсмических волн и земных приливов до медленных тектонических волн.



1- гранит с включением осадочных и метаморфических отложений; 2- базальт; 3- габбро; 4- глубина земной коры по сейсмическим определениям.

Рис. 6.3. Разрез земной коры по 40° с. ш., построенный по значениям аномалии Буге по [Магницкий, 1965, с. 232]

Теория изостазии [Стейси, 1972, с. 67]. Открытие эффекта компенсации масс привело к созданию теории изостазии, по которой в каждом вертикальном столбе единичного поперечного сечения полная масса горных пород (и водной толщи, где она имеется) одна и та же. Столбы нужно отсчитывать от некоторого «уровня компенсации», ниже которого Землю можно считать однородной. Таким образом, возвышения на поверхности земной коры гидростатически уравновешены. Полного равновесия нет нигде, но в континентальных масштабах кора очень близка к равновесию.

Теории Пратта и Эри излагаются по [Ботт, 1974; Орленок, 2000, с. 98-100].

По теории Пратта блоки коры имеют разную плотность и высоту. Чем выше блок, тем меньше его средняя плотность. Компенсация массы различных блоков коры предположительно осуществляется где-то в мантии на некоем уровне T . Таким образом, если ρ_1 и ρ_2 – плотности континентального блока, ρ_3 – плотность океанического блока, H – высота блока над уровнем моря, P – глубина моря, то, согласно Пратту, имеют место следующие равенства:

$$\rho_1(T + H) = C_1,$$

$$\rho_2 T = C_2,$$

$$\rho_3(T - P) + \rho^w P = C_3,$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C = const.$$

Здесь ρ^w - плотность воды, равная примерно $\rho^w = 1,03 \text{ г/см}^3$.

При $H = 0$, из первого соотношения, полагая $\rho_1 = \rho_0$, где ρ_0 - средняя плотность земной коры, находим постоянную: $C = \rho_0 T$ (часто принимают $\rho_0 = 2,67 \text{ г/см}^3$). Тогда для уровня компенсации T получаем выражения:

$$T = \frac{H\rho_1}{\rho_0 - \rho_1}, \quad T = \frac{P(\rho_3 + \rho^w)}{\rho_0 - \rho_3}.$$

Если компенсация осуществляется на нулевом уровне ($T=0$), то это соответствует нулевой плотности столба ($\rho_1 = 0$), возвышающегося над уровнем моря, т.е. внешние массы гор и материков равны нулю. На языке редукций это соответствует поправке за свободный воздух. Таким образом, редукция Фая соответствует изостатической компенсации на уровне моря, при этом массы, расположенные под точкой наблюдений, опускаются на уровень моря и конденсируются в бесконечно тонкий слой.

Если компенсация осуществляется на бесконечности ($T=\infty$), что имеет место при $\rho_0 - \rho_3 = 0$, т.е. избыточных масс нет, то надземные массы притягивают полностью. Это соответствует редукции Буге, где весь избыток масс отнесен за счет притяжения слоя плотностью ρ_0 , лежащего выше уровня моря, что адекватно опусканию избыточных масс под уровень моря и «размыванию» их на бесконечно большую глубину.

Таким образом, редукции Фая и Буге по существу являются предельными изостатическими редукциями. Они показывают, что уровень компенсации T лежит где-то между нулем (редукция Фая) и бесконечностью (редукция Буге). Американский геофизик Хейфорд разрабатывал гипотезу Пратта в начале XX столетия; для глубины компенсации он принял значение 113,7 км. В более поздних работах она оценивается в диапазоне от 96 до 102 км.

По гипотезе Эри земная кора имеет всюду одинаковую плотность ρ_0 , но разную высоту блоков и как бы плавает в более тяжелом субстрате, имеющем постоянную плотность ρ . Следовательно, разность плотности субстрата (астеносферы) и плотности земной коры (литосферы) у Эри – величина постоянная: $\rho - \rho_0 = \Delta\rho$. Глубина погружения блока определяется законом Архимеда – более высокий блок имеет больший корень в астеносфере, чем блок менее высокий. Условие равновесия запишется в виде: $\rho_0 B = \rho b$. Здесь B – мощность коры блока, b – глубина погружения его в астеносферу. Несмотря на различные предпосылки в схемах Пратта и Эри, математически они не отличаются друг от друга, массы блоков до некоторой фиктивной границы компенсации T оказываются равными.

В действительности, изостатическое равновесие земной коры, в среднем, на 63% осуществляется по принципу компенсации по глубине (по Эри) и на 37% за счет разности в плотностях (по Пратту).

Отклонения от принципа изостазии

Если аномалии "в свободном воздухе" близки к нулю, то аномалии Буге должны быть интенсивными положительными на океанах и отрицательными на континентах, что и наблюдается. Сопоставление аномалий Буге "в свободном воздухе" позволяет сделать вывод о степени соблюдения компенсации в земной коре. При полной компенсации аномалии "в свободном воздухе" (точнее, изостатические) должны быть равны нулю. При полном отсутствии компенсации в нуль должны обращаться аномалии Буге (точнее, топографические). Фактически аномалии "в свободном воздухе" раз в 10 меньше аномалий Буге, т. е. компенсация, в среднем, осуществляется с точностью 10%.

Особый случай на фоне общей хорошей компенсации представляют области, где компенсация резко нарушена и где, следовательно, наблюдаются интенсивные аномалии "в свободном воздухе".

Можно отметить три главных типа подобных нарушений гравитационного поля.

Первый тип нарушений связан с вулканическими островами, например, Кипр, Гавайские о-ва. Эти образования сопровождаются интенсивными положительными аномалиями, которые, однако, в большинстве случаев почти целиком устраняются введением топографической редукции, т. е. эти острова представляют собой простую нагрузку на кору, ничем не компенсированную.

Вторым типом нарушений, пожалуй, наиболее интересным, являются относительно неширокие, но очень длинные полосы интенсивных отрицательных аномалий. Такие полосы дефекта силы тяжести протягиваются вдоль западного берега Южной и Центральной Америки, вдоль Алеутских островов и далее вдоль внешнего края островных дуг западной окраины Тихого океана. Такие аномалии известны в других океанах и морях: вдоль внешнего края дуги Суматра-Ява, вдоль Пуэрто-Рико, по дуге Южных Сандвичевых островов, по внешней дуге островов у берегов Греции. Всюду эти аномалии или совпадают с глубоководными желобами, или идут по их краю, где желоба сильно заполнены осадками. Однако подобные аномалии встречаются, хотя и в значительно ослабленном виде, и на континентах. Примером является полоса аномалий вдоль фронта формации Гренвиль в Канаде. Эта полоса связана с позднекембрийским орогеническим поясом.

Третий тип нарушений представляет интенсивные и довольно обширные поля положительных аномалий в местах недавних опусканий коры. Примером может служить море Банда в Индонезии.

Изостазия и колебательные движения земной коры. Проблема вековых изменений силы тяжести, ее современное состояние [Магницкий, 1965; с. 241-243]

Вертикальные движения земной коры возникают вследствие внутренних геотектонических процессов. Можно предположить два основных типа таких процессов. Может происходить сжатие или расширение глубинного материала без существенных перемещений его в горизонтальном направлении, а также приток или отток глубинного со стороны путем перемещения в горизонтальном направлении. Наконец, возможно комбинирование этих процессов в каждый данный момент или последовательно во времени.

В зависимости от типа процесса будет происходить и изменение гравитационного поля Земли. Анализ показывает, что медленные движения больших частей платформ (ледники Скандинавии) происходит в обстановке перетекания глубинного вещества. В случае быстрых недавних поднятий (Центральная Африка, южная часть Индии, Мексиканское нагорье) и опусканий (море Банда) мы имеем дело со сжатием и расширением глубинного вещества.

Эти два вывода можно согласовать, предположив, что основной причиной вертикальных движений является сжатие или расширение вещества, а в дальнейшем параллельно с денудацией поднятий и переотложением вещества во впадинах вступает в действие и компенсирующее перетекание глубинного вещества. Конечно, эти два процесса могут идти параллельно.

Наконец, причиной вертикальных (не колебательных) движений может быть разгрузка эродируемых областей и нагрузка районов седиментации по схеме, аналогичной прогибу и подъему областей оледенения.

Конечно, близость к состоянию равновесия больших блоков коры указывает на то, что изостатический фактор "работает", но он, видимо, имеет в жизни коры лишь

второстепенное значение и притом не активное. Вся же сложная гамма движений коры и сложность ее структуры возникают под действием иных причин и вопреки стремлению к равновесию.

Редукции силы тяжести [Грушинский, 1976, с. 242-278]

Смысл введения редукций. В 1849 г. Стокс поставил и решил принципиально новую в теории потенциала задачу об определении формы поверхности и внешнего потенциала силы тяжести. Эта задача устанавливает единственность построения потенциала силы тяжести на поверхности Земли и во внешнем пространстве, независимо от распределения масс, при условии, что за поверхность Земли принята уровенная поверхность, *целиком охватывающая эти массы*. В общем виде, т.е. для любой произвольной поверхности, проблема Стокса не решена до сих пор [Шимбирев, 1975, с. 8].

В главе 2 был описан геоид (близкий эллипсоиду вращения), который наилучшим образом соответствует истинной фигуре Земли. Однако если в качестве уровенной поверхности рассматривать геоид (или эллипсоид вращения), то неизбежно остаются массы, выступающие за поверхность геоида, например, континенты. Операция устранения выступающих за уровенную поверхность масс получила название редукции силы тяжести.

Аномалии силы тяжести. Разность между наблюдаемым ускорением силы тяжести g и нормальной величиной γ_0 , полученной по международной формуле нормальной силы тяжести, принятой в 1971 г. в Москве:

$$\gamma_0 = 978,0318(1 + 0,0053024\sin^2\varphi - 0,0000059\sin^2 2\varphi),$$

где φ - широта, называется аномалией силы тяжести Δg :

$$\Delta g = g - \gamma_0. \quad (6.4)$$

Аномалии силы тяжести создаются главным образом неоднородным распределением плотностей в земной коре и верхней мантии. Однако чтобы выявить эту неоднородность, простого вычитания из наблюдаемой силы тяжести нормальной составляющей оказывается недостаточно. Дело в том, что величина силы тяжести зависит от целого ряда факторов, в первую очередь, от географической широты и высоты места (относительно уровня моря), рельефа окружающей местности, характера плотностных неоднородностей в верхних слоях Земли под точкой наблюдения и др. Для исключения влияния этих факторов в наблюдаемое значение Δg вводят поправки или, как их еще называют, редукции. Название редукции определяет название аномалии силы тяжести.

Существует большое количество возможностей редукции: метод инверсий, поправка за рельеф местности, поправка Прея, топографическая поправка, изостатическая редукция, редукция конденсации и другие. Подробнее остановимся на редукциях (аномалиях) Фая и Буге, которые рассмотрим в соответствии с данными работ [Магницкий, 1965, с. 230; Орленок, 2000, с. 95-96].

Поправка за высоту. Аномалия в свободном воздухе (аномалия Фая). При проведении гравиметрических наблюдений на земной поверхности точки наблюдения, как правило, располагаются выше уровня моря. Для того чтобы наблюдаемые значения силы тяжести могли быть сопоставимы между собой, их приводят к уровню моря, вводя поправку «за высоту». Смысл этой поправки заключается в следующем.

Сила тяжести на уровне моря определяется из известного выражения:

$$g = GM / R^2.$$

Если же точка наблюдения расположена на некоторой высоте H от уровня моря, то ее притяжение определится выражением:

$$g_1 = GM / (R + H)^2 .$$

Сила тяжести изменится на величину:

$$\delta g_1 = g - g_1 = GM \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{(R + H)^2} \right) = \frac{GM}{R^2} \left[1 - \left(1 + \frac{H}{R} \right)^{-2} \right] .$$

Разлагая выражение в круглых скобках по биному Ньютона и, ограничиваясь первым членом разложения, получим:

$$\delta g_1 = 2GMH / R^3 \approx 2gH / R .$$

Подставляя средние для всей Земли значения $g = 980,6 \text{ гал}$ и $R = 6371,2 \text{ км}$ получим:

$$\delta g_1 = 0,3086H ,$$

где высота H измеряется в метрах.

Получено выражение для нормального вертикального градиента силы тяжести для не вращающейся Земли. Точное выражение этого градиента получим с учетом потенциала центробежного ускорения $2\omega^2 H$. Например, для $H = 1000 \text{ м}$ величина

$$2\omega^2 H = 1,058 \cdot 10^{-8} (\text{сек}^{-2}) \cdot 10^3 (\text{м}) \approx 1 \text{ мгал} .$$

Важность учета этой поправки очевидна, особенно для сильнопересеченной местности. В общем случае для величины поправки за высоту получаем выражение:

$$\delta g_1 = 0,3086H + 2\omega^2 H .$$

Полученная формула характеризует нормальное изменение силы тяжести с высотой. С учетом полученной поправки за высоту можно вычислить аномалию силы тяжести в свободном воздухе как разность наблюдаемого и редуцированного к точке наблюдения нормального значения силы тяжести (формула Гельмерта или Кассиниса):

$$\Delta g_1 = g - \gamma_0 + 0,3086H . \quad (6.4)$$

Получаемая по формуле (6.4) аномалия называется аномалией в свободном воздухе или аномалией Фая.

Следует отметить, что при введении поправки за свободный воздух, влияние масс (плотностных неоднородностей), лежащих между уровнем точки наблюдения и уровнем моря, не учитывается. Однако на самом деле между уровнем наблюдения и уровнем моря залегают породы, обладающие определенной плотностью. Наличие таких пород увеличивает наблюдаемое значение силы тяжести, и чем выше точка отстоит от уровня моря, тем больше их влияние. Этот эффект наиболее ощутим при наблюдениях в горной местности. На равнине редукция за высоту будет постоянна.

Таким образом, аномалия в свободном воздухе отражает суммарное влияние плотностной неоднородности горных пород и влияние дополнительных масс, вызванное

рельефом. Поэтому в условиях расчлененного рельефа с большим перепадом высот (порядка нескольких сотен метров) аномалия в свободном воздухе в значительной степени будет отражать топографию, в то время как гравитационный эффект плотностных неоднородностей верхних этажей геологического разреза Земли будет замаскирован. Исключение, как уже отмечалось, составляют равнинные участки с небольшими перепадами рельефа. В этих условиях аномалия в свободном воздухе может быть использована для изучения глубинной структуры.

Представляют определенный интерес данные рис. 6.4, на котором представлены усредненные по достаточно большим ($5^0 \cdot 5^0 \approx 500 \text{ км} \cdot 500 \text{ км}$) участкам поправки Фая. Как видно из данных, представленных на этом рисунке, значения аномалий Фая, определенные для мест, расположенных практически во всем земном диапазоне высот (от -6000 м до $+4000 \text{ м}$), в основном, не выходят за пределы $\pm 50 \text{ гал}$ и огромное число аномалий вообще равно нулю. Эти данные указывают на то, что площадки с достаточно большой площадью являются уже достаточно скомпенсированными [Магницкий, 1965; с. 227-229].

Однако такой достаточно «грубый» способ усреднения может исключить из рассмотрения интересные с точки зрения геофизики и геодинамики динамические структуры, например, зоны подвига, в которых величины аномалий Фая могут варьировать в пределах от -200 до $+150 \text{ мгал}$.

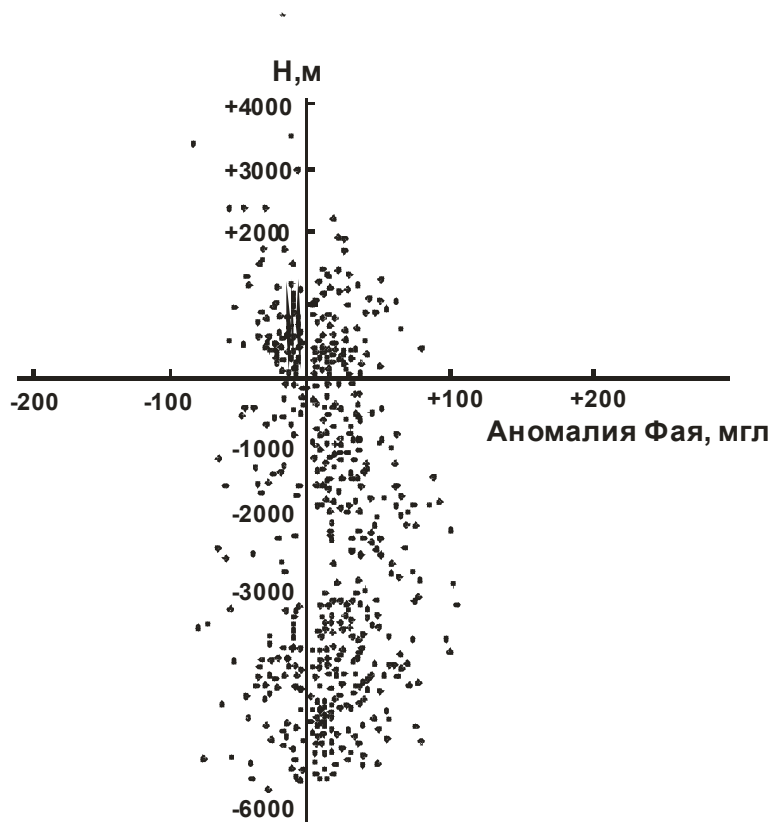


Рис. 6.4. Значения поправок в свободном воздухе для аномалий гравитационного поля. Поправки осреднялись по 5^0 площадкам как функции таким же образом осредненных высот.

Поправка за притяжение промежуточного слоя. Аномалия Буге. Для определения влияния плотностных неоднородностей между уровнем наблюдения и уровнем моря достаточно вычислить силу притяжения диска толщиной H , бесконечного радиуса и плотностью ρ [Орленок, 2000; с. 95-96; Магницкий, 1965; с. 230]:

$$g = 2\pi G \rho H . \quad (6.5)$$

Полученное выражение показывает, что сила притяжения бесконечного диска не зависит от расстояния точки до диска, а зависит от массы слоя (ρH). Подставляя значение гравитационной постоянной $G = 6,6732 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}$, получим:

$$g = 0,0418 \rho H.$$

Это и есть редукция Буге, характеризующая притяжение слоя H , имеющего плотность ρ . Величина

$$\Delta g_2 = g - \gamma_0 + 0,308H - 0,0418 \rho H \quad (6.6)$$

называется аномалией Буге. При измерениях на море вследствие $H = 0$ аномалия (6.6) приобретает вид:

$$\Delta g_2 = g - \gamma_0.$$

Так как в аномалии Буге исключен эффект топографических аномалий, то они, в основном, обусловлены эффектом внутренних аномальных масс. Как следует из предыдущего, основными внутренними возмущающими факторами являются отклонения границ слоев от горизонтального положения и в первую очередь рельеф подошвы коры - поверхности Мохоровичича, где происходит наибольший перепад плотностей (около $0,4 \text{ г/см}^3$, см. рис. 5.2). Таким образом, можно ожидать, что между Δg_2 и глубиной M залегания поверхности Мохоровичича может существовать ясно выраженная зависимость. Такую зависимость Δg_2 для областей, для которых M известна по сейсмическим данным, можно найти статистически.

Опыт определения такой зависимости для Земли в целом дан на рис. 6.5:

$$M = 35(1 - \text{th}(0,0037 \Delta g_2)).$$

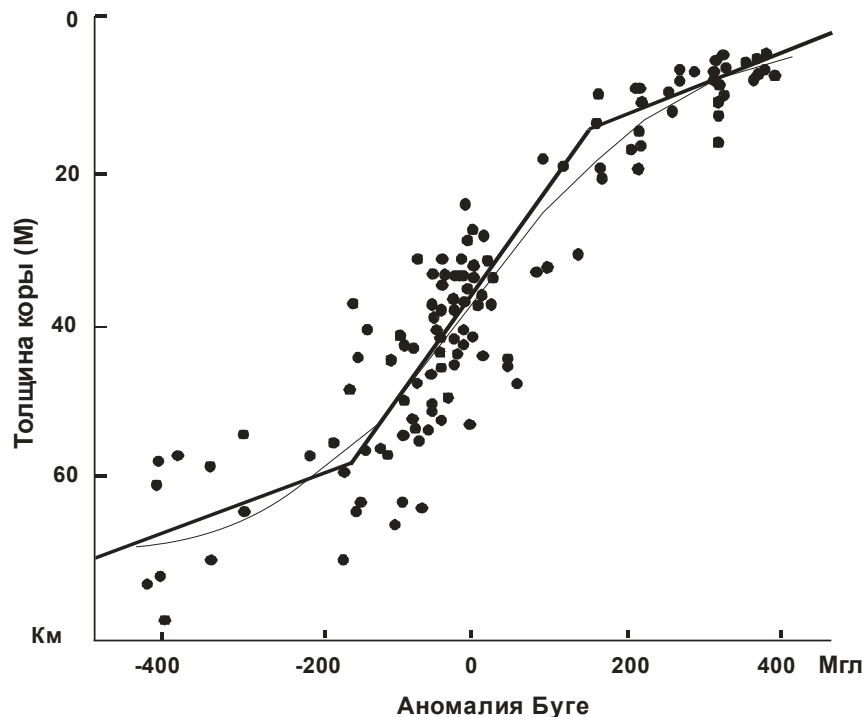


Рис. 6.5. Иллюстрация существования связи между аномалией Буге и толщиной земной коры.

На рис. 6.3 приведен разрез земной коры по 40° с. ш., полученный по описанной методике с использованием данных о величинах аномалии Буге.

К сожалению, полученная статистическая формула не имеет ясного физического смысла. Из формулы (6.5) и основных теоретических предпосылок следовало ожидать линейной зависимости M от Δg_2 . Действительно, если аномалии вызваны изменением M при разнице плотностей $\Delta\rho$ на границе раздела, то в пределах применимости формулы для плоско-параллельного слоя (6.5) можно написать:

$$M = M_0 - \Delta g_2 / 2\pi G \Delta\rho. \quad (6.7)$$

Так как строение коры (число слоев и разности плотностей) различно на континентах, океанах и в переходных областях, то следует ожидать, что коэффициенты при Δg_2 в (6.7) и M_0 будут различны для основных типов земной коры. В этом случае более обоснованно заменить кривую на рис. 6.5 ломаной линией, каждое звено которой отвечает особому типу коры.

О моментной природе волн геоида

Итак, в этой главе было сформулировано два важных вывода. Во-первых, вывод о значительных по величине касательных напряжениях в нижней мантии, который, по сути, является следствием равенства всех моментов разложения потенциала силы тяжести I_n при $n \geq 3$. Во-вторых, вывод о существовании планетарного по масштабу механизма, который «управляет» состоянием вещества внутри Земли. Ясно, что оба эти вывода взаимосвязаны уже хотя бы потому, что они являются следствием одной причины – отклонения Земли от состояния гидростатического равновесия. Представляется, что физика такой взаимосвязи и определяет природу волн геоида, что вытекает из аналогии между моментами I_n (6.2) [(6.3)], с одной стороны, и комбинационными упругими волнами в линейных [нелинейных] твердых телах – с другой. Действительно, в линейных средах взаимодействие между упругими волнами отсутствуют (являются малыми) и можно принять, что амплитуды образующихся гармоник как функции их номеров n убывают достаточно быстро в соответствии с законом, близким (6.2). В случае же распространения волн в нелинейных средах амплитуды появляющихся гармоник уже не являются малыми и могут изменяться по закону, близкому (6.3). Физика такого линейно-нелинейного упругого взаимодействия в твердом теле заключается в следующем.

Теория упругих колебаний (основы которой изложены в главе 4) является приближенной в том смысле, в каком приближенна вообще вся теория упругости, основанная на законе Гука (4.18). Напомним, что в ее основе лежит разложение упругой энергии в ряд по степеням тензора деформации, причем оставляются члены до второго порядка включительно. Соответственно этому компоненты тензора напряжений оказываются линейными функциями компонент тензора деформации (4.17), и уравнения движения (4.28) – (4.31), (4.34) – линейны.

Согласно [Ландау, Лифшиц, 2003, с. 152-155], наиболее характерной особенностью упругих волн в этом приближении является то, что всякую волну можно представить в виде простого наложения, т.е. в виде линейной комбинации отдельных монохроматических волн. Каждая из этих монохроматических волн распространяется независимо от остальных и может существовать также и сама по себе, не сопровождаясь какими-либо посторонними движениями. Можно сказать, что различные монохроматические волны одновременно распространяются в одной и той же среде «не взаимодействуя» друг с другом.

Все эти свойства, однако, исчезают при переходе к следующим приближениям. Эффекты следующих приближений хотя и являются малыми, но для некоторых явлений

могут играть основную роль. Эти эффекты обычно называют *ангармоническими* в связи с тем, что соответствующие уравнения движения нелинейны и не допускают простых периодических (гармонических) решений.

Рассмотрение ангармонических эффектов третьего порядка, происходящих от кубических по деформации членов в упругой энергии, приводит к тому, что на совокупность основных монохроматических волн (с частотами $\omega_1, \omega_2, \dots$ и волновыми векторами $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \dots$) налагаются некоторые «волны» слабой интенсивности с комбинационными частотами вида $\omega_1 \pm \omega_2$ и волновыми векторами $\vec{k}_1 \pm \vec{k}_2$.

Ясно, что возможны такие подборы значений $\omega_1, \vec{k}_1$ и $\omega_2, \vec{k}_2$, $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ и $\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3$ (для определенности будем говорить о суммах), для которых в результате эффекта ангармоничности и явления резонанса возникает новая настоящая монохроматическая волна $\omega_3, \vec{k}_3$ с *немалой* амплитудой.

Как известно, Земля является сильно нелинейной средой, в которой возможны ангармонические эффекты, приводящие к появлению комбинационных частот типа I_n с амплитудами, изменяющимися по закону (6.3). Более того, разложение гравитационного потенциала на нормальное (2.8) и аномальное (6.1) поля и переход от линейной к нелинейной теории упругости осуществляется с использованием одного и того же «энергетического» приема. Это показывает, что используемая выше при анализе аналогия между поведением упругих волн в твердом теле, с одной стороны, и гармониками I_n в Земле – с другой, опирается на одни и те же законы механики и, следовательно, является физически обоснованной.

Таким образом, результаты, полученные на основании проведенного сравнительного анализа, позволяют предположить, что волны геоида - как планетарного масштаба процесс, регулирующий амплитуды высших гармоник гравитационного потенциала в соответствии с законом (6.3), имеют *моментную природу*. В геодинамику такой планетарный моментный волновой процесс самым естественным образом мог бы быть введен в рамках вихревой задачи Дирихле [Викулин, 2005; Кондратьев, 2003; Милановский, 2007].

В общей геодинاميке, в рамках концепции «живой» Земли [Гольдин, 2002; Михаил, 2004, с. 242-245] вывод о существовании фундаментальных волн геоида не является неожиданным и может рассматриваться в рамках одной проблемы в совокупности с другими глобальными планетарными и/или космическими процессами. Например, с дрейфом фокусов магнитного поля в западном направлении (см. следующую главу 7), с ротационным структурообразованием [Тяпкин, 1998], с самогравитацией протосолнечного облака «горячей» [Кузнецов, 2008] или «холодной» [Сафронов, Витязев, 1983; Шмидт, 1960] Земли и с другими глобальными процессами, протекающими как на Земле и в Солнечной системе, так и в Галактике [Милановский, 2007; Николаев, 2003; Пущаровский, 2005, с. 191-336; Садовский, 2004, с. 406-419; Хаин, Ломизе, 2005, с. 546-553; Хаин, Короновский, 2007, с. 216-229].

Литература

- Ботт М.* Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 376 с.
- Викулин А.В.* Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2005. № 2. Выпуск № 6. С. 86-95.
- Гольдин С.В.* Физика «живой» Земли // Проблемы геофизики XXI века. Кн. 1 / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003. С. 17-36.
- Грушинский Н.П.* Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976. 512 с.
- Демьянов Г.В., Назарова Н.Г., Майоров А.Н. и др.* Мировая карта высот квазигеоида. М.: ЦНИИГАиК, 1996.
- Джеффрис Г.* Земля, ее происхождение, история и строение. М.: Изд-во Иностранной лит-ры, 1960. 485 с.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Жарков В.Н., Паньков В.Л., Калачников А.А., Оснач А.И.* Введение в физику Луны. М.: Наука, 1969. 312 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
- Кондратьев Б.П.* Теория потенциала и фигуры равновесия. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 624 с.
- Кузнецов В.В.* Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 367 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Физматлит, 2003. 264 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
- Милановский Е.Е.* (ред.). Ротационные процессы в геологии и физике. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.
- Михаил Александрович Садовский.* Очерки, воспоминания, материалы / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2004. 271 с.
- Николаев А.В.* (ред.). Проблемы геофизики XXI века. Кн.1. М.: Наука, 2003. 311 с.
- Орленок В.В.* Основы геофизики. Учебное пособие. Калининград: КГУ, 2000. 448 с.
- Пуцаровский Ю.М.* Избранные труды. Тектоника Земли. Этюды. Т. 1. Тектоника и геодинамика. М.: Наука, 2005. 350 с.
- Садовский М.А.* Избранные труды. Геофизика и Физика взрыва / Ред. В.В. Адушкин. М.: Наука, 2004. 440 с.
- Сафронов В.С., Витязев А.В.* Происхождение солнечной системы // Итоги науки и техники. Астрономия. Т. 24. М.: ВИНТИ, 1983. С. 5-93.
- Стейси Ф.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. 343 с.
- Тяпкин К.Ф.* Физика Земли. Учебник. Киев: Вища школа, 1998. 312 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
- Хаин В.Е., Короновский Н.В.* Планета Земля от ядра до ионосферы. М.: КДУ, 2007. 244 с.
- Шимбирев Б.П.* Теория фигуры Земли. М.: Недра, 1975. 432 с.
- Шмидт О.Ю.* Избранные труды. Геофизика и космогония. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 210 с.

7. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Геомагнетизм и физика Земли. История развития представлений о магнитном поле Земли и магнитных явлениях. Элементы геомагнитного поля. Магнитные поля планет. Методы исследования магнитного поля Земли. Миграция полюсов. Вариации значений геомагнитного поля. Вековые вариации магнитного поля Земли. Главное магнитное поле Земли. Аномалии магнитного поля. Палеомагнетизм. Новая глобальная тектоника. Происхождение главного магнитного поля Земли. Электрические эффекты. Электромагнитное зондирование. Система токовых контуров в ядре Земли как самоорганизованная система.

Геомагнетизм и физика Земли

Магнитные поля широко распространены во Вселенной [Трухин, Показеев, Куницын, Шрейдер, 2004, с. 41]. Магнитные поля имеют Солнце, другие звезды, облака плазмы, перемещающиеся в космическом пространстве. Магнитные поля обнаружены у большинства планет и некоторых спутников.

Магнитное поле Земли играет исключительно важную роль в жизни нашей планеты: оно регулирует в основном солнечно-земные взаимодействия, его силовые линии защищают поверхность Земли от проникновения от Солнца и из космоса частиц высокой энергии, оно пронизывает всю земную твердь, океан и атмосферу, оказывает большое влияние на живую и неживую природу, намагничивает горные породы и почвы, оказывает большое влияние на плодородие. Чрезвычайно важную роль магнитное поле сыграло в развитии человеческой цивилизации: с начала развития мореплавания оно служило уникальным ориентиром для моряков и в наши дни продолжает оставаться ориентиром морской, воздушной, подводной и спутниковой навигации. Именно с развитием мореплавания связано становление геомагнетизма как науки, отсчет начала развития которой ведется с открытия Х. Колумбом магнитного склонения.

Природа магнитного поля Земли остается неизвестной, несмотря на многолетние и многочисленные усилия исследователей многих стран [Кузнецов, 2008, с. 159]. Как известно, эта проблема считается проблемой «номер 1» в физике Земли. Некоторые авторы работ по геомагнетизму утверждают, что А. Эйнштейн относил решение задачи генерации геомагнитного поля к одной из пяти главных проблем физики. Ясное понимание природы земного магнетизма автоматически решило бы многие вопросы. Например, такие как: внутренне устройство Земли, природа источника ее теплового потока, причины движения материков и плит, причины возникновения и исчезновения магнитного поля на Луне и спутниках Юпитера Ио и Ганимеде, синхронизм явлений в геомагнетизме и тектонике и т.п. Геомагнитное поле нельзя рассматривать вне контекста общей модели Земли и планет, так как вряд ли природа геомагнетизма отличается от физики магнетизма других планет и спутников Солнечной системы. Принято считать, что геомагнитное поле взаимосвязано с тепловым потоком и геодинамикой вообще. Очевидно, что модель магнитного поля Земли должна включать связь с этим явлением. Модель магнитного поля Земли должна объяснять весь широкий спектр явлений геомагнетизма: инверсии, экскурсы, джерки, дрейф магнитных полюсов и фокусов векового хода и т.д.

История развития представлений о магнитном поле Земли и о магнитных явлениях

Наряду с астрономией и геодезией, наука о магнитном поле Земли (геомагнетизме) имеет наиболее длинную историю развития.

Для человека магнитное поле и представления о его природе – это, прежде всего, магнитное поле самой Земли, проблема генерации которого не решена до настоящего времени. Первые значительные успехи в решении проблемы происхождения геомагнитного поля, которые, как казалось, имели место в середине 20 в., а некоторыми исследователями продолжают отстаиваться и до настоящего времени (Григорьев, Григорьева, Ростовский, 2003, с. 9), не оправдали себя [Кузнецов, 2008, с. 159-161]. Поэтому *все* данные о магнетизме вообще, так или иначе, могут иметь прямое и самое непосредственное отношение к проблеме и магнитного поля Земли. В изложении материала этого раздела будем придерживаться исторического обзора в работах [Яновский, 1953, с. 9-19, Яновский, 1963, с. 7-10; 1964, с. 8-22].

Явление магнетизма известно людям давно. Свое название оно получило от города Магнетии в Малой Азии, где были обнаружены залежи магнитного железняка – «камня, притягивающего железо» [Лишевский, 1988].

1000 л. до н.э. - китайцам по праву принадлежит приоритет открытия основных свойств магнетизма и изобретение компаса. По свидетельству китайских летописей, явление полярности магнита и применение компаса были известны в Китае более чем за 1000 лет до н.э. Так, китайский историк *Су-Ма-Тзян*, живший в первом столетии до н.э., рассказывая о приеме в 1100 г. до н.э. китайским императором Чеу-Куном послов Вьетнама, пишет, что «Чеу-Кун подарил им пять дорожных колесниц, устроенных так, что они всегда указывали на юг». Указателем служила вытянутая рука фигуры человека, прикрепленного к колеснице.

Согласно [Хмелевской, 2007, с. 42] магнитное поле было обнаружено в Китае 4000 лет назад.

Согласно [Дорфман, 2007а, с. 24], явление притяжения железа и железной руды естественно намагниченными кусками магнетита китайцам стало известно «всего лишь» в 6 в. до н.э. Позднее они обратили внимание на способность естественных магнитов ориентироваться, ошибочно приписав эту способность воздействию звезд. Из этих наблюдений выросли приемы гаданий на особом приборе (прообразе компаса).

7 в. до н.э. - грекам хорошо были известны свойства притяжения магнита. Так, например, *Фалес Милетский* (625-547 до н.э.) – первый из семи древнегреческих мудрецов, ссылаясь на свойства магнита и янтаря [Диоген, 1979, с. 69-71].

121 г. н.э. - первое письменное указание на свойства полярности магнита в китайском словаре.

10-11 вв. - в различных работах китайских авторов отмечалось, что стрелка, натертая магнитным камнем, показывает не точно на юг, а отклоняется несколько к западу.

11 в. - примерно за сто лет до появления компаса в Европе, китайцами был создан компас со стрелкой, необходимость которой была установлена эмпирическим путем [Дорфман, 2007а, с. 24].

11-12 вв. - компас стал использоваться в Европе и Китае для нужд навигации, главным образом в мореплавании [Хмелевской, 2007, с. 42].

1190 в. - опубликовано сочинение английского монаха *Александра Некхема* «De naturis rerum» (О природе вещей), из которого узнаем: «Моряки во время плавания, когда не могут ориентироваться по Солнцу, ..., пользуются свободно вращающейся стрелкой, один конец которой показывает на север». Компас уже считается общеизвестным прибором [Дорфман, 2007а, с. 111].

13 в. - самым ранним европейским трактатом о магните и его свойствах является письмо французского ученого *Пьера де Марикура* (по прозванию Перегин) к рыцарю Сигеру де Фукокур, датированное 12 августа 1269 г. В этом сочинении автор подробно излагает свойства магнитного камня, дает указание как находить у него полюса и намагничивать посредством него железную иглу. В отличие от древних китайцев, считавших, что стрелка компаса поворачивается к Полярной звезде, де Марикур пишет,

что «на самом деле она поворачивается к полюсу и направляется самим земным шаром» [Дорфман, 2007а, с. 111, 219]. Конец стрелки, указывающей на север, де Марикур предложил назвать северным полюсом, а противоположный конец – южным.

Главной заслугой *Пьера де Марикура* является усовершенствование компаса, который он соединил с морской астролябией, снабдив его градуированной шкалой и базисной линией, чтобы дать возможность морякам не только управлять кораблем, но и определять азимуты небесных светил. Содержание письма де Марикура было неизвестно широким кругам до 16 в.

1302-1318 гг. - изобретение морского компаса в современном виде приписывают итальянцу *Флавио Жиойя*, который поместил компасную стрелку на острие, как это имеет место в современных компасах, и снабдил ее бумажным кругом, разделенным на 32 части, известные под названием «розы ветров» или румбов.

1492 г. - во время плавания *Колумба* через Атлантический океан штурман корабля, определив азимут Солнца, нашел, что за четыре дня плавания стрелка изменила свое направление на целое деление компаса - на 12^0 . Колумбу пришлось пойти на определенную хитрость, чтобы предотвратить смуту и продолжить плавание. Измерения, проведенные по возвращению, показали, что компас исправен и стрелка, как и до начала плавания, показывает точно на север.

Таким образом, к концу 15 века в Европе стало известно два факта: во-первых, магнитная стрелка компаса отклоняется от географического меридиана и, во-вторых, величина такого отклонения меняется от места к месту. Эти первые наблюдения за значительными отклонениями стрелки компаса во время плавания Колумба, фактически, и явились открытием явления, называемого *магнитным склонением*, и, как следствие, послужили толчком к развитию науки о земном магнетизме.

1510 г. - *Георгу Гартману* из Нюрнберга, мастеру, изготавливавшему компасы и солнечные часы и впервые определившему склонение в Риме, по-видимому, принадлежит открытие *магнитного наклона*. Но сообщил об этом он только в 1544 г. в своем письме графу Альберту Прусскому, в котором он писал, что «магнит не только отклоняется к востоку приблизительно на 9^0 , но также и наклоняется к низу».

1538 г. - *Жан де Кастро* была выполнена первая обширная серия тщательно сделанных наблюдений магнитного склонения на море при его переезде из Англии в восточную Индию.

1581 г. - английский моряк-гидрограф *Норманн* опубликовал свои измерения и высказал впервые мысль о том, что причина, вследствие которой стрелка компаса устанавливается по определенному направлению, находится внутри Земли, а не связана с Полярной звездой, как полагали раньше.

Норманном же было экспериментально доказано, что магнит в земном поле испытывает *только вращательные движения*.

1585 г. - *Борроу* в Англии опубликовано первое сочинение о магнитном склонении. К концу 16 в. определения склонения были произведены почти для сотни пунктов, расположенных в различных частях земного шара, в том числе и в России. Так, в 1556-1557 гг. были определены склонения в устье р. Печеры, на Новой Земле, на о. Вайгач и в г. Холмогорске, а в 1580 г. в гг. Астрахань и Дербент.

1600 г. - выход в свет книги придворного врача английской королевы и, как бы сейчас сказали, физика по совместительству *У. Гильберта* (Gilbert, 1544-1603) на латинском языке «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле». В этой книге впервые дается теоретическое представление о причинах земного магнетизма, которое и до настоящего времени не утратило своего значения. Гильберт высказывает утверждение, что Земля представляет собою намагниченное тело, полюсы которого совпадают с географическими полюсами, и подтверждает свое утверждение опытами со специально изготовленными намагниченными шарами. Для объяснения склонения,

которое противоречило его теории, Гильберт выдвинул предположение о намагниченности материков, которые производят действие на стрелку.

Фундаментальное значение теории Гильберта состояло в том, что окончательно была установлена связь магнитного поля Земли с земным шаром и, следовательно, причину земного магнетизма следует искать *не вне, а внутри Земли*.

Однако еще достаточно продолжительное время продолжали появляться объемистые тома, посвященные «чудесным» действиям магнитов. Попытки объяснения магнитных явлений в ту эпоху продолжали носить мистический характер, например, притяжение железа к магнитному камню объясняли «симпатией» и Гильберт, отвергая подобную мистику, называет ее «бредом вздорной старухи». Гильберт представляет себе магнитное взаимодействие как своеобразное действие на расстоянии [Дорфман, 2007а, с. 220].

1611 г. - «официальное» открытие пятен на Солнце. Однако до этого момента пятна на Солнце неоднократно отмечались исследователями и наблюдателями.

1634 г. - *Генри Геллибранд* произвел повторное после Барроу и Норманна в 1580 г. определение склонения в Лондоне и показал, что склонение претерпело настолько значительные изменения, что его нельзя объяснить ошибками измерений. Таким образом, установлен факт существования эффекта «вековых вариаций».

1644 г. - *Р. Декарт* в «Началах философии» попытался усовершенствовать античную трактовку магнитных явлений с помощью наглядной «обменной» модели. Он предположил, что вокруг всякого магнита происходит циркуляция встречных потоков мельчайших винтообразных частиц с противоположной резьбой. Эти мчащиеся частицы, которыми обмениваются два магнита, вытесняют воздух, заключенный в промежутке между ними, и тем самым способствуют их взаимному сближению, т.е. притяжению. С помощью таких модельных механических представлений Декарту удалось объяснить большую часть известных в ту пору магнитных явлений. Благодаря своей кажущейся наглядности эта теория получила широкое распространение и считалась принятой не только в 17 в., но и на протяжении почти всего 18 столетия [Дорфман, 2007а, с. 220].

1681 г. - *Робертом Норманном* показано, что все линии равных наклонений отчетливо сходятся в двух ранее неизвестных точках на Земле, являющихся, как и полагал ранее Пьер де Марикур, магнитными полюсами. Тем самым, была подтверждена догадка известного геодезиста и картографа *Г. Меркатора* (1540-1603) о том, что земной шар является не намагниченным телом, как полагал Гильберт, а природным магнитом [Дорфман, 2007а, с. 219].

1682 г. - *Гуи Ташаром* при наблюдении склонения в г. Луво в Сиаме установлены суточные вариации склонения.

1722 г. - часовых дел мастером *Грэхэмом* путем проведения в течение дня около сотни измерений было подтверждено наличие суточных вариаций склонения. В этом же году суточные вариации были подтверждены профессором *Цельсиусом* в Упсале (Швеция), после чего суточные изменения магнитного склонения стали очевидным фактом.

Позднейшие наблюдения обнаружили существование и вариаций наклона.

18 в. - физика превращается в самостоятельную, самодавящую науку [Дорфман, 2007а, с. 263]. В магнетизме это приводит к переносу «центра тяжести» с обслуживания целей мореплавания, что превалировало в 15-17 вв., к количественным измерениям и пониманию природы явления.

1744 г. - появляется работа *Л. Эйлера*. В этой работе намечается отход от принятых большинством воззрений Декарта и отмечается, что «все магнитные явления обусловлены механической или материальной причиной, которую следует искать одновременно во внутренней структуре магнита и материи, существующей вне его» [Дорфман, 2007а, с. 303].

Л. Эйлером в теории упругости применительно к понятию потенциальной энергии вводится термин «*vis potentialis*», явившийся прообразом одного из основных понятий современной физики – потенциала [Дорфман, 2007б, с. 26].

1745 г. - *Г.В. Рихман* (1711-1753), соратник *М.В. Ломоносова*, в Петербурге сконструировал первый в истории электроизмерительный прибор - «электрический указатель», по углу отклонения нити которого можно было фактически измерять электрическую силу. Отметим, что первый мемуар *О. Кулона* «экспериментальное определение закона, по которому элементы однородно наэлектризованных тел отталкиваются» появился лишь через 40 лет в 1785 г. [Дорфман, 2007а, с. 285].

1752 г. - одним из первых, настойчиво утверждавших, что «магнетизм не что иное, как действие электрической материи», был французский ботаник *д'Алибар* [Дорфман, 2007а, с. 309].

1759 г. - *М.В. Ломоносов* в своем труде «Рассуждение о большой точности морского пути» дал решение ряда вопросов, относящихся к земному магнетизму.

До Ломоносова существовало представление о магнитном поле как о поле одного магнита, имеющего два полюса. Ломоносов впервые высказал предположение о структуре земного шара как тела, состоящего из мельчайших разнородно намагниченных частичек, которые в совокупности образуют неоднородно намагниченный шар, чем и объясняется неодинаковость склонения в различных частях земного шара. Этим он предвосхитил идею Гаусса о произвольном намагничивании земного шара.

Для проверки этих предположений Ломоносов рекомендует устройство постоянных пунктов (обсерваторий) на суше и проведение систематических наблюдений в море на кораблях. Эта мысль Ломоносова была осуществлена лишь через 60 с лишним лет.

1760-1770 гг. - *Ф.У.Т. Эпинус* академик Петербургской академии наук разрабатывает свою теорию магнетизма в рамках модели магнитной жидкости. «Я свожу все явления магнита к одному началу, ... я объясняю их некой жидкостью, частицы которой отталкивают друг друга, но притягиваются железом». Т.о. Эпинус впервые ввел в физику формальную ньютоновскую трактовку действия магнитного поля [Дорфман, 2007а, с. 288, 304-305].

1770 г. - *О. Кулон* приходит к выводу о необходимости существования магнитных сил притяжения и отталкивания и ставит соответствующие эксперименты [Дорфман, 2007а, с. 306].

1784-1785 г. - *О. Кулон* вновь экспериментально подтверждает свой результат 1770 г., опровергающий гипотезу Эйлера о потоках магнитной жидкости и впервые устанавливает квадратичную зависимость величины «магнитной силы» от расстояния между точечными зарядами [Дорфман, 2007а, с. 308].

1785 г. - *О. Кулон* находит метод измерения вращательного момента. Тем самым появилась возможность для разработки метода измерения напряженности магнитного поля. Первый такой метод был предложен самим Кулоном и нашел сразу же широкое применение в различных экспериментах при производстве магнитных измерений. Метод Кулона состоял в определении периода качания магнита и поэтому мог дать лишь относительные значения напряженности поля.

Конец 18 – начало 19 вв. - в области физики магнетизма достигнуты значительные практические успехи в отношении методики намагничивания постоянных магнитов. Открыт закон взаимодействия точечных магнитных полюсов. В области теории господствует представление о невесомых флюидах [Дорфман, 2007а, с. 346].

Возникает необходимость организации непрерывных наблюдений за вариациями компонент магнитного поля на специально построенных магнитных обсерваториях. Первые такие обсерватории появились в двадцатых годах 19 в. и в России и в Западной Европе.

1802 г. - физик-любитель адвокат *Джан Доменико Романьози* (1761-1835) наблюдал намагничивание стальной иглы гальваническим током от вольтовой батареи [Дорфман, 2007а, с. 309].

1820 г. - английский физик *П. Барлоу* (1776-1862) выпустил книгу «Очерк магнитных притяжений», в которой наряду с изложением опытов Эрстеда, Дэви, Ампера и Фарадея подробно описывает собственные разнообразные эксперименты по получению непрерывного вращения с помощью магнитов и проводников с током. В результате был создан первый прототип электромагнитного двигателя, машины, превращающей электрическую энергию в механическую [Дорфман, 2007б, с. 53].

1812-1828 гг. - работами *С.Д. Пуассона* и *Дж. Грина* (1793-1841) теория электрических и магнитных жидкостей позволила довести электростатику и магнитостатику до того завершающего предела, который допускает представления, оставшиеся в наследство от 18 в. Эта теория вошла в современную науку в качестве одного из фундаментальных ее приближений [Дорфман, 2007б, с. 25-27].

Первая половина 19 в. - появляются классические работы профессора *И.М. Симонова* (1794-1855) и академика *А.Я. Купфера* (1799-1865), в которых основные идеи Ломоносова претворяются в жизнь. Авторы этих работ и не подозревали, что эти идеи в свое время были высказаны М.В. Ломоносовым.

1825 г. - выход в свет работы *А.Я. Купфера*, в которой устанавливается совершенно новый для того времени факт: одновременность возникновения магнитных бурь в Париже и Казани, отстоящих друг от друга на расстоянии 43° по долготе. Эта работа явилась следствием наблюдений над вариациями склонения, производившихся Купфером совместно с Симоновым в Казани, и послужила стимулом к организации систематических наблюдений над вариациями в различных пунктах земного шара.

1829-1836 гг. - начало организации магнитометрических обсерваторий в России. Купфером в 1829 г. была организована магнитная обсерватория в Петербурге, в 1832 г. по его ходатайству были организованы обсерватории в Нерчинске, Барнауле, Колывани, а в 1836 г. – в Екатеринбурге, которая непрерывно работает *до настоящего времени*.

1835 г. - профессор Казанского университета *И.М. Симонов* опубликовал в «Ученых записках университета» работу «Опыт математической теории земного магнетизма», в которой показал, что магнитное поле Земли, вызванное суммарным действием находящихся внутри нее магнитных частиц, будет тождественно с полем диполя, если допустить, что частицы распределены равномерно.

1839 г. - появление классической работы *К.Ф. Гаусса* (Gauss, 1777-1855) «Напряженность земной магнитной силы, приведенная к абсолютной мере». В этой работе Гаусс дал теоретические основания метода измерения горизонтальной составляющей и абсолютной мере, метода, который до сих пор остается единственным для этих целей, и вместе с этим дал и технику эксперимента, сразу же повысив точность измерений.

Почти одновременно Гаусс опубликовал вторую работу «Общая теория земного магнетизма», в которой, отказываясь от всяких гипотез, ставит совершенно по-иному задачу об интерпретации магнитного поля Земли. Исходя из единственного предположения, что причины земного магнетизма лежат внутри Земли, Гауссу удалось представить магнитный потенциал для любой точки на поверхности земного шара как функцию координат широты и долготы, разложенную в бесконечный ряд по шаровым функциям. Тем самым, оказалось возможным теоретически вычислять потенциал в любой точке земной поверхности. При этом выражение потенциала диполя, данное ранее И.М. Симоновым, совпадает с первым членом в разложении потенциала по Гауссу.

1844 г. - в Казани опубликована работа *И.М. Симонова* «Записки и воспоминания о путешествии по Англии, Франции, Бельгии и Германии в 1842 г.», в которой Симонову принадлежит открытие периодичности вариаций склонения.

Работы *И.М. Симонова* и *К.Ф. Гаусса* положили основание современному представлению о магнитном поле Земли, и их появление надо считать началом

современного этапа науки земного магнетизма. С этого времени начинается быстрое накопление и систематизация материалов о распределении элементов земного магнетизма по поверхности земного шара, создается целый ряд гипотез о происхождении магнитного поля Земли и, наконец, в последнее время получает широкое распространение методы использования магнитных наблюдений для широкого круга практических целей.

1831 г. - *М. Фарадей (Faraday, 1791-1867)*, сопоставив на опыте тепловое, магнитное, химическое, физическое действия и искры от «вольтова электричества», «обыкновенного электричества» (т.е. получаемого посредством электростатической машины), «магнитоэлектричества» (т.е. получаемого при помощи электромагнитной индукции), «термоэлектричества» и «животного электричества» (т.е. получаемого от электрического ската), пришел к выводу: «Все виды электричества идентичны по своей природе» [Дорфман, 2007б, с. 36-37].

Американский физик *Дж. Генри (D. Henry, 1797-1878)* публикует письмо в редакцию «Американского журнала науки и ремесел», в котором описывает электромагнитную машину с возвратно-поступательным движением [Дорфман, 2007б, с. 53].

М. Фарадей открывает явление, получившее название индукции, содержащее теперь представления о «магнитной индукции», или о «магнитном поле» в пространстве, окружающем электрический ток [Дорфман, 2007б, с. 38].

1832 г. - Фарадей получил анонимное письмо, автор которого описывал устройство сконструированной и изготовленной им первой технической модели магнитоэлектрической машины. Фарадей немедленно переслал это письмо в «Philosophical Magazin» для опубликования.

1833 г. - автор письма, не открывая своего инкогнито, прислал дополнительные сведения о своей конструкции – первой динамомашины [Дорфман, 2007б, с. 53-54].

1831 г. - полярным исследователем капитаном *Дж.К. Россом (Ross, 1800-1862)* были впервые определены координаты Северного магнитного полюса: $70^{\circ} 5' N, 96^{\circ} 46' W$.

1904 г. - во время экспедиции *Р. Амундсена (Amundsen, 1872-1928)* координаты Северного магнитного полюса были определены вторично: $70^{\circ} 30' N, 95^{\circ} 30' W$. Оказалось, что Северный магнитный полюс за прошедшие 70 лет переместился по направлению к Северному географическому полюсу в точку, отстоящую от него на 50 км [Кузнецов, 2008, с. 185]. Тем самым была экспериментально доказана миграция (перемещение в пространстве) Северного магнитного полюса.

1909 г. - профессор *Д. Моусон (Mawson, 1882-1958)* во время экспедиции 1907-1909 гг. *Э.Г. Шеклтона (Shackleton, 1874-1922)* на Южный полюс определил координаты Южного магнитного полюса $72^{\circ} S, 155^{\circ} E$ [Кузнецов, 2008, с. 194].

1830-1840-е гг. - *К.Ф. Гаусс (Gauss, 1777-1855)* и *В. Вебер (Weber, 1804-1891)* проводили огромную работу по научному руководству предпринятой в то время выдающимся путешественником и естествоиспытателем *А. Гумбольдтом (Humboldt, 1769-1859)* всемирной съемки магнитного поля Земли.

К.Ф. Гаусс предлагает выражать «интенсивность земной магнитной силы» в абсолютных единицах (сантиметр, грамм, секунда). Как видим, Гаусс последовательно использует для измерения магнитного поля метод, примененный в свое время Ньютоном при количественной оценке гравитационного поля. Поскольку предложенный Гауссом метод оправдал себя на практике, это означает, что механическая форма движения играет существенную роль в макроскопических процессах магнитного взаимодействия.

Для проведения магнитных измерений *В. Вебер* разработал соответствующий «магнитометр» и предложил две системы абсолютных единиц для силы тока: магнитную и электродинамическую.

А. Гумбольдт создает Магнитный союз, первую международную геофизическую организацию, в которой приняли участие научные учреждения почти всех крупнейших государств мира [Дорфман, 2007б, с.45-46].

Середина XIX в. - швейцарский астроном *Рудольф Вольф* (*R. Wolf*, 1816-1896), собрав практически все известные на то время упоминания о солнечных пятнах, обнаружил примерно 11-летнюю периодичность их появления (сами пятна могут существовать по несколько месяцев) и для характеристики солнечной активности ввел так называемое *число Вольфа* – *W*. Величина поля внутри солнечных пятен достигает 10^{-2} Тл, в сто раз больше, чем поле «спокойного» Солнца [Советский, 1985, с. 243].

1864 г. - *Дж.К. Максвеллом* (*Maxwell*, 1831-1879) на Лондонском королевском обществе доложена третья заключительная работа «Динамическая теория электромагнитного поля», которой завершилось создание теории, объединяющей все электрические и магнитные явления в одно - электромагнитное. Из теории следовало, что свет представляет собой электромагнитные волны, скорость распространения которых составляет $3 \cdot 10^5$ км/с, что подтверждается *всеми* экспериментальными данными и, тем самым, убедительно доказывает правоту теории Максвелла [Дорфман, 2007б, с. 94-106].

1871-1878 гг. - *И.М. Симонов* по своей инициативе осуществил магнитную съемку почти всей европейской территории России в 281 пункте. Эта съемка установила наличие крупной магнитной аномалии в Курской области и дала ценные сведения о магнитном поле территории России.

1881-1885 гг. - *А. Тилло* на основании данных И.М. Симонова строит первые магнитные карты Европейской части России.

1882-1883 гг. - Первый Международный Полярный год, который начался летом 1882 г. и продолжался до конца 1883 г. В проведении Полярного года приняли участие Россия, Дания, Германия, Франция, Голландия, Норвегия, Австро-Венгрия, Швеция, Италия и др., которые организовали ряд экспедиций в полярные страны.

1885 г. - *Ж.Б. Био* (*Biot*, 1774-1862) и *Ф. Савар* (*Savart*, 1791-1831) выяснили законы воздействия тока на магнитную стрелку. Проанализировав этот интегральный закон, *П.С. Лаплас* (*Laplace*, 1749-1827) показал, что в случае элемента тока эта сила воздействия убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, и получил дифференциальный закон, известный под названием закона Био-Савара или Био-Савара-Лапласа.

На собрании Общества естествоиспытателей в Гарце австрийцем *Вейнпрехтом* была высказана идея международного проведения объединенных исследований геофизических явлений Земли. Идея *Вейнпрехта* была одобрена на Международном метеорологическом конгрессе в Гамбурге, который разработал подробную программу проведения международных исследований. Эти исследования получили название Международного полярного года (*МПГ*). Председателем Полярной комиссии был избран директор Главной геофизической обсерватории в Петербурге академик Г.И. Вильд.

1898-1900 гг. - доцент Одесского университета *П.Т. Пассальский*, продолжая дело И.М. Симонова, проводит подробную съемку Крымского полуострова, выполнив магнитные наблюдения более чем в двухстах пунктах.

Конец 19 – начало 20 вв. - развитие электротехники в 19 в. в значительной степени способствовало постановке исследований магнитных свойств вещества [Дорфман, 2007б, с. 294-301].

1895 г. - *П. Кюри* (*Curie*, 1859-1906) опубликовал результаты выдающегося экспериментального исследования, в котором устанавливались основные эмпирические зависимости магнитных свойств диа-, пара- и ферромагнитных свойств веществ от температуры. Эти исследования установили важный для палеомагнетизма вывод о существовании в области температур 600-700⁰С для вулканических пород *точки Кюри*.

1905 г. - появилась классическая работа *П. Ланжевена* (*Langevin*, 1872-1946), в которой давалось объяснение физической природы диа- и парамагнетизма на основе электронной теории.

1907 г. - *П. Вейс* (*Weiss*, 1865-1940) разработал феноменологическую теорию, опирающуюся на теорию парамагнетизма Ланжевена и гипотетическое представление о

наличии внутреннего «молекулярного поля», позволившую впервые понять основные особенности ферромагнетизма.

1910-1912 гг. - опубликованы исследования японского физика *К. Хонды* (1870-1954) и английского физика *М. Оуэна*, содержавшие большой экспериментальный материал о магнитных свойствах чистых химических элементов.

1928 г. - *Я.И. Френкель* (1894-1952) впервые построил приближенную теорию ферромагнетизма.

Начало 20 в. - стала ясной связь между магнитным полем Земли и геологическим ее строением. С.- Петербургской Академией наук был поднят вопрос о проведении магнитной съемки всей территории России по единому плану и под общим руководством Академии за счет специальных сумм, которые должны быть ассигнованы из средств государственного казначейства.

1903 г. - *В. Сазерлендом (Sutherland)* для объяснения причины магнетизма звезд и планет предложена гипотеза разделения зарядов, которая до недавних пор считалась физически не обоснованной [Григорьев, Григорьева, Ростовский, 2003, с. 6].

1906 г. - *Брюнесом (Brunhes)* при палеомагнитных исследованиях лав Центрального массива во Франции впервые была обнаружена инверсия геомагнитного поля. С тех пор образцы горных пород, содержащих информацию об инверсиях геомагнитного поля, были найдены во всех частях света. Установлено, что примерно половина всех измеренных образцов пород обладает нормальной намагниченностью, а другая – обратной [Джекобс, 1979, с. 174].

1910-1914 гг. - начало работ по проведению магнитной съемки территории всей России, которые были прерваны начавшейся войной и продолжены после революции уже в СССР.

1911 г. - великим русским физиком *П.Н. Лебедевым* (1866-1912) осуществляется первая попытка экспериментального обнаружения магнитного поля у вращающихся тел. В опытах вращалось металлическое кольцо диаметром в 6 см со скоростью 5-6 тыс. оборотов в минуту. Опыты дали отрицательный результат [Яновский, 1953, с. 145].

1915-1916 г. - американскому физiku *С. Барнетту (S. Barnett)* удалось экспериментально доказать намагничивание ферромагнитного стержня путем его вращения, исходя из предположения А. Эйнштейна, что каждый атом ферромагнитного тела представляет собой гироскоп, который обладает, кроме механического момента, еще и магнитным моментом [Храмов, 1983, с. 25; Яновский, 1953, с. 139].

1919 г. - начата детальная магнитная съемка Курской области, фактически, положившая начало магнитной съемке территории новой советской России и развитию всей отечественной разведочной геофизики [Хмелевской, 2007, с. 43].

1919-1926 гг. - проводимая по указанию В.И. Ленина под руководством академиков П.П. Лазарева и И.М. Губкина работа по исследованию Курской магнитной аномалии, явилась первым в мировом масштабе исследованием такого рода, она положила начало магнитной разведке как особой отрасли знаний в науке о земном магнетизме.

1926 г. - эти работы послужили толчком к открытию в Ленинграде Института прикладной геофизики, организатором которого становится И.М. Бухарин.

Основы теоретической магнитометрии в СССР были заложены профессором Ленинградского горного института В.И. Бауманом (1867-1923). Его работы послужили началом целого ряда теоретических работ, которые позволили применять магнитометрический метод разведки для точных количественных расчетов.

Дж. Лармором (Larmor, 1857-1942) впервые предложена идея геомагнитного динамо для объяснения магнетизма Солнца [Жарков, 1983, с. 109].

С целью координации и обмена материалами наблюдений и исследований в области геофизики и геодезии создан *Международный союз геодезии и геофизики (МСГГ)*, который охватывает 43 страны. МСГГ состоит из 9 ассоциаций, в числе которых находится Ассоциация геомагнетизма и аэрономии, подразделяющаяся на 11 комитетов.

1924 г. - открыта первая в мире Полярная обсерватория в проливе Маточкин Шар на Новой Земле. В последующие годы такие обсерватории создаются в целом ряде пунктов на протяжении от Земли Франца Иосифа до Берингова пролива.

Конец 1920-х гг. - первая модификация электромагнитных зондирований – установка Шлюмберже – начала успешно внедряться в отечественную геологическую практику [Ваньян, 1997, с. 3]

1930-1940 гг. - по инициативе профессора Н.В. Розе и под его непосредственным руководством проводилась генеральная магнитная съемка, покрывшая за 10 лет всю территорию СССР магнитными пунктами, число которых достигло 26000. В результате были построены высокоточные магнитные карты территории СССР.

1931 г. – вышла в свет книга *А.Л. Чижевского* «Земля в объятиях Солнца», в которой автор впервые проследил влияние солнечной активности – «космической погоды» - на биологические и социальные явления, на изменение численности животных, возникновение эпидемий и даже начало войн и революций.

1932 г. - в СССР организуется Институт земного магнетизма, который в настоящее время вырос в крупное научное учреждение страны – Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИР РАН) и имеет в своем ведении разветвленную сеть магнитных обсерваторий.

1932-1933 г. - по инициативе советских ученых П.А. Молчанова, В.Ю. Визе и др. был проведен второй полярный год, в программу которого были включены наблюдения за электрическим полем Земли и за распространением радиоволн.

1934 г. - английским теоретиком *Т. Каулингом* (*T. Cowling*) доказана теорема о невозможности стационарного (т.е. незатухающего) геомагнитного динамо (ГД), в котором движение жидкости и магнитное поле обладают осевой симметрией. Таким образом, если бы поле геодинамических скоростей в земном ядре и магнитное поле не зависели бы от долготы, т.е. были бы симметричными относительно оси вращения Земли, то они не смогли бы образовать ГД. Теория ГД является существенно трехмерной и достаточно сложной математической задачей, в которой уравнения приходится решать, являются нелинейными уравнениями в частных производных [Жарков, 1983, с. 109-110].

1956 г. - на протяжении многих лет важный результат, вытекающий из теоремы, доказанной Каулингом, ошибочно истолковывали как утверждение, что осесимметричное движение в ядре Земли не может генерировать магнитное поле. Результаты, полученные Каулингом, дополнены исследованиями *Г. Бэкуса* (*G. Backus*) и *С. Чандрасекхара* (*S. Chandrasekhar*) [Джексон, 1979, с. 162], в основе которых заложены представления о вихревых движениях и *S*-эллипсоидах Римана в рамках задачи Дирихле [Кондратьев, 2003, с. 30]. В настоящее время представляется, что механизм однородного динамо должен обладать низкой степенью симметрии [Джекобс, 1979, с. 162].

1950-1960-е гг. - были получены и другие теоремы для сферы, запрещающие определенные движения при действии динамо. В соответствии с этими результатами, по-видимому, большинство типов симметрии должно быть исключено. Некоторые из этих теорем в применении к механизму динамо накладывают ограничения на типы симметрий возможных движений жидкости в ядре, другие – на симметрии генерируемого геомагнитного поля [Джексон, 1979, с. 162].

1937 г. - особым успехом советской геофизики является внедрение в практику метода аэромагнитной съемки, предложенного и разработанного профессором А.А. Логачевым.

1940-е гг. - *Х. Альфвен* заложены основы магнитной гидродинамики, за что тот в 1970 г. был удостоен Нобелевской премии [Физический, 1983, с. 364-364]. *Х. Альфвен* доказал теорему, согласно которой в идеально проводящей жидкости (т.е. жидкости с коэффициентом электропроводности $\sigma = \infty$) магнитные силовые линии «скреплены» с веществом, и при движении жидкости вместе с ней переносятся и силовые линии

магнитного поля, не проскальзывая относительно вещества. Говорят, что в идеальном проводнике поле вмерзает в вещество [Жарков, 1983, с. 112].

1950 г. - Х. Альфвен открыл новый тип волнового движения проводящей среды в магнитном поле – магнитогидродинамические волны, названные впоследствии альфвеновскими волнами [Храмов, 1983, с. 12-13].

1940-1950-е гг. - появление фундаментальных теоретических исследований А.Н. Тихонова с коллегами, А.П. Краева, С.М. Шейнмана и др. – в нашей стране, Л. Каньяра (Cagniard) – во Франции, С.С. Штефанеску (Stefanescu) – в Румынии, способствовали развитию методов электромагнитного зондирования, которые в нашей стране внедрялись, в значительной степени, усилиями А.М. Загармистра [Ваньян, 1997, с. 3-4].

1947 г. - создание первой современной теории геомагнитного поля Я.И. Френкеля, в основе которой заложена идея геомагнитного динамо, предложенная в 1919 г. Дж. Лармором и обоснованная в 1934 г. Каулингом – регенерация поля за счет вихревых движений в жидком электропроводящем внешнем ядре.

1949 г. - выход в свет работ по теории земного магнетизма В. Эльзассера (W. Eisasser), Е. Булларда (E. Bullard). Эльзассер предложил теорию, аналогичную теории Френкеля, основываясь на тех же предположениях о строении ядра и наличии в нем вихревых движений под влиянием температурного градиента [Яновский, 1953, с. 141]. Буллард нашел, что в ядре, вероятно, существуют два рода движений. Один из них – зональный поток, другой – конвективное движение [Рикитаке, 1968, с. 36]. Согласно обзору в [Джекобс, 1979, с. 160-167], первые работы В. Эльзассера по теории геомагнетизма относятся к 1946 г.

Основой подавляющего количества современных теорий магнитного поля Земли является идея геомагнитного динамо, базирующаяся на уравнениях Максвелла, гидродинамическом уравнении Навье-Стокса движения жидкости и уравнении неразрывности [Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971, с. 89-95; Стейси, 1972, с. 150-157; Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 93].

1950-1980-е гг. - появление большого количества основанных на идее геомагнитного динамо моделей генерации магнитного поля Земли [Жарков, 1983, с. 110; Кузнецов, 2008, с. 159-160]: Б.М. Яновского, 1953; Х. Геллмана, 1954; Е. Паркера, 1955, 1982; Т. Каулинга, 1959; С.И. Брагинского, 1964 (ламинарное динамо); М. Штеенбеком, Ф. Карузе и К. Редлером, 1966 (турбулентное динамо); Т. Рикитаке, 1968; Дж. Джекобса, 1979; У. Паркинсона, 1986; и др.

Достаточно полный обзор динамо-моделей представлен в [Джекобс, 1979, с. 160-191].

1958 г. - Г. Бэкус в США и А. Герценберг в Англии показали, что решение задачи ГД можно получить, если задаться некоторым специальным полем гидродинамических течений. Тем самым была доказана принципиальная возможность ГД [Жарков, 1983, с. 110].

Следует отметить, что в это же время появлялись и «нединамо» модели: Е.Н. Vestine, 1954; D.R. Inglis, 1955 и др. Такие модели базировались, в той или иной степени, на некотором, не всегда ясном, механизме образования и разделения зарядов и, видимо, потому не получили дальнейшего развития.

1950 г. - Международный Совет научных союзов (МСНС) пришел к заключению, что ограничиваться проведением работ в полярных областях уже нельзя и что необходимо организовывать наблюдения по всему земному шару. Таким образом, начавшийся третий Международный полярный год превратился в более обширную по своему характеру организацию, которая и получила название Международного геофизического года (МГГ).

Вторая половина 1950-х гг. - исследования магнитных свойств горных пород привели в области магнитной разведки к разработке нового метода, называемого палеомагнитной корреляцией осадочных толщ, а в области геомагнетизма – к развитию самостоятельного раздела – палеомагнетизма.

1957-1958 гг. - Первый Международный геофизический год, в рамках которого был выполнен широкий спектр геофизических работ. Отличительной особенностью всех работ Геофизического года явилась единая их направленность. Для земного магнетизма и явлений, тесно связанных с ним – полярных сияний и ионосферы, это имело огромное значение.

1959 г. - данные, полученные первыми космическими аппаратами «Луна», позволили сотруднику ИКИ АН СССР *К.И. Грингаузу* с коллегами впервые экспериментально обнаружить солнечный ветер.

1990-2000-е гг. - появление следующего поколения принципиально новых теорий магнитного поля Земли, не использующих гипотезу геомагнитного динамо в качестве основной идеи [Кузнецов, 2008, с. 160-161].

1990 г. - *Е.В. Григорьевой* были выполнены теоретические исследования, связанные с проблемой генерации магнитного поля за счет вращения электрических зарядов. Результатом таких расчетов явился вывод о том, что покоящийся относительно Земли наблюдатель должен фиксировать магнитное поле, создаваемое стационарно распределенными во вращающейся Земле электрическими зарядами.

1994 г. - *Б.В. Васильевым* в Дубне был повторен эксперимент Н.П. Лебедева 1911 г. и, тем самым, подтвержден термо-гиромагнитный эффект, результатом которого является генерация магнитного поля во вращающемся металлическом цилиндре, в котором искусственно поддерживается температурный градиент вдоль радиуса.

1995-2008 гг. - *В.В. Кузнецовым* [2008, с. 178-180] в рамках модели горячей Земли (см. главу 1) предложена модель генерации геомагнитного поля. В основе модели генерации поля заложены представления о двухфазном (газ + жидкость) состоянии вещества F – слоя, который, с одной стороны, граничит с «газообразным» (не твердым, как принято в других моделях Земли) внутренним G – ядром, а с другой – с «жидким» внешним E – ядром.

Элементы магнитного поля Земли

Магнитное поле в какой-либо точке O земной поверхности с координатами φ (географическая широта) и λ (географическая долгота) характеризуется магнитной индукцией $\mathbf{B}$ [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 62-64]. Введем в точке O прямоугольную систему координат, в которой x направляется на географический север, y – на восток, z – вертикально вниз. В Северном полушарии Земли вектор индукции $\mathbf{B}$ направлен вниз от горизонтальной плоскости x, y . Его проекции на соответствующие оси называются северной (X), восточной (Y) и вертикальной (Z) составляющими геомагнитного поля. Проекция $\mathbf{B}$ на горизонтальную плоскость x, y называется горизонтальной составляющей и обозначается H . Горизонтальная составляющая в отличие от X, Y, Z является вектором, так как она определяется не только абсолютной величиной, но и направлением на плоскости x, y . Если Ox – направление географического меридиана в точке O , то $\mathbf{OH}$ – направление геомагнитного меридиана, в общем случае не совпадающее с направлением географического меридиана. Угол D между геомагнитным и географическим меридианами называется *углом магнитного склонения*, угол J между горизонтальной плоскостью и направлением $\mathbf{B}$ – *углом магнитного наклона*. D, J принято называть угловыми, а X, Y, Z, H – силовыми элементами поля (или земного магнетизма). Различные комбинации вышеперечисленных элементов полностью определяют вектор $\mathbf{B}$: X, Y, Z – в прямоугольной системе, Z, H, D – в цилиндрической и $|\mathbf{B}|, D, J$ – в сферической системе координат.

Между элементами существуют простые соотношения:

$$|\mathbf{B}| = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad \operatorname{tg} D = Y / X, \quad \operatorname{tg} J = Z / H = Z / \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad |\mathbf{B}| = X / \cos D \cos J$$

и т.д.

Магнитное склонение считается положительным при отсчете угла D на восток и отрицательным при отсчете на запад. На магнитных картах элементы геомагнитного поля представляются в виде линий равных значений (изолиний). Изолинии склонения D называются *изогонами*, изолинии наклонения J – *изоклинами*, изолинии X , Y , Z , и H – *изодинамами* соответствующих элементов. Карта, показывающая вековые изменения одного из элементов поля для данной эпохи, называется картой *изопор*. Величины Z , J положительны в северном полушарии.

Единицей напряженности магнитного поля в системе СИ является *ампер на метр* (A/m), а в системе СГСМ – эрстед ($\mathcal{E}$). В практике магниторазведки широко применяется также внесистемная единица напряженности магнитного поля – гамма (γ). Единицей измерения *магнитной индукции* в системе СИ является *тесла* ($Tл$). В магниторазведке используется дробная единица – *нотесла* ($нТл$), $1 нТл = 10^{-9} Tл$. Перечисленные единицы соотносятся следующим образом [Хмелевской, 2007, с. 43]:

$$1 A/m = 4\pi \cdot 10^{-3} \mathcal{E}, 1 \mathcal{E} = 10^5 \gamma, 1 нТл = 10^{-9} Tл.$$

В реальных средах магнитная индукция ($\mathbf{B}$) соотносится с напряженностью ($\mathbf{T}$) как

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{T}(1 + \chi),$$

где μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума (в СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Гн/м^{-1}$, в СГСМ $\mu_0 = 1$, *генри* ($Гн$) – величина индуктивности). Магниторазведочная аппаратура обычно находится в немагнитной среде – воздухе или воде, для которых $\chi = 0$, поэтому в системе СГСМ $\mathbf{B} = \mathbf{T}$. Следовательно, магнитное поле Земли может быть выражено либо в единицах магнитной индукции ($нТл$), либо в единицах напряженности (γ), при этом:

$$1 нТл = 1 \gamma = 10^{-5} \mathcal{E}.$$

При магнитных измерениях для напряженности поля используются также единицы Гаусс [Gc] и Вебер/м² [$Bб \cdot м^{-2}$] [Джекобс, 1979, с. 147]:

$$1 Gc = 10^{-4} Bб/м^2 = 10^{-4} Tл.$$

Индукция $\mathbf{B}$ геомагнитного поля имеет различную величину и направление в различных точках земной поверхности [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 64-65]. Минимальные значения B наблюдаются на геомагнитном экваторе, который определяется условием $J = 0$. Максимального значения B достигает на магнитных полюсах, на которых $J = \pi/2$. Магнитные полюсы и магнитный экватор не совпадают с географическими полюсами и географическим экватором соответственно. Средняя геомагнитная индукция в системе единиц СИ составляет около $B \approx 50000 нТл$, на магнитном экваторе $B \approx 35000 нТл$, на магнитных полюсах $B \approx 65000 нТл$.

Наблюдения элементов геомагнитного поля, производящиеся в различных точках земной поверхности, показывают, что они не остаются постоянными во времени, а непрерывно изменяют свои значения. Эти изменения называются вариациями элементов геомагнитного поля. Периоды вариаций изменяются от долей секунды до нескольких месяцев. Кроме того, существуют вариации и среднегодовых значений элементов. Поэтому вариации в зависимости от их периода можно разделить на два принципиально различных типа: быстротечные периодического характера и медленные вариации

среднегодовых значений элементов геомагнитного поля. Последние называются вековыми ввиду большой длительности их периодов.

Исследования обоих типов вариаций показали, что они различаются не только величинами их периодов, но и по происхождению. Источники быстротечных вариаций находятся в верхних слоях атмосферы – это токовые системы и системы взаимодействия корпускулярного излучения Солнца (солнечного ветра) с силовыми линиями геомагнитного поля в околоземном пространстве. Источники вековых вариаций расположены в ядре Земли, там же, где генерируется основное, или главное, геомагнитное поле.

Помимо главного геомагнитного поля и его вековых вариаций, а также поля быстротечных вариаций (электромагнитного поля) существует еще поле, создаваемое намагниченными горными породами, расположенными в земной коре. Это поле называется аномальным геомагнитным полем. Таким образом, наблюдаемое на поверхности Земли геомагнитное поле является суммой трех полей, источники которых имеют различные физические механизмы происхождения и различное месторасположение.

1. Главное геомагнитное поле и его вековые вариации – источники расположены в ядре Земли.

2. Аномальное геомагнитное поле – источники расположены в земной коре. Например, напряженность поля в районе Курской магнитной аномалии достигает 2 Э [Лишевский, 1988].

3. Электромагнитное поле – внешнее поле, источники расположены в околоземном пространстве.

Вклад главного поля, наблюдаемое на поверхности Земли, составляет более 95%, аномальное поле вносит около 4% и внешнее поле – менее 1%.

Магнитные поля планет

Магнитные поля обнаружены у всех планет, кроме Плутона (пока неизвестно) и у Луны (табл. 7.1).

Таблица 7.1. Параметры магнитного поля планет [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 61]

Небесное тело	Радиус ядра, км	Напряженность магнитного поля, нТл	Магнитный момент, M , $A \cdot m^2$	Наклон магнитной оси к оси вращения, градусы	Магнитный полюс, расположенный в Северном полушарии
Меркурий	1800	350	$5 \cdot 10^{19}$	10-20	N
Венера	3000	3	$7 \cdot 10^{20}$	-	-
Земля	3460	50000	$8 \cdot 10^{22}$	11,5	S
Луна	350	1	$5 \cdot 10^{17}$	-	-
Марс	1500	30-60	$2 \cdot 10^{19}$	12	S
Юпитер	54000	$420 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^{27}$	9,5	N
Сатурн	27000	20000	$4 \cdot 10^{25}$	1	N
Уран	Проводящие оболочки на расстоянии 0,55 км от центра	13000	-	59	-
Нептун	-	6500	-	47	-
Плутон	-	-	-	-	-

Примечание: магнитный момент однородно намагниченного шара Земли, согласно [Таблицы, 1976, с. 996], составляет $M = 8,3 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ [$c \cdot m^{5/2} \cdot e^{1/2} \cdot c^{-1}$] = $8,3 \cdot 10^{22} A \cdot m^2$.

Продвижение в изучении магнитных полей планет и их спутников достигнуто благодаря успехам в области космических исследований [Кузнецов, 2008, с. 204-207]. Начало исследования было положено измерениями магнитного поля Луны, проведенные советским космическим аппаратом Луна-2. За минувшие годы были измерены магнитные поля планет: Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и спутников: Луны, Ио, Ганимеда и Титана. Поразительным открытием в этом цикле работ было обнаружение следов магнитного поля на спутниках планет-гигантов.

Американским космическим аппаратом Марс-Глобал-Сервейер, который в сентябре 1997 г. вышел на орбиту Марса, были получены убедительные данные об отсутствии у Марса дипольного поля и о существовании в марсианской коре «вмороженной» памяти о когда-то существовавшем магнитном поле.

Нет полной ясности с магнитным полем Венеры. То, что на Венере нет дипольного поля не вызывает сомнений, но было ли оно раньше, пока не ясно. Возможно, что на Венере в настоящее время происходит переполюсовка магнитного поля.

Одна из последних сенсаций в области изучения магнитного поля спутников, это обнаружение магнитного поля на спутниках Юпитера во время посещения его окрестностей космической станцией Galileo. Существование на этих планетах магнитного поля плохо вписывается в рамки современных моделей магнитного поля.

Следует отметить, что между магнитными данными в разных источниках имеются расхождения. Данные в табл. 7.1 характеризуют магнитное поле Марса как дипольное, что противоречит приведенным выше данным, полученным американским космическим аппаратом [Кузнецов, 2008, с. 204]. Не соответствуют данным табл. 7.1 и данные о полярности магнитных полей Меркурия и Марса, приведенные в работе [Орленок, 2000, с. 139]. В работе [Орленок, 2000, с. 139] утверждается, что «идея гидромагнитного динамо находит подтверждение при исследованиях магнитных полей Меркурия, Марса, Венеры и Луны». В то же время в работе [Кузнецов, 2008, с. 204-207] полагается, что теория динамо противоречит данным о магнитных полях планет-гигантов и не может описать всей совокупности магнитных данных для Земли и других планет. Все эти данные лишний раз указывают на нерешенность проблемы генерации магнитного поля планет и их спутников.

Методы исследования магнитного поля Земли

Источником или причиной любого магнитного поля являются постоянные магниты и/или электрические токи. Отсюда следует, что источниками магнитного поля Земли могут быть либо намагниченность Земли, имеющая постоянный характер (Земля – большой магнит), либо постоянные токи, протекающие внутри Земли, или же, наконец, совокупность того и другого.

Задача науки о земном магнетизме и состоит в том, чтобы выяснить эти причины, найти количественные связи между величинами, характеризующими магнитное поле Земли и их источниками: намагниченностью земного шара и плотностью токов. Для решения этой проблемной задачи требуется знать, каково распределение магнитного поля Земли по ее поверхности, т. е. каковы величина и направление его в каждой точке земной поверхности.

Единственный метод нахождения такой зависимости – непосредственные измерения элементов земного магнетизма на всей поверхности земного шара, называемые *магнитными съемками*.

Помимо магнитных съемок, имеющих целью изучение пространственного распределения магнитного поля Земли, наблюдения элементов земного магнетизма производятся непрерывно в ряде пунктов земного шара – в обсерваториях. Задача этих наблюдений – изучение временного распределения, т. е. зависимости поля от времени.

По данным из работы [Таблицы ..., 1976] напряженность магнитного поля в мЭ ($1 \text{ мЭ} = 10^{-3} \text{ Э} = 100 \text{ нТл}$) по состоянию на 1965 г. представлена на рис. 7.1.

Видно, что по состоянию на середину 1960-х гг. магнитные полюса действительно не совпадают с географическими полюсами и располагаются в точках с координатами: *Северный магнитный полюс*, расположен в южном полушарии: $\varphi = 71,2^{\circ}S$, $\lambda = 150,8^{\circ}E$, *Южный магнитный полюс*, расположен в северном полушарии: $\varphi = 70,5^{\circ}N$, $\lambda = 98^{\circ}W$.

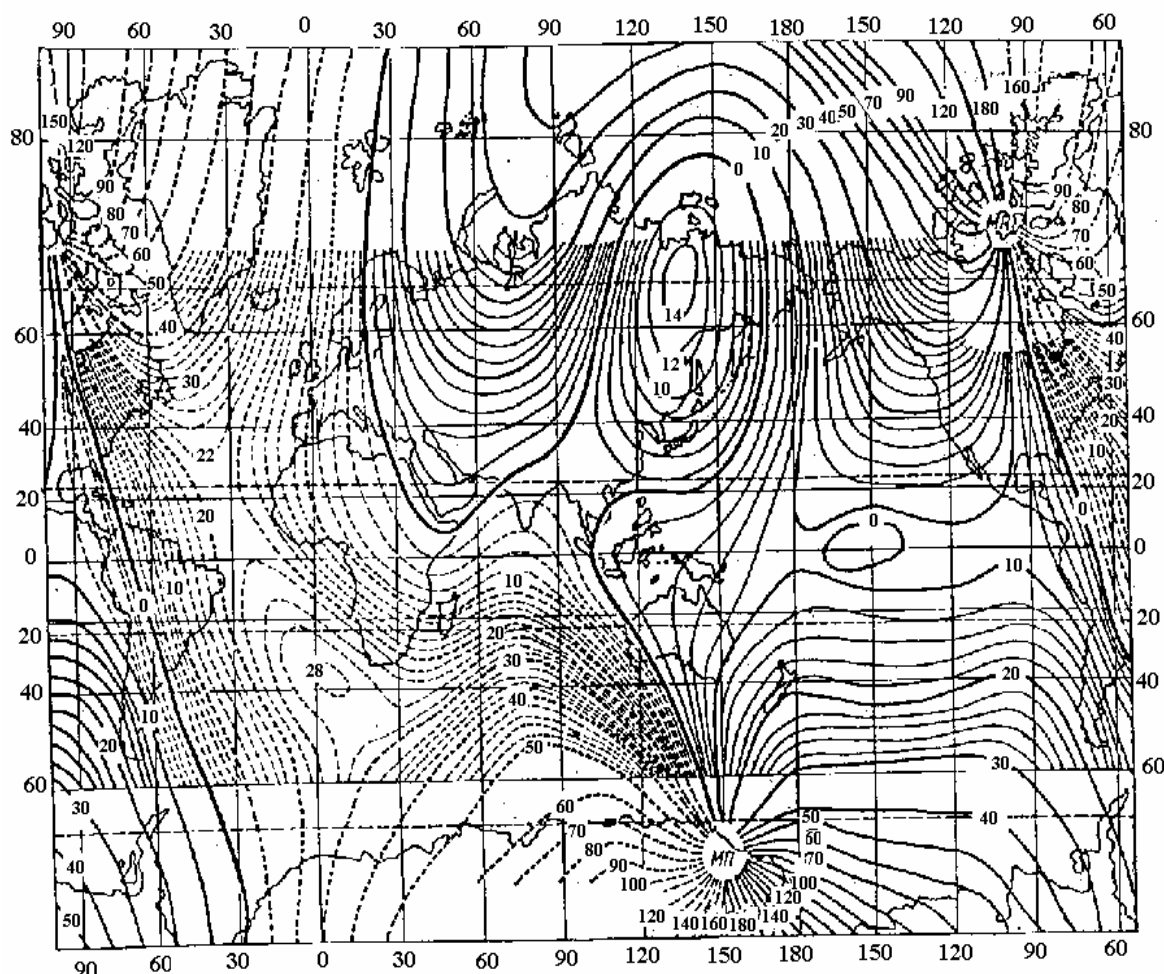


Рис. 7.1. Напряженность магнитного поля Земли, мЭ, по состоянию на 1965 год [Таблицы ..., 1976, с. 997].

Данные о модуле напряженности геомагнитного поля (в нТл, 10^4 нТл = 0,1 Э) по состоянию на середину 1980-х гг. [Паркинсон, 1986] представлены на рис. 7.2.

Рис. 7.1 и 7.2 дают общее представление о морфологии геомагнитного поля. Видим, что поле имеет довольно сложный характер, оно представляет собой не просто дипольное поле. (Дипольное поле должно характеризоваться достаточно равномерной (без «сгущений» и «разряжений») сеткой геомагнитных широт и долгот с центрами в геомагнитных полюсах, близкой сетке географических долгот и широт с центрами в географических полюсах). На рис. 7.2 хорошо различимы четыре аномальных участка, захватывающих области с линейными размерами в несколько тыс. км каждая, называемые *главными магнитными аномалиями* – два в северном полушарии: Канадский и Сибирский, и два в южном: Бразильский и Южный.

На более детальных картах других элементов геомагнитного поля можно выделяются и большее количество крупномасштабных аномалий. Так в работе [Стейси, 1972, с. 148] выделяется 8-10 таких аномалий, в работе [Хмелевской, 2007, с. 44] вполне определенно говорится о шести «крупных, соизмеримых с площадью материков, положительных и отрицательных аномалиях с амплитудой $(0,1-0,2) \cdot 10^5$ нТл» - *материковых*, по сути, главных, магнитных аномалиях.

Миграция магнитных полюсов

Положение магнитного полюса в северном полушарии на середину 1980-х гг., по сравнению с серединой 1960-х гг., несколько изменилось: $\varphi \approx 74^\circ N$, $\lambda \approx 97^\circ W$ – полюс, как видим, в течение последних 20 лет «мигрировал» в направлении Северного географического полюса примерно на $3\text{--}4^\circ$.

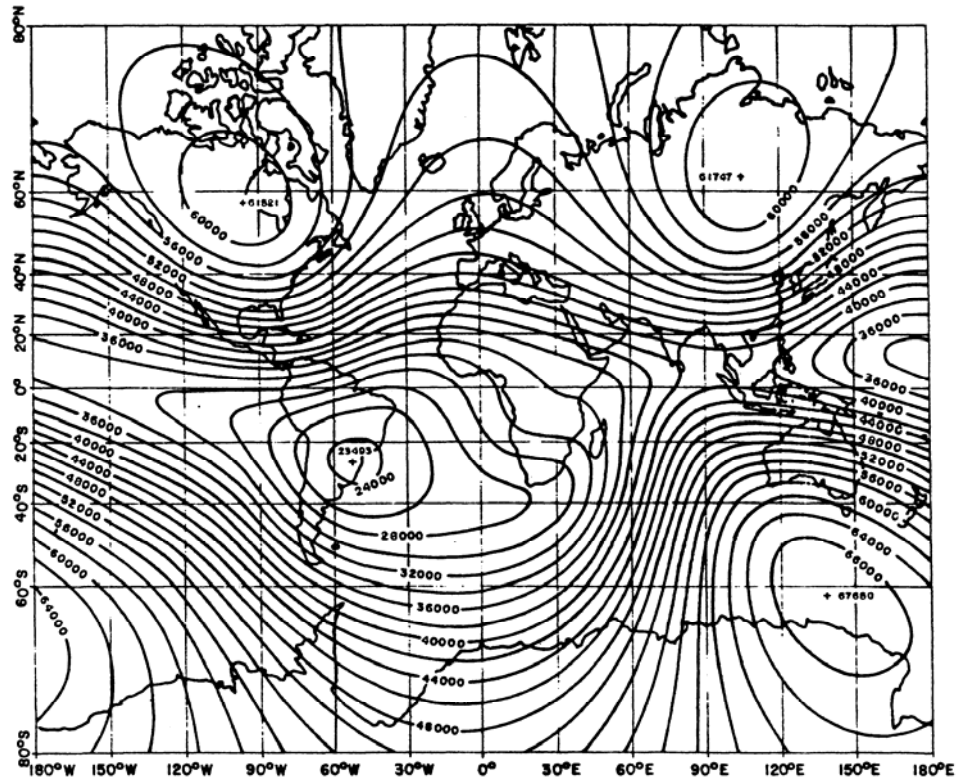


Рис. 7.2. Модуль напряженности (в nT , $10^4 nT = 0,1 \text{ Э}$) геомагнитного поля по данным на середину 1980-х гг. по [Кузнецов, 2008, с. 159].

Общая картина миграции магнитных полюсов приведена на рис. 7.3. Видим, траектория миграции северного полюса более определена, чем траектория южного полюса, что определяется разной полнотой геомагнитных данных, используемых при проведении расчетов.

Инструментальное определение координат положения северного магнитного полюса (СМП) было начато капитаном Россом в 1831 г. [Кузнецов, 2008, с. 185]. В течение следующих 70 лет измерений положения СМП не проводилось. В 1904 г. во время экспедиции Амундсена были повторно определены координаты СМП. Оказалось, что северный магнитный полюс за эти 70 лет переместился на расстояние около 50 км. Этап современных определений положения СМП начинается с измерений канадского магнитолога П. Серсона в 1948 г.

Измерения положения СМП в 1999 г. показали, что скорость дрейфа СМП по сравнению с 1994 г. увеличилась в 1,5 раза и достигла значения 26 км/год . Имеются переопределенные данные, согласно которым скорость дрейфа превысила 40 км/год . Анализ всех данных показывает, что в течение последних 100 лет СМП движется примерно в одном направлении в сторону Северного географического полюса со средней скоростью около 10 км/год [Кузнецов, 2008, с. 187-188].

Координаты южного магнитного полюса (ЮМП): $72^\circ S$, $155^\circ E$ впервые были определены профессором Д. Моусоном во время экспедиции Э. Шеклтона в 1909 г.

(отмечен звездочкой на рис. 7.3с). Достаточно надежно координаты *ЮМП* измеряются примерно с 1965 г. [Кузнецов, 2008, с. 193-196]. Известно, что в 1860 г. скорость дрейфа *ЮМП* уменьшалась до нуля, а в 1920-1930 гг. она даже меняла знак.

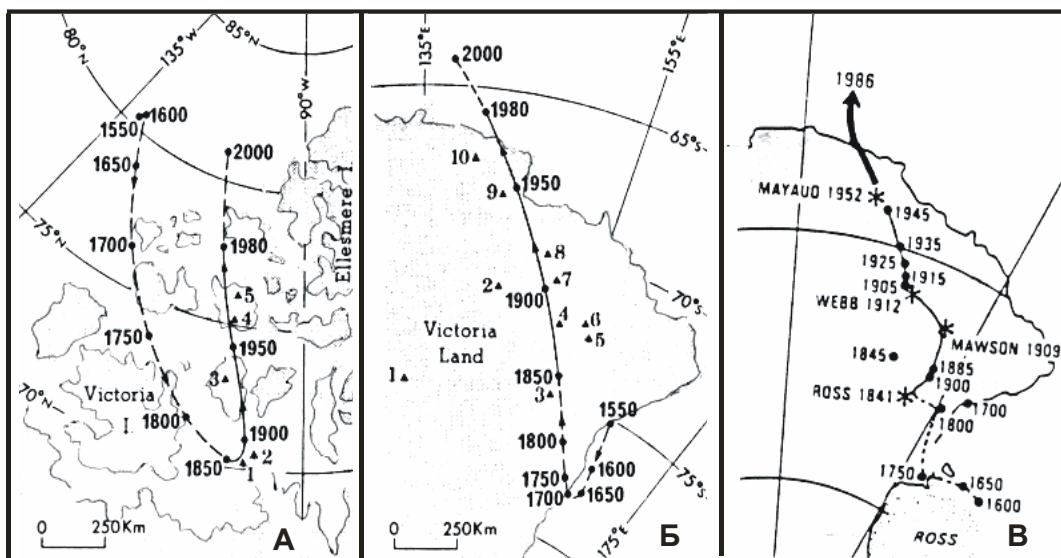


Рис. 7.3. Дрейф северного (а) и южного (б) полюсов по [Dawson, Newitt, 1982] и южного полюса (с) по [Barton, Hutchinson, Quilty et al., 1986] по [Кузнецов, 2008, с. 195].

Вариации значений магнитного момента Земли

Приведенные данные о динамике изменения координат *СМП* и *ЮМП* указывают на *несимметричное расположение* магнитных полюсов Земли [Кузнецов, 2008, с. 196], что может быть связано с динамикой изменения величины и/или направления магнитного момента Земли.

Современное магнитное поле в первом приближении представляют полем магнитного диполя, помещенного в центр Земли – гипотеза центрального диполя [Тяпкин, 1998, с. 44-46]. Магнитный момент такого диполя Земли и наклонение его оси приведены табл. 7.1.

Считают, что лучшее приближение к наблюдаемому геомагнитному полю дает диполь, расположенный в магнитном центре Земли – гипотеза эксцентричного диполя. Сферический гармонический анализ геомагнитного поля, выполненный по современным и древним картам, свидетельствует: начиная с 1840 г. по настоящее время эксцентрический диполь (магнитный центр) систематически удаляется от географического центра Земли на северо-запад - в сторону Тихого океана (табл. 7.2). По состоянию на эпоху 1955,0 г. удаление магнитного центра от географического составляло 436 км. Величина магнитного момента, начиная с 1829 г. по настоящее время, систематически уменьшается примерно от $8,5 \cdot 10^{22}$ до $8,0 \cdot 10^{22} \text{ а} \cdot \text{м}^2$ (см. далее табл. 7.3). Результаты вычислений свидетельствуют, что эксцентричный диполь дрейфует в плоскости большого круга Земли, наклоненного к экватору под углом 31° , со средней угловой скоростью $0,3^\circ$ в год. При определенных допущениях о параметрах траектории период такого обращения составляет около 1200 лет. Другие авторы склоняются к возможности его уменьшения до 600 лет и не исключают возможности представления его траектории спиральной линией. Например, как в схеме генерации магнитного поля глобальной аномалии как вихря Россби в тонком F-слое в рамках горячей модели Земли [Кузнецов, 2008, с. 178-180].

Представления об изменении магнитного момента диполя за предыдущие тысячелетия дают археомагнитные данные. Их анализ свидетельствует о колебательном

характере изменения магнитного момента Земли. Около двух тысяч лет тому назад магнитный момент Земли достигал максимальной величины, в полтора раза превышающей нынешнюю, а шесть тысяч лет тому назад был минимальным – около половины нынешней. Таким образом, намечается период вариации магнитного момента Земли продолжительностью 7-8 *тыс лет*.

Изменение магнитного момента (напряженности магнитного поля) Земли в геологические эпохи отражают палеомагнитные данные. Интерпретация таких данных неоднозначна. Одни авторы, отдают предпочтения плавно меняющимся значениям, хорошо ложащимся на сплошную кривую. Из поведения этой кривой делаются два вывода. Во-первых, «напряженность современного поля существенно больше, чем ее среднее значение за любой продолжительный интервал времени в пределах последних 500 *млн лет*, в том числе и в последний миллион лет» и, во-вторых, «начиная с силура, дипольный магнитный момент Земли, в общем, возрастал» [Стейси, 1972, с. 212-213]. Другие авторы [Большаков, Солодовников, 1981; Тяпкин, 1998, с. 47-48], полагают, что такое плавное увеличение величины магнитного момента Земли осложнено периодическими изменениями с периодом порядка 200 *млн лет*.

Таблица 7.2. Широта, долгота и расстояние магнитного центра r_M от центра Земли в единицах земного радиуса a для эксцентричного диполя [Рикитак, 1968, с. 102; Тяпкин, 1998, с. 45].

Источник	Год	Северная широта	Восточная долгота	r_M/a
A. Schmidt	1885	5°36'	168°12'	0,0461
F. Dyson, H. Furner	1922	9 13	161 16	0,0570
E. Vestine	1945	13 56	154 05	0,0630
H. Finch, B. Leaton	1955	15 41	150 49	0,0685
Экстраполяция по Finch & Leaton	1960	16 40	149 20	0,0702

Определения магнитного момента в докембрии весьма ограничены [Тяпкин, 1998, с. 48]. Между $1 \cdot 10^9$ и $2 \cdot 10^9$ лет назад напряженность магнитного поля Земли была больше, чем сейчас. Для пород же, возраст которых $2.6 \cdot 10^9$ лет, обнаружили, что геомагнитное поле в то время было сравнимо по напряженности с современным полем. Таким образом, ядро уже тогда было фактически сформировано и генерировало заметное магнитное поле уже на ранней стадии истории Земли [Стейси, 1972, с. 213].

Вековые вариации геомагнитного поля

Средние годовые значения всех магнитных элементов испытывают регулярные изменения от года к году. Подобные долгопериодные вариации геомагнитного поля называются *вековыми вариациями*. Они были впервые обнаружены Геллибрандом в 1634 г., когда он установил, что склонение в Лондоне меняется со временем.

Склонение-наклонение. Систематические наблюдения за склонением и наклонением начинаются примерно с 1540 г. Наиболее полные данные известны для Лондона. На рис. 7.4 представлены сглаженные результаты наблюдений, опубликованные впервые Л. Бауэром для Лондона и Бостона [Baue, 1895] и приведенные в нескольких классических геофизических монографиях и впоследствии дополненные новыми данными.

Видно, что *СМП* в течение последних 460 лет «передвигался» по «достаточно плавному» эллипсу, который на рис. 7.4 может быть дорисован точками. Такой характер движения *СМП* позволил предположить [Кузнецов, 2008, с. 187-188], что определенные Дж. Россом в 1831 г. координаты *СМП*, возможно, ошибочны, полюс должен был находиться восточнее примерно на 100 км, т.к. в пределах 70-летнего интервала (1831-1904 гг.) *СМП* «переместился» всего на 50 км при средней скорости миграции около 10

км/год. Однако с таким выводом можно и не согласиться. Действительно, в соответствии с определениями положения *СМП* [Dawson, Newitt, 1982], представленными на рис. 7.3а, направление миграции *СМП* в середине 19 в. изменилось на противоположное: и в 1831 и 1904 гг. *СМП* мог располагаться в близко расположенных точках.

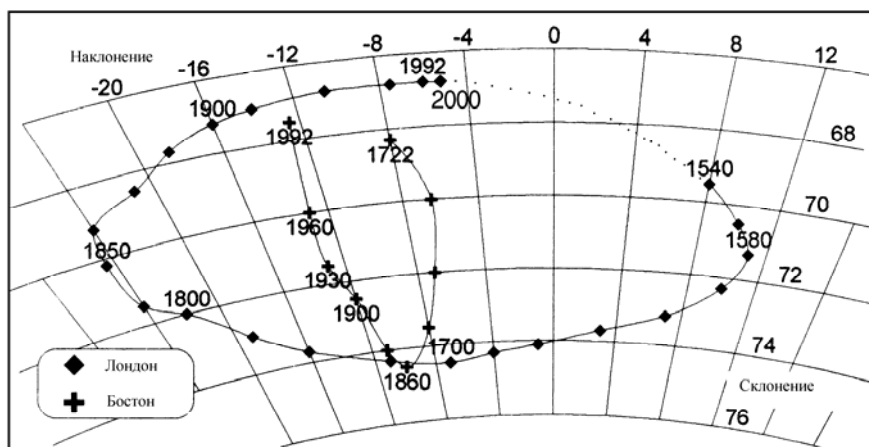


Рис. 7.4. Склонение и наклонение на обсерваториях в Лондоне и Бостоне [Кузнецов, 2008, с. 188].

Данные, приведенные на рис. 7.4, и прогнозные данные о положении *СМП* в будущем в работе [Кузнецов, 2008, с. 185-191] подтверждают циклический с периодом в несколько сот лет характер вековых вариаций [Яновский, 1953, с. 147] и с большой степенью достоверности позволяют принять продолжительность периода близкой 600 годам.

Фокусы векового хода. Карта, показывающая вековые изменения одного из элементов поля для данной эпохи, называется *картой изопор*. Такая карта для модуля напряженности геомагнитного поля на эпоху середины 1980-х гг. приведена выше на рис. 7.2. На рис. 7.5а, б представлены данные о вековых изменениях вертикальной составляющей поля для разных эпох. На всех таких картах отчетливо выделяются центры, в которых вековые изменения особенно велики. Такие высоко градиентные изменения элементов магнитного поля называют *фокусами изопор* или *фокусами векового хода* (*ФВХ*). На карте последующей эпохи (1942,5, рис. 7.5б) все фокусы «сдвинуты» относительно таких же фокусов на карте предыдущей эпохи (1922,5, рис. 7.5а) к западу примерно на 15° .

Изучение карт современных вековых вариаций, построенных для разных элементов магнитного поля, позволяет выделить следующие наиболее интенсивные *ФВХ* [Кузнецов, 2008, с. 172-174]: Бразильский с максимальной скоростью изменения общей интенсивности поля -200 нТл/год с координатами $0^\circ, 40^\circ \text{W}$; Цейлонский – с $+100 \text{ нТл/год}$, $10^\circ \text{N}, 80^\circ \text{E}$; Индонезийский – с -40 нТл/год , $15^\circ \text{S}, 110^\circ \text{E}$; Тихоокеанский – с $+60 \text{ нТл/год}$, $15^\circ \text{S}, 100^\circ \text{W}$.

Анализ аналогичных карт, построенных для более ранних лет, показал, что все *ФВХ*, в том числе и выделенные выше четыре наиболее интенсивные, представляют собой достаточно протяженные области – главные магнитные аномалии, дрейфующие по поверхности Земли. Как правило, *ФВХ* зарождаются на экваторе. Затем они дрейфуют вдоль него в западном направлении (рис. 7.5а, б) со скоростью около $0,2^\circ$ ($0,1^\circ - 0,3^\circ$ [Тяпкин, 1998, с. 55], $0,18^\circ \pm 0^\circ,015$ [Bullard, 1967]) по долготе в год. Либо, также дрейфуя к западу, перемещаются при этом к полюсам при средней скорости миграции $10\text{-}20 \text{ км/год}$, и, постепенно уменьшая свою интенсивность, распадаются [Yukutake, Tachinaka, 1968]. В частности, хорошо известен т.н. Каспийский *ФВХ*, который с середины 18 в. дрейфовал по территории России и распался на полярном Урале в середине 1960-х гг. [Почтарев, 1978].

Одиннадцать надежно установленных *ФВХ*, имевших место в течение последних 250 лет, проанализированы в работе [Yukutake, Tachinaka, 1968]. Согласно этим данным,

ФВХ представляют собой либо циклоны, либо антициклоны, к числу которых относится и упомянутый выше Каспийский *ФВХ*. Часть выявленных *ФВХ* существуют до настоящего времени и, дрейфуя, рожают новые *ФПХ*. Например, Бразильский *ФВХ* представляет собой в течение уже более 250 лет стабильный циклон, который за это время успел пройти путь вдоль экватора от Африки до Бразилии. Другая часть *ФВХ* уже прекратила свое существование.

Общим свойством для всех *ФВХ* является то, что все они как бы «обходят стороной» Глобальные магнитные аномалии (*ГМА*), ни разу не «столкнувшись» с ними. Возможно, это происходит не случайно [Кузнецов, 2008, с. 174]. В соответствии с работой [Ботт, 1974, с. 152-157], такое «нестолкновение», возможно, имеет фундаментальный смысл. Б.М. Яновский [1967; с. 19–20] полагает важным, что при этом можно принять малыми и/или слабо изменяющимися величину магнитного момента Земли, положение его северного магнитного полюса и наклон магнитной оси основного диполя.

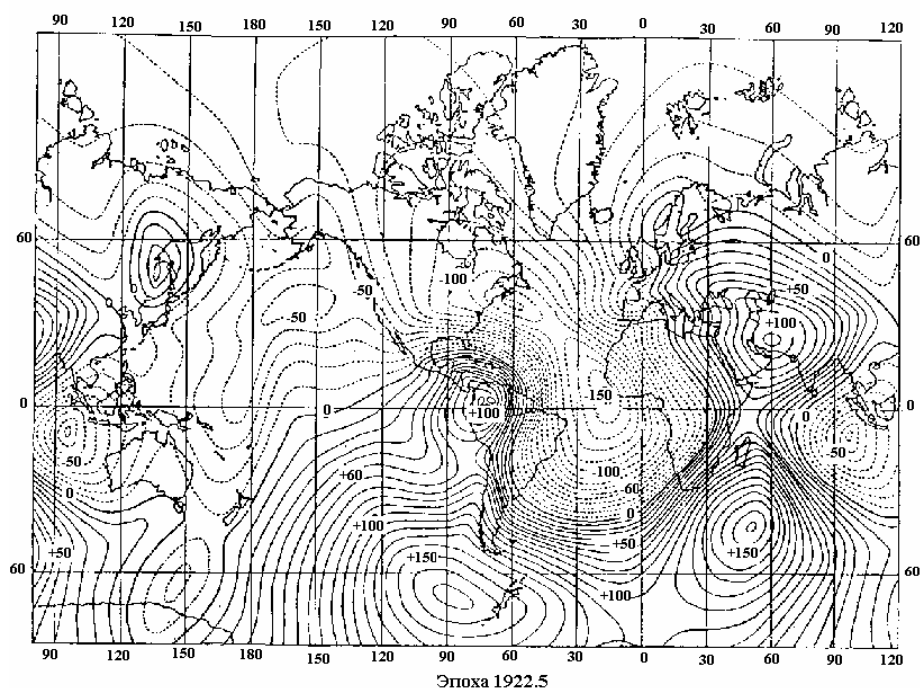


Рис. 7.5 а. Карта изопор, показывающая вековые изменения вертикальной составляющей (в гаммах в год) для эпохи 1922,5 [Ботт, 1974, с. 197].

ФВХ в рамках горячей модели Земли представляются гидродинамическими вихрями, типа вихрей Россби, аналогичными атмосферным вихрям – циклонам и антициклонам. Направление переноса такого вихря, т.е. *ФВХ*, может быть как к поверхности Земли, так и от нее, его вращение – как по часовой стрелке, так и против нее [Кузнецов, 2008, с. 174].

Экскурсы – относительно короткие изменения магнитного поля между продолжительными (порядка *одного млн лет*) периодами положительной и отрицательной полярности [Кузнецов, 2008, с. 176-177]. Обсуждая проблему экскурсов, в работе [Петрова, Поспелова, 1992] отмечаются три важных момента. Во-первых, теории динамо не могут объяснить таких резких и кратковременных изменений магнитного поля. Во-вторых, экскурс, как инверсия поля, представляет собой глобальное явление, и, в-третьих, экскурсы случаются во время циклов уменьшения величины магнитного момента Земли ниже значения $4 \cdot 10^{22} \text{ а} \cdot \text{м}^2$.

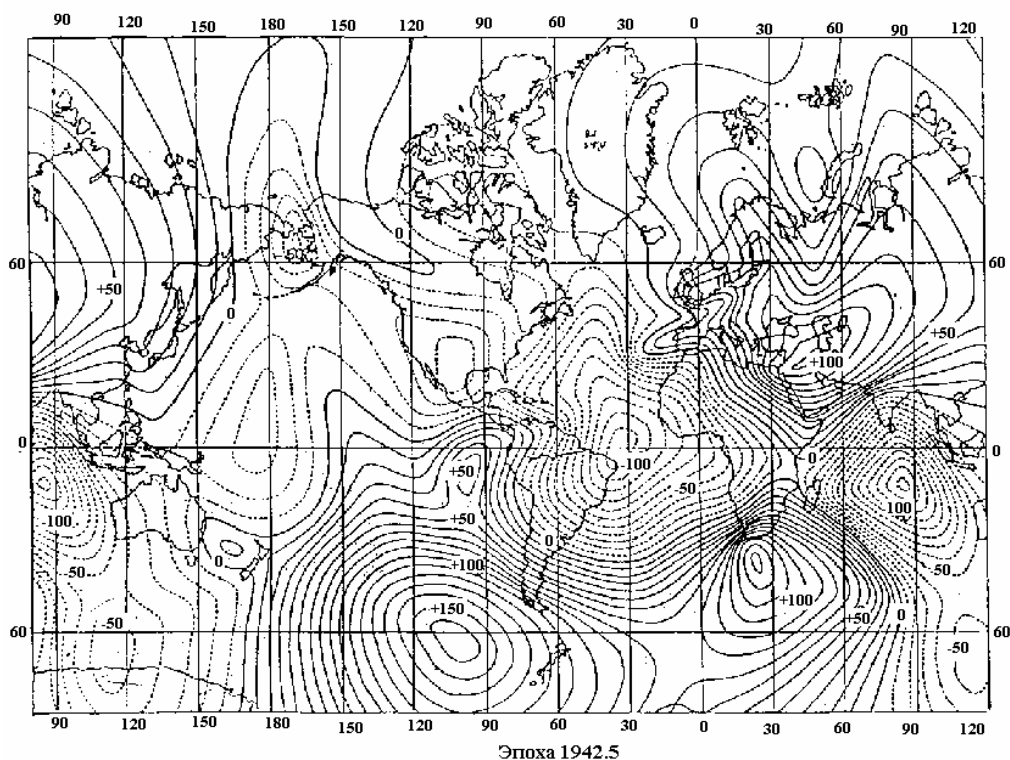


Рис. 7.5 б. Карта изопор, показывающая вековые изменения вертикальной составляющей (в гаммах в год) для эпохи 1942,5 [Ботт, 1974, с. 198].

Джерки. Дословно: джерк – резкий толчок во время езды, в геомагнетизме *джерки* – резкие изменения производной напряженности магнитного поля по времени $\frac{\partial B}{\partial t}$ [Кузнецов, 2008, с. 177]. Это явление берет начало с работы [Courtillet et al., 1978], в которой авторами было обращено внимание на поведение в Европе в 1969-1970 гг. вековой вариации Y (ориентированной вдоль направления Восток-Запад) компоненты изменения производной напряженности магнитного поля Земли по времени. Необычность выражалась в том, что, начиная с 1940-х гг. и до конца 1960-х гг., для каждой обсерватории ряд среднегодовых значений $Y(t)$ достаточно хорошо описывался модельной параболой. Затем, начиная с 1969-1970 гг., между регистрируемыми данными и моделью стало наблюдаться резкое расхождение, которое достаточно просто устранялось введением второй параболы.

Хорошо изучены джерки 1969-1970, 1979-1980 и 1989-1992 гг. Оказалось, что наилучшим образом джерки проявляются на временной зависимости Y -компоненты, слабее они видны на X (Север-Юг) компоненте и еще слабее на Z (вертикальной) компоненте геомагнитного поля. Именно за явлением такого резкого изменения среднегодовых значений, с наибольшей интенсивностью проявляющихся на ориентированной в направлении Восток-Запад $Y(t)$ -компоненте, и закрепилось название джерк.

Очевидно, что симметричный относительно оси вращения дипольный источник генерации геомагнитного поля не может приводить к выделению компоненты, ориентированной вдоль направления Восток-Запад. Поэтому есть достаточно веские физические основания появления интенсивной Y -компоненты связать с отклонением источника геомагнитного поля от дипольного – с квадрупольным характером геомагнитного поля. В соответствии с данными работы [Madden, Le Mouel, 1982], максимальные джерки 1969-1970 гг. оказались «привязанными» к главным магнитным аномалиям Земли. В таком случае и квадрупольность геомагнитного поля так же можно

связать с глобальными магнитными аномалиями, представляющими собой четыре токовых кольца находящихся в плоскостях, не проходящих через ось вращения Земли.

В работе [Кузнецов, 2008] приводятся многочисленные данные в пользу существования взаимосвязей между перечисленными выше вековыми вариациями магнитного поля. В таком случае, очевидно, для описания геомагнитных явлений необходимо строить модели, альтернативные динамо-модели.

Главное магнитное поле Земли. Аномалии геомагнитного поля

У. Гильберт в 1600 г. показал, что магнитное поле Земли подобно полю намагниченной сферы. В качестве удобного первого приближения геомагнитное поле Земли можно представить полем магнитного диполя, помещенного в центр Земли. Магнитный момент такого диполя, как отмечалось выше, около $M = 8 \cdot 10^{25} \text{ ед. СГСМ} = 8 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ и его ось наклонена по отношению к оси вращения земли на $11^{\circ},5$. Уравнение, описывающее поле диполя, легко получить из выражения магнитного потенциала для поля диполя.

Рассмотрим две противоположных по знаку и равных по величине магнитных массы m , $-m$, находящихся в полюсах на расстоянии d друг от друга вдоль полярной оси. Магнитный момент такого диполя равен [Стейси, 1972, с. 141-150]:

$$M = md . \quad (7.1)$$

Потенциал V магнитного поля $\mathbf{B}$ в точке P в сферической системе координат (r, θ, λ) , с центром в центре диполя, где r – радиус-вектор точки P , θ и λ - ее магнитное расстояние и долгота соответственно, на расстоянии $r \gg d$ равен:

$$V = -\frac{M}{r^2} \cos \theta . \quad (7.2)$$

Градиент V определит напряженность поля в точке P . Пусть точка P находится на поверхности сферической радиуса a Земли, в центре которой находится магнитный диполь (7.1). Тогда горизонтальная H и вертикальная Z компоненты, обусловленные диполем, магнитное поле которого лучше всего соответствует наблюдаемому, на земной поверхности будут равны:

$$H = \frac{M}{a^3} \sin \theta = H_0 \sin \theta , \quad (7.3)$$

$$Z = \frac{2M}{a^3} \cos \theta = Z_0 \cos \theta , \quad (7.4)$$

где значение поля на экваторе в среднем равно

$$H_0 = \frac{Z_0}{2} = \frac{M}{a^3} = 0,35 \text{ Э}. \quad (7.5)$$

Из выражений (7.3) – (7.5) получаем величину полной напряженности поля и его наклонение J относительно горизонтали:

$$B = \sqrt{H^2 + Z^2} = H_0(1 + 3 \cos^2 \theta)^{1/2} , \quad (7.6)$$

$$\operatorname{tg} J = \frac{Z}{H} = 2 \operatorname{ctg} \theta = 2 \operatorname{tg} \varphi, \quad (7.7)$$

где θ - геомагнитное расстояние и $\varphi = 90^\circ - \theta$ - геомагнитная широта.

Уравнение (7.7) является основным при вычислениях параметров палеомагнитного полюса (см. далее). Если направление остаточной намагниченности горных пород отражает направление древнего поля, из уравнения (7.7) получается палеоширота – древняя геомагнитная широта (конечно, в предположении, что древнее поле также являлось дипольным).

Однако мы не можем считать, что Земля действительно является однородно намагниченной сферой, и дальнейшие данные о природе поля получены именно при рассмотрении его отклонений от дипольного. Потенциал геомагнитного поля можно представить в виде бесконечного ряда сферических гармонических функций, первый член которого дает уравнение (7.2). Общее выражение для потенциала можно записать в виде [Стейси, 1972, с. 141-144]:

$$V = \frac{1}{a} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left\{ \left[C_l^m \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} + C_l'^m \left(\frac{r}{a} \right)^l \right] \cos m\lambda + \left[S_l^m \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} + S_l'^m \left(\frac{r}{a} \right)^l \right] \sin m\lambda \right\} P_l^m(\cos \theta). \quad (7.8)$$

где θ и λ - геомагнитное полярное расстояние и долгота соответственно, a – радиус Земли, P_l^m – присоединенные полиномы Лежандра, первые члены которых равны $P_1^0 = 1$, $P_1^1 = \sin \theta$. Коэффициенты разложения C и S имеют размерность напряженности магнитного поля. Потенциал V непосредственно наблюдать нельзя. На поверхности Земли ($r = a$) измеряются компоненты поля: северная (X), восточная (Y) и вертикальная (Z). Тогда соотношения

$$X = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right)_{r=a}, \quad Y = \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right)_{r=a}, \quad Z = \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{r=a} \quad (7.9)$$

позволяют определить коэффициенты в уравнении (7.8) по экспериментальным данным. Отметим, что для раздельного определения коэффициентов в (7.8) со штрихами ($C_l'^m, S_l'^m$) и без штрихов (C_l^m, S_l^m) необходимо определить и V и $\partial V / \partial r$. Вертикальная составляющая поля Z непосредственно дает величину $(\partial V / \partial r)_{r=a}$, а V получается только косвенным путем из его горизонтальных составляющих X и Y .

Первым этот метод к анализу геомагнитного поля, фактически, применил наш соотечественник профессор Казанского университета И.М. Симонов в 1835 г. [Яновский, 1953, с. 15]. Полную теорию представления магнитного поля как функции координат широты и долготы на поверхности Земли дал через четыре года, в 1839 г., К. Гаусс.

Гаусс показал, что коэффициенты C_l^m и S_l^m описывают поле внутреннего происхождения, источник которого находится внутри Земли, а $C_l'^m$ и $S_l'^m$ - внешнее поле. Гаусс полагал, что внешнее поле равно нулю. Теперь мы знаем, что оно мало, его величина не превышает $3 \cdot 10^{-4} \text{ Э} \approx 30 \text{ нТл} \approx 30 \text{ } \gamma$ и возрастает в несколько раз во время магнитных бурь. Возникновение внешнего магнитного поля связано с кольцевыми токами и дрейфом заряженных частиц,двигающихся по винтовой траектории вдоль силовых линий геомагнитного поля на расстоянии нескольких земных радиусов в ионосфере. На «долю» внешнего поля приходится менее 1% всего геомагнитного поля.

Ниже рассмотрим внутреннее поле.

Воспользовавшись коэффициентами Гаусса g_l^m и h_l^m , имеющими размерность напряженности магнитного поля

$$g_l^m = \frac{C_l^m}{a^2}, \quad h_l^m = \frac{S_l^m}{a^2},$$

выражение (7.8) можно переписать в виде:

$$V = a \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=0}^l (g_l^m \cos m\lambda + h_l^m \sin m\lambda) P_l^m(\cos \theta). \quad (7.10)$$

Уравнения (7.9) сохраняют свой прежний вид.

Многочисленными исследователями в разное время проводился гармонический анализ и самих данных о геомагнитном поле и его изменения во времени. Для эпохи 1955 данные о коэффициентах Гаусса до 15 порядка ($0 \leq m \leq 15$; $1 \leq l \leq 15$) включительно приведены в работе [Яновский, 1964, с. 99]. Из этих данных следует, что значения всех коэффициентов с ростом порядка сначала резко уменьшаются до шестого порядка включительно, затем имеет место медленное уменьшение коэффициентов с небольшим (без резких изменений) колебанием их величин. Такой характер изменения значений коэффициентов Гаусса позволяет с большой вероятностью утверждать, что ряд должен быть сходящимся.

Данные, характеризующие значения первых двух гармоник, определенные в разные эпохи, представлены табл. 7.3 из работ [Орленок, 2000, с. 161; Рикитаке, 1968, с. 16, 89; Яновский, 1953, с. 102; 1964, с. 98].

Таблица 7.3. Значения коэффициентов разложения Гаусса и магнитного момента $M = m \cdot 10^{22} \text{ а} \cdot \text{м}^2$ для различных эпох

Автор	Год	g_1^0	g_1^1	h_1^1	g_2^0	g_2^1	g_2^2	h_2^1	h_2^2	m
A. Erman, H. Petersen	1829	-3201	-284	601	-8	257	-14	-4	146	8,45
K. Gauss	1835	-3235	-311	625	+51	292	-2	+2	157	8,56
J. Adams, W. Adams	1845	-3219	-278	578	+9	284	4	-10	135	8,49
Quintus-icilins	1880	-3339	-276	619	-37	300	49	-22	144	-
J. Adams, W. Adams	1880	-3168	-243	603	-49	297	6	-75	149	8,36
H. Fritsche	1885	-3164	-241	591	-35	286	68	-75	142	8,34
G. Neumayer, H. Petersen	1885	-3157	-248	603	-53	288	66	-75	146	-
A. Schmidt	1885	-3168	-222	595	-50	278	65	-71	149	8,35
F. Dyson, H. Furner	1922	-3095	-226	592	-89	299	144	-124	84	8,17
H. Jones, P. Melotte	1942	-3039	-218	555	-117	294	157	-150	51	8,01
E. Vestine et al.	1945	-3057	-211	581	-127	296	164	-166	54	8,07
В.И. Афанасьева	1945	-3032	-299	590	-125	288	150	-146	48	8,01
S. Chakrabarty	1945	-3056	-233	549	-127	299	151	-167	40	-
H. Finch, B. Leaton	1955	-3055	-227	590	-152	303	158	-190	24	8,06
G. Fanselau	1955	-3067	-216	577	-128	296	155	-167	58	-
К. Пэшуой	1955	-3050	-237	591	-142	304	165	-173	33	-

Проводя сопоставление значений коэффициентов для эпох, близких друг к другу, например, 1922-1955 гг., можно определить величину погрешности измерений, которая, как видно из данных табл. 7.3, для g_1^0 составляет около 1%. В то же время, за период 1835-1945 гг. значение коэффициента g_1^0 уменьшилось более чем на 6%, что значительно превышает погрешность измерения и, следовательно, указывает на уменьшение самого значения этой величины, т.е. магнитного момента Земли со временем.

Данные, приведенные в табл. 7.3, показывают, что наибольшие значения имеют коэффициенты g_1^0 , g_1^1 и h_1^1 , соответствующие первым членам разложения геомагнитного потенциала (7.10):

$$V = a[g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \sin \theta]. \quad (7.11)$$

В соответствии с соотношениями (7.4) и (7.3) первое слагаемое в (7.11) определяет вертикальную компоненту поля Z_0 , второе – его горизонтальную H компоненту, откуда для поля на экваторе получаем [Стейси, 1972, с. 145]:

$$H_0 = \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}, \quad (7.12)$$

и на основании (7.5) соотношение (7.12) можно переписать в виде [Орленок, 2000, с. 160-161]:

$$M = a^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}. \quad (7.13)$$

Простые арифметические вычисления показывают, что численные значения коэффициентов разложения из табл. 7.3 с высокой точностью удовлетворяют полученным соотношениям (7.12) и (7.13).

Формулы (7.9), (7.11) – (7.13) за четыре года до К. Гаусса впервые были получены И.М. Симоновым. Он, как и К. Гаусс, предположил источник геомагнитного поля дипольным и излучаемые им компоненты поля на поверхности Земли представил с помощью формул сферической тригонометрии [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 66-73]. Как видим, решение И.М. Симонова явилось первым дипольным приближением полной теории К. Гаусса.

Таким образом, первые члены разложения потенциала (7.8) или (7.10) по сферическим функциям действительно определяют основную часть геомагнитного поля как его *дипольную* составляющую.

Согласно данным новейших определений, было показано, что лучшим приближением к реальному геомагнитному полю является диполь, смещенный относительно центра к северу на 300 км [Стейси, 1972, с. 141-150], а для последующей эпохи – еще дальше, на 436 км [Рикитак, 1968] – гипотеза эксцентричного диполя.

Из данных, приведенных в табл. 7.3, следует, что первые три дипольные коэффициента разложения имеют устойчивую тенденцию уменьшаться со временем: значение первого коэффициента за последние 100 лет уменьшилось более чем на 200 ед., второго – примерно на 100 ед. и третьего – примерно на 40 ед. И, как следствие - за последнее столетие значение магнитного момента уменьшилось на 5%. Если такие темпы сохранятся и в дальнейшем, то можно ожидать, что через 2000 лет Земля может лишиться своего магнитного поля.

Анализ Фурье геомагнитного поля до членов, соответствующих длинам волн порядка 10 км проводился по профилю вокруг земного шара. В результате обнаружено, что гармоники с большими амплитудами имеют длины волн порядка 5000 км и больше, между длинами порядка нескольких тысяч (≈ 3000) и нескольких сот (≈ 300) км амплитуды спектра очень малы, на пять-шесть порядков по величине меньше амплитуд крупномасштабных гармоник. В диапазоне еще меньших, порядка 100 км размеров амплитуды выявляемых аномалий опять повышаются на один - два порядка по величине, оставаясь на три-четыре порядка по величине меньше амплитуды глобальных гармоник. Как видим, имеет место две группы максимумов. Одной - соответствуют крупномасштабные аномалии большой амплитуды – глобальные или материковые

аномалии магнитного поля, другой – наоборот, мелкомасштабные меньшей амплитуды аномалии шириной до 100 км.

Известно, что намагниченность горных пород постепенно уменьшается с увеличением температуры и становится равной нулю в точке Кюри. Точка Кюри для различных ферромагнетиков различна. Например, для магнетита она равна 578°C , а для гематита – 675°C , и т.д. Известно также, что температура Земли увеличивается с глубиной и на глубине первых десятков километров превышает точку Кюри магнетита. Поэтому естественно связать мелкомасштабные аномалии геомагнитного поля с существованием в пределах земной коры намагниченных пород, которые, накладываясь на главное поле, и создают аномалию.

Региональные же аномалии рассматриваются как особенности главного магнитного поля, генерируемые в жидком внешнем ядре – модель-динамо, или в тонком переходном слое между внутренним и внешним ядрами Земли – модель F -слоя [Кузнецов, 2008].

Отсутствие аномалий промежуточных размеров является сильным аргументом в пользу того, что на промежуточных глубинах нет источников геомагнитного поля вследствие их твердого состояния и температуры выше точки Кюри.

Таким образом, данные гармонического анализа геомагнитного поля представляют главное поле глубинного происхождения, источник которого связан с процессами, протекающими в ядре. Следовательно, характер поля, на геомагнитных картах с исключенным дипольным полем, отражает строение только более интенсивной глубинной части геомагнитного поля.

Магнитные свойства пород. Палеомагнетизм

[Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 83-91]

Вековые вариации свойственны и дипольной и недипольной составляющим геомагнитного поля. За последнее столетие дипольное поле уменьшалось примерно на 0,04% в год [Ботт, 1974; с. 196 – 199]. По данным [Таблицы ..., 1976; с. 996] сравнение элементов геомагнитного поля для 1855 и 1950 гг. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на $7 \cdot 10^{-4}$ своего значения. Эти оценки близки значению, которое может быть получено по приведенным выше несколько другим данным [Тяпкин, 1998, с. 44-46] об уменьшении магнитного момента с 1829 года до настоящего времени.

Относительная величина годового изменения недипольного поля в среднем больше, но меняется от региона к региону, где напряженность поля может, как увеличиваться, так и уменьшаться.

Таким образом, короткий в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Первые данные о том, что магнитное поле Земли менялось во времени, были получены в 1906 г. Брюнесом [Джексон, 1979, с. 174]. Он обнаружил во многих изверженных породах на территории Франции остаточную намагниченность, направленную почти противоположно вектору напряженности современного поля. В настоящее время подобные образцы были обнаружены во всех уголках мира. Установлено, что примерно половина всех измеренных образцов пород обладает нормальной намагниченностью, а другая половина – обратной. Эти данные легли в основу нового направления – палеомагнетизма.

Принципиальным открытием было обнаружение отрицательных магнитных аномалий, число которых, как оказалось, сравнимо с положительными [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 83-84]. Отрицательной называется такая аномалия, поле которой в Северном полушарии направлено в верхнюю часть пространства, над горизонтальной плоскостью, так что аномальное поле B_a почти антипараллельно главному полю B_n , уменьшая наблюдаемое поле $B = B_n + B_a$.

Если бы породы намагничивались только по направлению современного геомагнитного поля, то существовали бы только положительные аномалии. Намагниченность I породы, как показали исследования, состоит из двух компонент:

$$I = \chi B_{сов} + I_n,$$

где $\chi B_{сов}$ – индуктивная намагниченность, всегда направленная по современному полю $B_{сов}$, χ – магнитная восприимчивость, I_n – естественная остаточная намагниченность, которая, как впервые было показано Брюнесом и подтверждено последующими исследованиями, не совпадает по направлению с современным полем и может от него отличаться на любой угол от 0 до 180° . Естественная остаточная намагниченность, как правило, возникает во время образования породы, и возраст I_n практически одинаков с возрастом породы. Отсюда был сделан вывод о том, что направление I_n горной породы отражает направление древнего магнитного поля, которое существовало в то геологическое время, когда образовалась данная порода.

В большинстве изверженных горных пород I_n по величине превышает $\chi B_{сов}$, и поэтому направление аномального поля B_a определяется направлением I_n , т.е. направлением древнего магнитного поля. Следовательно, наличие отрицательных аномалий указывает на то, что они образовались в древнем поле, направление которого было обратным по отношению к современному геомагнитному полю.

Наличие в породах естественной остаточной намагниченности I_n , величина и направление которой отражает величину и направление древнего поля, существовавшего во время образования породы, дает возможность изучать историю геомагнитного поля в прошлые геологические эпохи. Такой косвенный метод изучения древнего магнитного поля называется палеомагнитным.

Палеомагнитный метод базируется на двух основных предположениях. Геофизическое предположение состоит в том, что геомагнитное поле в прошлые геологические эпохи было полем центрального осесимметричного диполя, каковым является и основная часть современного поля. С физической точки зрения предполагается, что естественная остаточная намагниченность I_n совпадает в среднем с направлением древнего поля $B_{др}$, величина I_n пропорциональна $H_{др}$ и в основном сохраняется в течение многих тысяч и миллионов лет до наших дней. Эти предположения не очевидны, и при каждом палеомагнитном исследовании их нужно проверять.

В принятой модели поля легко определить современные географические координаты древнего геомагнитного поля. В модели центрального осесимметричного диполя геомагнитные меридианы совпадают с географическими, а магнитные полюсы совпадают с географическими полюсами. Пусть в древней породе, залегающей в точке $Q(\varphi, \lambda)$, вектор I_n относительно современного поля определяется углами склонения $D_{др}$ и наклона $J_{др}$. Тогда по формуле (7.7) можно определить древнюю географическую широту $\varphi_{др}$, на которой была данная порода в момент образования:

$$\operatorname{tg} \varphi_{др} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} J_{др}. \quad (7.14)$$

Таким образом, из измерений компонент намагниченности I_n образца (эти измерения проводятся, как правило, в лаборатории) мы определяем два важных параметра: угол $D_{др}$ и широту $\varphi_{др}$.

Воспользовавшись теоремами косинусов и синусов сферической тригонометрии, получим следующие формулы для современных координат φ_0, λ_0 древнего магнитного полюса:

$$\sin \varphi_0 = \sin \varphi \sin \varphi_{др} + \cos \varphi \cos \varphi_{др} \cos D_{др}, \quad (7.15)$$

$$\sin(\lambda - \lambda_0) = (\sin D_{\text{др}} \cos \varphi_{\text{др}}) / \cos \varphi_{\text{др}}. \quad (7.16)$$

Измеряя I_n пород разного геологического возраста, можно получить закономерности изменения дипольного поля, начиная от очень древних геологических эпох, до нашего времени. Палеомагнетизм – это уникальный метод в геофизике, основанный на удивительном свойстве «магнитной памяти» ферромагнитных минералов, входящих, хотя и в небольших количествах, в состав практически всех горных пород. Магнетизм ферромагнитных минералов дает основной вклад в магнитную восприимчивость горных пород. Вклад диа- и парамагнитных минералов очень мал.

Направление I_n для определенного геологического возраста в данной точке земной поверхности рассчитывается с применением статистических методов по достаточно большому числу образцов. По полученным данным с помощью формул (7.15) и (7.16) определяется положение соответствующего возрасту породы магнитного полюса. Такой полюс называется виртуальным магнитным полюсом. Среднее положение ряда виртуальных полюсов для пород данного возраста, расположенных в разных точках земной поверхности, называется палеомагнитным полюсом.

При проведении палеомагнитных исследований большое значение имеет выяснение физических механизмов намагничивания различных горных пород, установление степени сохранности I_n , ее соответствия времени образования породы. Установлено, что изверженные горные породы приобретают I_n в геомагнитном поле во время остывания после излияния на поверхность. Возникшая таким образом I_n называется термостатичной, она имеет высокую интенсивность и большую стабильность. Осадочные горные породы, являющиеся продуктом переработки и переотложения изверженных пород, приобретают I_n в геомагнитном поле во время осаждения мелких частиц в водном бассейне (море, озеро). Мелкие намагниченные частицы в процессе осаждения ориентируются по направлению поля, и в результате возникает детритовая, или ориентационная, намагниченность осадочных горных пород. После образования I_n изверженные и осадочные породы находятся уже в других условиях (обычные температуры и отсутствие водной среды), при которых дальнейшего намагничивания горных пород в изменяющемся геомагнитном поле практически не происходит. Именно поэтому I_n пород, как правило, древнего происхождения и синхронна с образованием пород.

Новая глобальная тектоника

Проведенные во второй половине XX в. многочисленные палеомагнитные исследования привели к открытиям, которые существенно изменили геофизические и геологические концепции строения и эволюции литосферы и позволили сформулировать основы новой геологической концепции, получившей название *Новой глобальной тектоники* [Новая, 1974]. Наиболее принципиальными результатами являются следующие [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 86-91].

1. Палеомагнитные полюсы не совпадают с современным полюсом, при этом, чем древнее палеомагнитный полюс, тем на большем расстоянии от современного он находился. Кембрийский северный палеомагнитный полюс (возраст около 600 млн лет) находится южнее экватора.

2. Кривые миграции северных палеомагнитных полюсов, определенные по направлению естественной остаточной намагниченности I_n пород разных континентов, существенно различны (рис. 7.6).

3. Геомагнитное поле в прошлые геологические эпохи неоднократно изменяло свою полярность: происходили инверсии поля, которых, начиная с кембрия, насчитывается более тысячи. Шкала инверсий, датированная абсолютными методами, называется магнитохронологической шкалой (рис. 7.7).

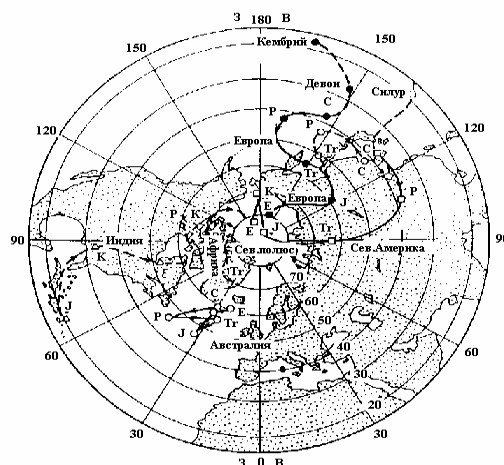


Рис. 7.6. Кривые движения полюса для Северной Америки, Европы, Австралии, Африки и Индии. Е – эоцен, К – мел (137-195 млн лет назад), J – юра (195-230 млн лет назад), Tr – триас (230-285 млн лет назад), Р – Пермь (285-350 млн лет назад), С – карбон (350-410 млн лет назад). Кривые построены по осредненным данным измерений [Ботт, 1974; с. 250].

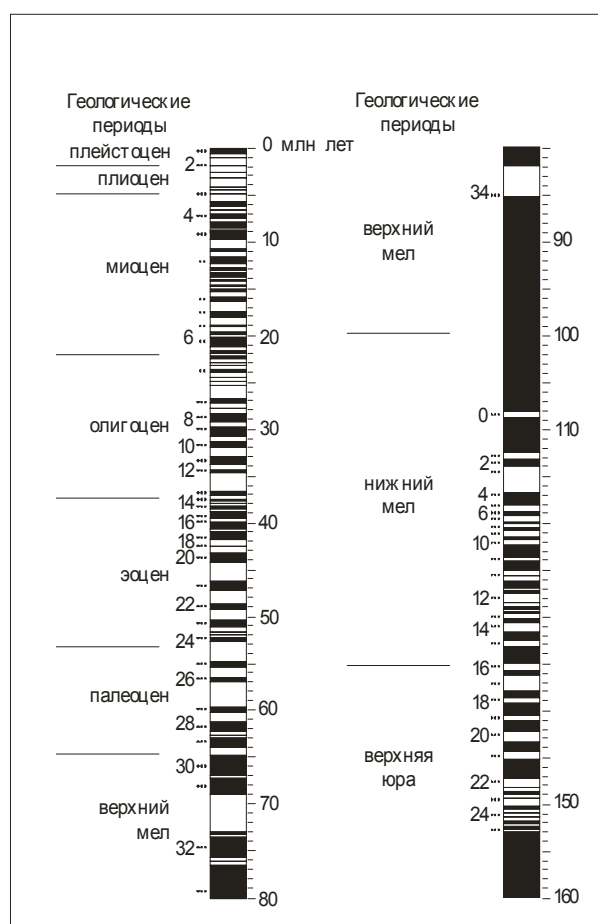


Рис. 7.7. Магнитохронологическая шкала, используемая для определения возраста линейных океанских аномалий. Слева от шкалы – номера аномалий, справа – возраст в млн лет [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 89].

Проанализируем кратко эти результаты. По модели центрального осесимметричного диполя магнитный полюс совпадает с географическим. Следовательно, обнаруженная миграция магнитного полюса должна одновременно рассматриваться и как

миграция географического, т.е. оси вращения Земли. Вследствие закона сохранения момента количества движения изменение положения оси вращения требует наличия таких огромных сил, которых мы не видим ни на Земле, ни в космическом пространстве. Поэтому первый результат можно рассматривать не как перемещение полюса, а как движение (в противоположную сторону) верхней литосферной оболочки Земли. Такая интерпретация подтверждается вторым результатом. Действительно, Северный полюс должен быть один, а не несколько, как это следует из второго результата. Поэтому расхождение кривых миграции полюсов разных континентов свидетельствует о том, что литосферная оболочка не перемещалась как единое целое, а двигались отдельные литосферные плиты, причем каждая по своей траектории.

Наконец, третий результат указывает на то, что геомагнитному полюсу присущи не только вековые вариации, но и более глубокие изменения – инверсии (рис. 7.8, 7.9). Этот результат дополняет картину основных свойств поля и имеет огромное теоретическое значение при решении проблемы происхождения геомагнитного поля. Кроме того, временная шкала инверсий может служить независимым инструментом для определения возраста горных пород, что является фундаментальной задачей геологии.

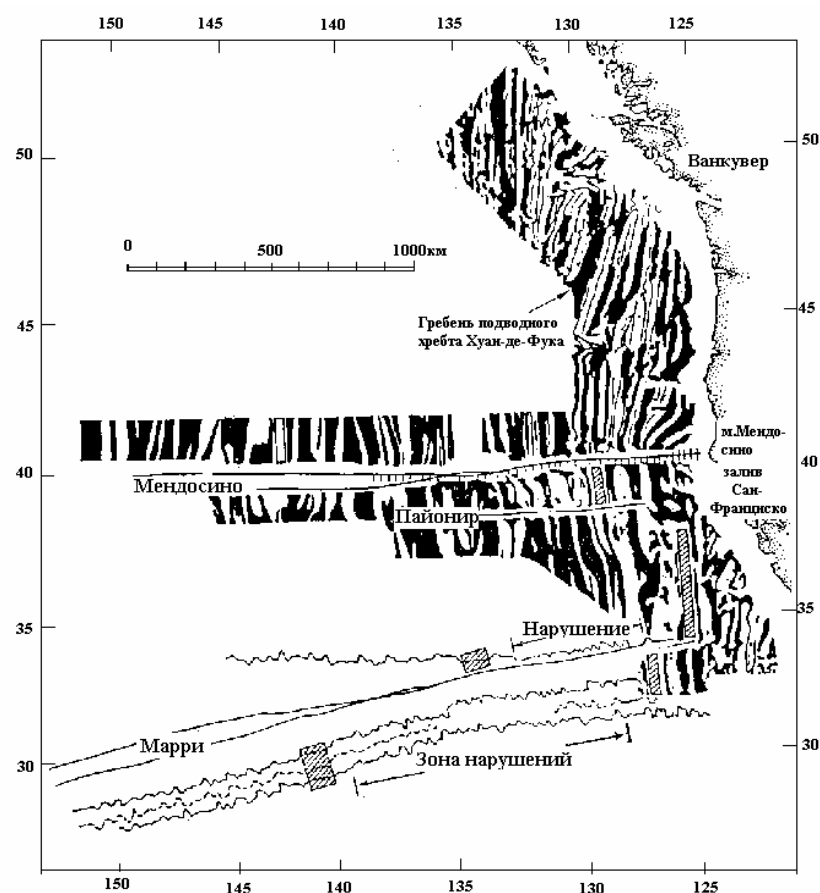


Рис. 7.8. Линейный характер магнитных аномалий к западу от побережья Северной Америки. Положительные аномалии показаны черным цветом. Полосы имеют ширину около 10-20 км, амплитуда аномалий от пика к пику достигает 1000 γ (рис. 7.9). Последующие работы показали, что полосчатость магнитных аномалий типична для океанических регионов [Ботт, 1974; с. 100].

Изучение аномального магнитного поля океана, предпринятое в последние десятилетия с помощью протонных и квантовых магнитометров, привело к результатам, которые оказались в прямой связи с результатами палеомагнитных исследований.

Протонный и квантовые магнитометры дают возможность проводить непрерывную запись магнитных профилей, что позволило осуществить точное и детальное магнитное картирование океанского дна. В результате были получены совершенно неожиданные картины океанских аномалий. В отличие от сложной формы аномалий на суше, которая сильно меняется от района к району, океанские магнитные аномалии имеют систематический характер почти на всех океанах (рис. 7.10, 7.11). Параллельные полосы чередующихся знакопеременных аномалий тянутся на тысячи километров (рис. 7.8). Интенсивность аномалий высока (рис. 7.9, 7.10).

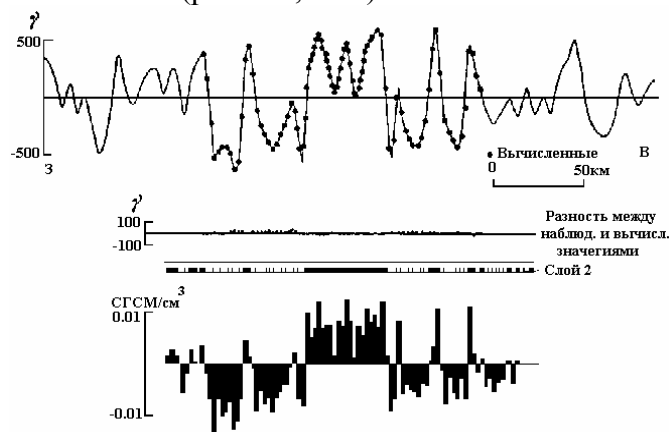


Рис. 7.9. Интерпретация магнитных аномалий по профилю через подводный хребт Хуан-де-Фука в северо-восточной части Тихого океана. При интерпретации определялась намагниченность слоя 2. Слой 2 был представлен двумерными прямоугольными блоками. Рассчитывалась намагниченность каждого блока, результаты изображены внизу рисунка. Приведены также разности между наблюдаемыми и вычисленными значениями аномалий. Следует обратить внимание на симметрию аномалий относительно осевой части хребта [Ботт, 1974; с. 101].

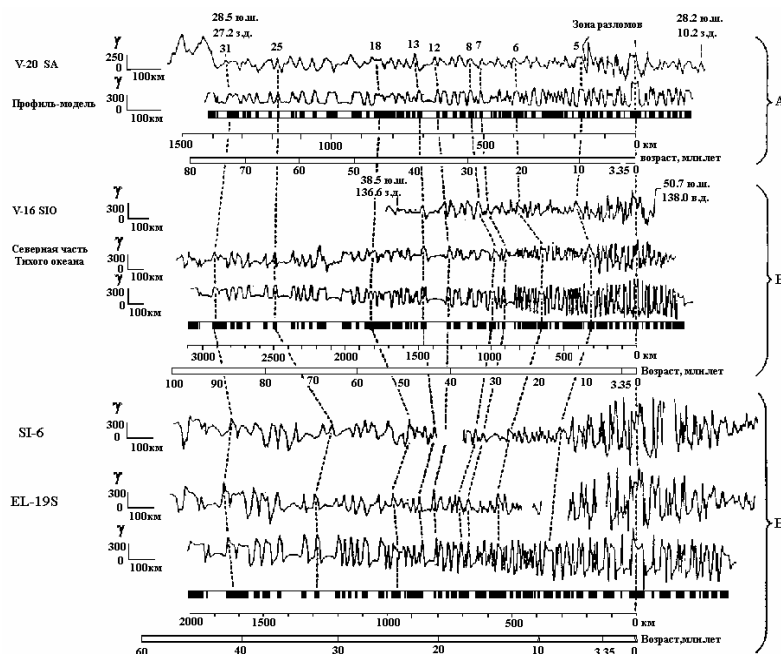


Рис. 7.10. Профиль южной части Атлантического океана (SA), профиль южной части Индийского океана (S10), другие профили для северной части Тихого океана (SI-6, EL-19S). Под каждым наблюдаемым профилем помещен теоретический профиль, рассчитанный исходя из нормальной (черная полоса) и обратной (светлая полоса) намагниченности тел. Мощность каждого тела 2 км. Для каждой модели прилагается шкала времени. Вертикальные пунктирные линии соединяют сходные по форме аномалии, обозначение сверху соответствующим номером [Новая, 1974; с. 39].

Геология океанского дна также существенно отличается от геологии континентов. Измерения глубин океанов показали, что на дне каждого океана существуют большие горные хребты, названные срединно-океаническими хребтами (рис. 7.12). Наиболее протяженным является Срединно-Атлантический хребт, протянувшийся от Исландии на юг по всей длине Атлантического океана параллельно береговым линиям Африки и Америки и далее на восток южнее Африки в Индийский океан. Аналогичные, но меньшие по размерам хребты есть в Индийском и Тихом океанах. Вдоль хребтов располагаются эпицентры землетрясений (рис. 3.1).

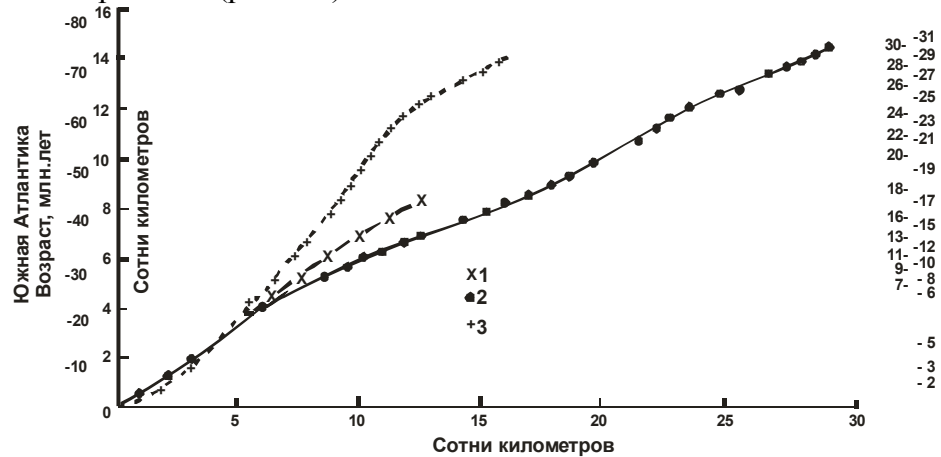


Рис. 7.11. Изменение расстояния от оси хребта до магнитных аномалий в южной части Атлантического океана (профили V-20 SA, рис.6.10.), по отношению к расстоянию до тех же аномалий в южной части Индийского и северной и южной частях Тихого океанов. Цифры справа соответствуют номерам аномалий (см. рис. 7.10). 1 - южная часть Индийского океана, 2 - северная часть Тихого океана, 3 - южная часть Тихого океана [Новая ..., 1974 с. 40].

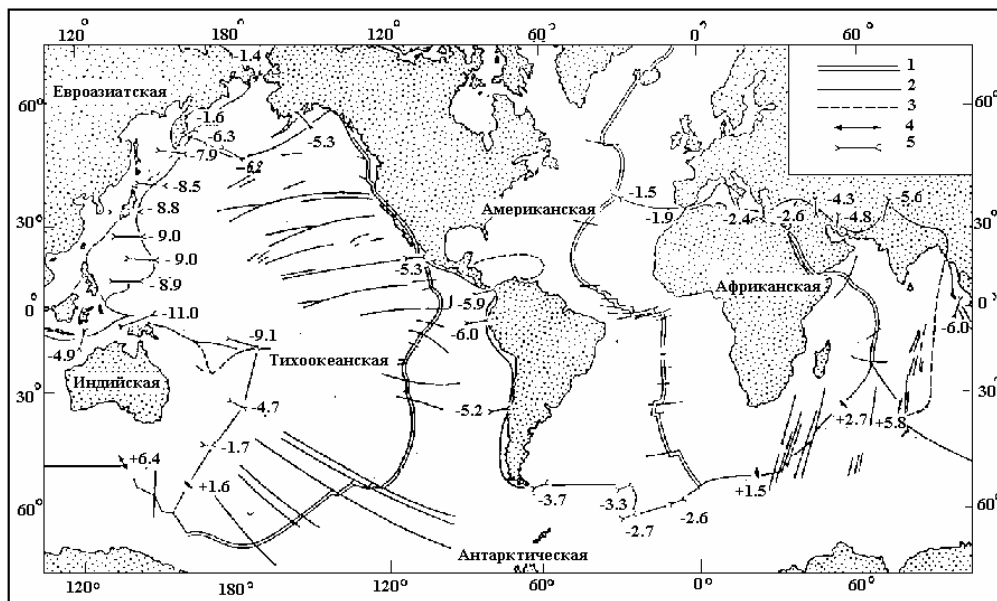


Рис. 7.12. Главные плиты, образующие земную поверхность. Указаны рассчитанные скорости относительных перемещений в Тихоокеанском кольцевом поясе, Альпийско-Гималайском поясе, хребтах южной части Индийского океана и дуге Скоша (скорости в см/год, знаки «+» и «-» относятся к растяжению и сжатию). Расчеты основаны на измеренных значениях скорости разрастания у подводных хребтов. 1 — линии с известной скоростью расширения, 2 — границы блоков с рассчитанным результирующим движением, 3 — границы возможных блоков, не учтенных в расчетах, 4, 5 — результирующее дифференциальное движение, 4 — растяжение, 5 — сжатие [Ботт, 1974; с. 269].

Для объяснения такой структуры океанского дна была выдвинута гипотеза о том, что дно образуется в результате внедрения изверженных пород в центральной части (рифтовые долины) океанических хребтов. Эти породы оттесняются в стороны, когда новая магма изливается в том же самом месте.

За 200-300 млн лет все раздвигающееся океанское дно обновляется, а прежние породы погружаются в мантию в так называемых зонах субдукции.

На основе этой модели Ф. Вайн (F. Vine) и Д. Мэтьюз (D. Matthews) в начале 1960-х гг. объяснили происхождение линейных магнитных аномалий [Новая, 1974, с. 32-37]. После того как расплавы, поднимающиеся из мантии, затвердевают, они приобретают термостатическую намагниченность I_n , соответствующую направлению поля в это время. Новые порции магмы, появляющиеся в том же месте, при охлаждении могут намагнититься уже в поле противоположного знака в результате происходящих с течением времени инверсий. Поэтому чередование положительных и отрицательных аномалий – это результат чередования прямо- и обратномагнитных участков океанской коры. Таким образом, картина линейных магнитных аномалий океана является естественным следствием расширения (спрединга) океанского дна и инверсий геомагнитного поля. Линейные магнитные аномалии океана являются, по существу, палаомагнитными аномалиями, непосредственно связанными с магнитохронологией инверсий геомагнитного поля (рис. 7.10). Такая связь позволяет оценить время, протекающее между образованием любых двух аномалий. Зная их положение на океанском дне, можно рассчитать скорость спрединга дна в данном регионе океана (рис. 7.11).

Происхождение главного магнитного поля Земли

[Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 91-96]

Для того чтобы выдвинуть разумные гипотезы о происхождении главного магнитного поля, необходимо достаточно хорошо знать, во-первых, основные свойства поля и, во-вторых, внутреннее строение Земли. Любая современная теория генерации главного поля не должна противоречить данным о его свойствах, основные из которых, как было показано выше, следующие.

1. В первом приближении главное поле является полем центрального наклоненного к оси вращения Земли магнитного диполя.
2. Напряженность поля изменяется в среднем от 35000 нТл на экваторе до 65000 нТл на полюсах.
3. Магнитный момент земного диполя приблизительно равен $8 \cdot 10^{22} \text{ а} \cdot \text{м}^2$.
4. Главному полю присущи вековые вариации, имеющие дискретный спектр с определенным набором периодов колебаний.
5. Имеет место западный дрейф недипольной части главного поля.
6. Главное поле время от времени изменяет свою поляризацию – происходят инверсии геомагнитного поля через характерные периоды 10^5 - 10^6 лет. Это косвенный результат, полученный по палеомагнитным данным.

Разумеется, ученые-геомагнитологи не откладывали вопрос о происхождении поля на то время, когда выяснятся все его свойства. Можно с уверенностью сказать, что и сейчас далеко не все свойства геомагнитного поля нам известны. Поэтому, начиная с У. Гильберта (1600 г.), выдвигались самые разнообразные, в том числе и совершенно фантастические, гипотезы о происхождении геомагнитного поля, о которых можно прочитать в соответствующих книгах по геомагнетизму. Краткий обзор таких теорий представлен во втором историческом разделе этой главы.

Если говорить о современных теориях геомагнитного поля, то следует начать с теории динамоэффекта Френкеля (1947 г.), который впервые выдвинул разумную идею регенерации поля за счет вихревых движений в жидком электропроводящем ядре. В

дальнейшем основополагающие работы по теории земного динамо выполнили Эльзасер и Буллард. Основой современных теорий являются уравнения Максвелла и гидродинамические уравнения движения жидкости Навье-Стокса и уравнение неразрывности.

Рассмотрим четыре уравнения Максвелла в векторной форме:

$$\operatorname{rot} B = \mu j, \operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \operatorname{div} B = 0, j = \sigma(E + [v \times B]), \quad (7.17)$$

где μ - магнитная проницаемость (она может быть равной μ_0 - абсолютной магнитной проницаемости вакуума), σ - электропроводность, j - плотность тока, E - электрическая напряженность, v - скорость движения проводящей жидкости. Из уравнений Максвелла можно получить уравнение для магнитного поля:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \operatorname{rot}[v \times B] + \frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 B, \quad (7.18)$$

где $\nu_m = \frac{1}{\mu\sigma}$ - магнитная вязкость, которая может рассматриваться как аналог кинематической вязкости.

В последнем уравнении (7.18) помимо B есть еще неизвестное v , для определения которого следует использовать гидродинамические уравнения. Уравнение движения запишем в форме Навье-Стокса в векторном виде:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \nu \Delta^2 v + g - 2[\omega \times v] + \frac{1}{\rho} [j \times B]. \quad (7.19)$$

где ρ - плотность жидкости, P - давление за вычетом гидростатического, член $2[\omega \times v]$ - сила Кориолиса, ω - угловая скорость вращения Земли. Выражая в (7.19) плотность тока j согласно первому уравнению в (7.17), получим уравнение в векторном виде:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \operatorname{grad}) v = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \nu_0 \Delta^2 v + g - 2[\omega \times v] + \frac{1}{\mu\rho} [\operatorname{rot} B \times B]. \quad (7.20)$$

Полученное уравнение (7.20) - есть уравнение движения единицы объема жидкости, ν_0 - ее кинематическая вязкость. Последний член в правой части представляет собой силу Лоренца.

Для полного замыкания системы уравнений магнитной гидродинамики к (7.18) и (7.20) следует еще добавить уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0, \quad (7.21)$$

которое для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) будет иметь вид:

$$\operatorname{div}(v) = 0. \quad (7.22)$$

В принципе, уравнения магнитной гидродинамики дают возможность в случае их строго решения определить, существует ли самовозбуждающееся динамо в ядре Земли.

Однако даже если были бы точно известны все члены уравнений, решение их было бы крайне затруднительно. А если учесть, что в применении к ядру Земли значения многих параметров уравнений либо известны приблизительно, либо вообще неизвестны, то задача гидромагнитного динамо Земли в такой общей постановке в настоящее время неразрешима.

Простейший начальный подход к проблеме генерации главного поля заключается в построении кинематических моделей земного динамо. При этом скорость жидкости считается заданной, а определяется только магнитное поле согласно (7.18). Выбор скорости частично определяется данными наблюдений, частично – соображениями симметрии и самой формой уравнений генерации. Например, наличие западного дрейфа указывает на существование азимутальной скорости и дает порядок ее величины. Уже первые кинематические модели показали, что кроме меридионального (полоидального) поля, которое проникает наружу и наблюдается на поверхности Земли, в земном ядре имеется также гораздо большее азимутальное (тороидальное) поле с замкнутыми силовыми линиями, которое не выходит из ядра наружу. Относительная скорость ядра и мантии возникает за счет значительного магнитного взаимодействия мантии с ядром.

Гидромагнитное динамо (ГД) Земли представляет собой сложную автоколебательную систему [Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971, с. 93], которую можно характеризовать определенным спектром колебаний. Исследования геомагнитных вариаций также обнаруживают, что так называемое "постоянное поле" изменяется довольно сложным образом и грубо схематически может быть охарактеризовано некоторым спектром (рис. 7.13).

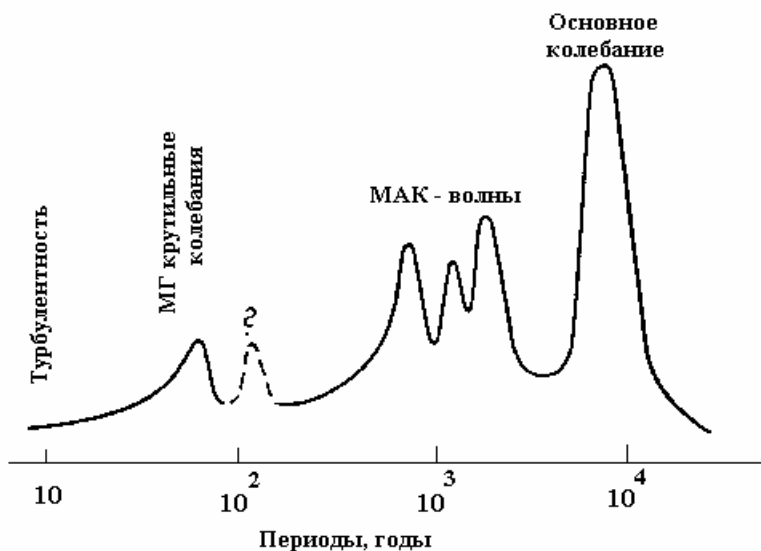


Рис. 7.13. Спектр магнитогеодинамических колебаний в земном ядре [Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971, с. 93].

И эксперимент и теория указывают, что в спектре этих колебаний содержатся частоты трех заметно различающихся величин:

- 1) основная частота, соответствующая периоду около $7,5 \cdot 10^3 \text{ лет}$,
- 2) ряд колебаний "средних" частот, соответствующих периодам $\sim 10^3 \text{ лет}$ (период западного дрейфа),
- 3) колебания высоких частот с периодами $\sim 10^2 \text{ лет}$ и менее.

Кроме линейчатого спектра, колебания ГД содержат также случайную компоненту типа шума - сплошной спектр. Сравнение экспериментального спектра с теоретическим позволяет определить некоторые параметры земного ядра.

С.И. Брагинский рассмотрел кинематические модели с помощью уравнений генерации и показал, что можно подобрать правдоподобные скорости в ядре, которые

приводят к генерации магнитного поля, близкого к реально наблюдающемуся. Из теории вытекает, что наличие несимметричных скоростей, необходимых для генерации поля, вызывает появление соответствующих несимметричных компонент магнитного поля B .

Согласно теории С.И. Брагинского, возникающая в результате действия гидромагнитного динамо генерация главного поля не является стационарной, а испытывает ряд колебаний, которые можно сопоставить с вековыми вариациями геомагнитного поля.

Основное колебание поля с периодом $T \approx 8000$ лет, представляющее изменение дипольной части поля в 1,5 - 2,0 раза, связано, согласно теории, со временем взаимодействия между тороидальными и полоидальными полями в объеме ядра Земли в процессе крупномасштабной конвекции вещества ядра. Колебания с $T \approx 600 - 1800$ лет, обуславливающее движение и распад крупных неоднородностей геомагнитного поля, объясняются неустойчивостью осесимметричного радиального потока вещества в низких широтах, при котором взаимодействие магнитных (M), архимедовых (A) и кориолисовых (K) сил приводит к возникновению так называемых MAK -волн, движущихся в широтном направлении.

60-летние вариации, по С.И. Брагинскому, объясняются крутильными колебаниями в системе ядро-мантия, возникающими при движении альфвеновской волны в жидком ядре Земли. Вариации с $T \approx 4-40$ лет внутриземного происхождения связаны с мелкомасштабными турбулентностями в верхних частях ядра, осуществляющими более эффективное «перемешивание», чем механизм молекулярного переноса.

Существуют и другие подходы к теории происхождения геомагнитного поля, о которых кратко говорилось в историческом разделе в начале этой главы. Теория гидромагнитного динамо является только наиболее распространенной среди геофизиков. Однако и в этой теории разработаны лишь кинематические аспекты, практически не разработанными остаются проблемы динамики и энергетики земного динамо.

Описание современного состояния теории геомагнитного динамо можно найти в работе [Глацмайер, Олсон, 2005]. В соответствие с данными этой работы, можно выделить два важных результата, полученных в последние десятилетия. Во-первых, с привлечением магнитометрических данных, полученных с помощью спутников, установлен факт существования четырех обширных областей на границе ядра и мантии, в которых генерируется большая часть геомагнитного поля. Во-вторых, частота смены полярности геомагнитного поля, «проявляющаяся все более устойчиво за последние 120 млн лет», указывает на возможность «внешнего регулирования» механизма геодинамо, одной из причин которого «может быть перепад температур в нижнем слое мантии, и вследствие этого – изменение в характере излияний ядра».

Электрические эффекты

Согласно данным работы [Физика, 1989, с. 27-28], Земля заряжена отрицательно относительно окружающего ее пространства. Напряженность электрического поля E в непосредственной близости от поверхности Земли порядка 10^2 В/м и экспоненциально падает с высотой. Плотность тока j , текущего в направлении к Земле, равна 10^{-12} А/м² и практически не зависит от высоты. Величина электрического поля E изменяется в течение суток, причем в какой бы точке Земли она не измерялась, максимальное значение ее приходится на время, когда в Лондоне 19 часов. Это так называемая унитарная вариация электрического поля.

Величина электрического заряда Земли $Q = ER^2$ (R – радиус Земли) оказывается порядка $Q \approx 6 \cdot 10^5$ Кл. Суммарный ток утечки I , полученный путем интегрирования по поверхности Земли токов плотности j , оказывается равным $I \approx 10^3$ А. Зная заряд Земли Q и ток утечки I , можно оценить время t , в течение которого заряд Q будет Землей

полностью потерян. Это время оказывается порядка нескольких минут. Так как в действительности Земля своего заряда не теряет и величина поля E довольно стабильна во времени и в различных районах Земли, она должна обладать источником, восполняющем потери электрического заряда. Попытки найти объяснение этому явлению, привлекая грозы как источник, восполняющий потерю электрического заряда, представляются малоубедительными. Также малоубедительными выглядят объяснения унитарной вариации электрического поля максимальным количеством гроз, происходящих в целом на Земле в 19 ч. по лондонскому времени.

Таким образом, есть основания считать, что вопрос о природе электрического поля Земли и причине унитарной вариации поля остается открытым в рамках «холодной» модели Земли. В рамках же «горячей» модели оказывается возможным некоторые особенности электрического поля описать на качественном уровне.

Согласно данным работы [Таблицы ..., 1976; с. 996], в процессе исследований было установлено, что электрические токи в Земле ассоциируются с временными изменениями магнитного поля. Эти токи называются "теллурическими". Если одновременно измерять вариации магнитного и электрического полей, то можно получить представление о распределении электропроводности на глубине.

Плотность теллурических токов для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова и равна 2 А/км^2 . Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким широтам. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит десятков милливольт на километр. В полярных странах напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильные теллурические токи во время магнитных бурь.

Электромагнитные зондирования

[Ваньян, 1997; Хмелевской, Горбачев, Калинин, и др., 2004]

Горные породы обладают электромагнитными свойствами, к которым относятся: удельное электрическое сопротивление, величина, ей обратная – удельная электропроводность, электрохимическая активность, поляризуемость, диэлектрическая и магнитная проницаемости и пьезоэлектрические модули. Изучение этих свойств пород, кроме строения Земли, в целом, способствует также эффективному поиску полезных ископаемых.

Электромагнитные зондирования представляют собой активное воздействие на земные породы путем создания поля определенной конфигурации и регистрации отклика, по параметрам которого и определяют те или иные свойства среды.

Первые методы магниторазведки для определения ярко выраженных магнитных аномалий, связанных с сильно магнитными рудными залежами, были созданы во второй половине XIX века. В России специальные исследования магнитного поля с геологическими целями впервые были проведены на Курской магнитной аномалии в конце XIX века.

Электромагнитные зондирования начали развиваться в конце 20-х годов XX века. В нашей стране получили активное развитие методики зондирования с использованием постоянного тока.

К началу 50-х годов стало ясно, что в рамках только гальванической моды с использованием контуров постоянного тока, невозможно решить ряд важных научных и интересных практических задач. Например - получить надежную информацию об отложениях, заэкранированных высокоомными пластами, определить мощность анизотропных толщ и т.д. Стали развиваться индукционные методики электромагнитного поля, чему способствовали фундаментальные работы, проводимые А.Н. Тихоновым и А.П. Краевым с сотрудниками – в нашей стране, и С.С. Штефанеску – в Румынии.

Большую роль в развитии электромагнитных методов зондирования Земли сыграл в 50-х годах французский геофизик Л. Каньяр.

В нашей стране усилия многих коллективов ученых и практиков Москвы и Ленинграда были объединены организаторским гением А.М. Загармистра, прекрасно понимавшим запросы практики и возможности теории.

В последние десятилетия опубликован ряд фундаментальных работ, исчерпывающе трактующих все виды электромагнитных зондирований. Достаточно полный список публикаций по тематике электромагнитных зондирований можно найти в обобщающих монографиях [Ваньян, 1997; Хмелевской, Горбачев, Калинин и др., 2004], в которых подробно описаны и сами методы электромагнитного зондирования.

Геомагнетизм и жизнь. Диапазон магнитных явлений

Отрицать влияние магнитных полей на живой организм нельзя. Эксперименты на мышах показали, что внешнее магнитное поле задерживает их развитие, замедляет рост клеток, изменяет состав крови. Сильное магнитное поле – десять килоэрстед (10^4 Э) и больше даже способно убить молодые особи. Аналогичные результаты получены и в опытах с другими животными [Лишевский, 1988].

Так как магнитное поле оказывает воздействие на все живое, разработаны допустимые его уровни. Для человека разные исследователи считают безопасным магнитное поле напряженностью 300-700 Э.

Магнитное поле влияет и на растения. Результаты некоторых опытов показали, что всхожесть и рост семян зависят от того, как первоначально они были ориентированы относительно магнитного поля Земли. Изменение внешнего магнитного поля может или ускорять или угнетать развитие растений. Это свойство растений уже используется на практике.

Почему магнитное поле воздействует на человека? На это счет есть несколько гипотез. Одна из них считает, что магнитное поле влияет на протекание в организме некоторых тонких биохимических реакций. И хотя влияние магнитного поля на химические процессы в последнее время тщательно исследуются, физика этого процесса пока не совсем ясна.

Самые сильные магнитные поля, зарегистрированные во Вселенной, создаются нейтронными звездами и пульсарами. В лабораториях удастся достичь магнитной напряженности в сотни тысяч более слабой, да и то на очень короткое время, измеряемое долями секунды. Если бы можно было воспроизводить в лабораторных условиях поля, сравнимые с теми, которые создаются нейтронными звездами, то мы стали бы свидетелями удивительных явлений. Например, железо, имеющее плотность $7,9 \text{ г/см}^3$, под действием такого поля превратилось бы в вещество с плотностью 2700 г/см^3 .

Диапазон магнитных явлений представлен табл. 7.4.

Магнетизм – всеобъемлющее, глобальное свойство природы, но, к сожалению, мы многое о нем не знаем. Нам неизвестно, например, есть ли монополь – частица с одним магнитным полюсом, наподобие положительных или отрицательных заряженных частиц. Законы электродинамики не запрещают существование магнитного монополя, но он пока не обнаружен. До сих пор нет законченной теории земного и солнечного магнетизма, ряда других магнитных явлений в космическом масштабе. Не завершены исследования сверхпроводимости. Возникновение жизни на Земле и ее развитие, скорее всего, связаны с существованием геомагнитного поля и его переполусовками [Викулин, 2008; Викулин, Мелекесцев, 2007; Николаев, 1991]. Овладев тайнами магнетизма, мы не только решим многие задачи, стоящие перед создателями современной техники, но и поймем, как рождаются и умирают миры в окружающем нас пространстве Вселенной.

Таблица 7.4. Диапазон магнитных явлений

Объект	Напряженность поля, Э
Нейтронные звезды, пульсары	$10^{12}-10^{13}$
Внутри атома водорода	10^9-10^{10}
Звезда PG 1031+234	10^8-10^9
Наибольшие поля, полученные в лаборатории	10^7-10^8
Звезда типа «Белый карлик»	10^7
Радиогалактики	10^5-10^6
Поле в установке «Токомак-15»	10^4-10^5
Солнечные пятна	10^3
Школьный магнит (U-образный)	10^2
Солнце	1
Земля	0,5
На границе магнитосферы Земли	10^{-3}
Межпланетное пространство вблизи орбиты Земли	$10^{-4}-10^{-5}$
Сердце человека	10^{-6}
Межзвездная среда	10^{-8}
Мозг человека	10^{-9}
Достигнутый в лаборатории предел измерений	10^{-14}

Глобальные магнитные аномалии как самоорганизующаяся система токовых контуров в ядре Земли

Число крупномасштабных аномалий достаточно велико, разными исследователями их выделяется достаточно большое для Земли количество – от 4-6 до 8-12. Более того, как уже отмечалось выше со ссылкой на работу [Кузнецов, 2008] и другие работы, в распределении таких аномалий наблюдаются вполне определенные закономерности: они зарождаются, как правило, в районе экватора, затем дрейфуют в сторону запада или в сторону запада и к полюсам, затем, уменьшаясь по величине, «отмирают», рождая новые аномалии. При этом каждая из аномалий, в соответствии с современными представлениями, генерируется соответствующим кольцевым током с несимметричной относительно оси вращения Земли конфигурацией и, следовательно, имеет собственный магнитный момент, не совпадающий по направлению с моментами других аномалий. Таким образом, все глобальные аномалии должны взаимодействовать как между собой, так и с магнитным моментом Земли. Все это указывает на то, что кольцевые токи, генерирующие глобальные магнитные аномалии, по сути, должны представлять собою некую взаимосвязанную самосогласованную систему, анализ которой в первом приближении может быть выполнен с помощью следующих за дипольными членами разложения – квадрупольными коэффициентами.

Из данных табл. 7.3 видно, что квадрупольные члены разложения g_2^0 , g_2^1 , g_2^2 и h_2^1 , h_2^2 , со временем меняются более сложным образом, чем дипольные. Согласно [Орленок, 2000, с. 162] они «испытывают сложные изменения – либо попеременно, либо устойчиво разрушаются, либо увеличиваются». Анализируя особенности магнитных аномалий Земли В.В. Кузнецов [2008, с. 182] в своих выводах идет еще дальше, по сути, определяя «парный» механизм взаимодействия аномалий: «В магнитном поле Земли, как в атмосферах Сатурна и Юпитера, возникли и продолжают существовать две пары вихрей. Одна пара вихрей состоит из двух антициклонов, другая – из циклона-антициклона. Пара циклон-антициклон: Бразильская – канадская аномалии на Земле и атмосферные вихри: Ультрафиолетовое пятно и Пятна Анны – на Сатурне».

В начале 20 в. русский физик Н.А. Умов впервые дал интерпретацию коэффициентов Гаусса и ввел понятие *мультиполя* – магнитного потенциала особого

распределения, имеющего определенные оси симметрии, число которых определяется порядком коэффициента [Яновский, 1964, с. 93-97]. В соответствии с этим определением, квадруполем называется совокупность двух диполей, параллельных друг другу, но противоположно направленных и находящихся на малом (по сравнению с радиусом Земли) расстоянии друг от друга. Слагаемые в (7.10), ответственные за эту составляющую поля, имеют нижний индекс $l = 2$. Такому квадруполу могут соответствовать токовые системы, генерирующие четыре наиболее крупные магнитные аномалии (рис. 7.2), получившие название Канадской, Сибирской, Бразильской и Южной [Кузнецов, 2008, с. 159]. Как отмечалось выше, кроме западного дрейфа, магнитные аномалии имеют тенденцию смещаться к полюсам. По данным Т. Рикитак [1968, с. 115-119], такая квадрупольная система совершает гармонические колебания с периодом порядка 100 лет.

Система, состоящая из двух квадруполей, т.е. из восьми магнитных глобальных аномалий, называется мультиполем и описывается следующими членами разложения в (7.10) с $l = 3$ [Яновский, 1953, с. 105].

Как видим, имеются вполне определенные данные, которые указывают на существование физически обоснованного механизма «самоорганизации», управляющего глобальными аномалиями геомагнитного поля. И не маловажную самоорганизационную роль в таком механизме играют именно вихревые движения жидкости в ядре Земли, которые в рамках задачи Дирихле (см. главы 1 и 2) интерпретируются как s-эллипсоиды Римана [Кондратьев, 2003, с. 30].

Литература

- Большаков А.С., Солодовников Г.М. Напряженность геомагнитного поля в последние 400 млн лет // Докл. АН СССР. 1981. Т. 80. № 6. С. 1340.
- Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 375 с.
- Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.
- Викулин А.В. Мир вихрей. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.
- Викулин А.В. Мелекесцев И.В. Вихри и жизнь // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 39-101.
- Глацмайер Г., Олсон П. Изучение геодинamo // В мире науки. 2005. № 7. С. 29-35.
- Григорьев В.И., Григорьева Е.В., Ростовский В.С. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М.: Физматлит, 2003. 192 с.
- Джекобс Дж. Земное ядро. М.: Мир, 1979. 305 с.
- Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. М.: Мысль, 1979. 622 с.
- Дорфман Я.Г. Всемирная история физики. С древнейших времен до конца XVIII века. М.: КомКнига, 2007а. 352 с.
- Дорфман Я.Г. Всемирная история физики. С начала XIX до середины XX вв. М.: КомКнига, 2007б. 320 с.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В. Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. М.: Наука, 1971. 384 с.
- Кондратьев Б.П. Теория потенциала и фигуры равновесия. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 624 с.
- Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 367 с.
- Лишевский В. Магнетизм // Наука и жизнь. 1988. № 2. С. 31-32.
- Николаев Г. Магнитное поле Земли слабеет. Опасны ли последствия этого? // Наука и жизнь. 1991. № 1. С. 44-50.
- Новая глобальная тектоника / Ред. Л.П. Зоненшайн, А.А. Ковалев. М.: Мир, 1974. 472 с.

- Орленок В.В.* Основы геофизики. Калининград: Калининградский ГУ, 2000. 446 с.
- Паркинсон У.* Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 525 с.
- Петрова Г.Н., Поспелова Г.А.* Экскурсы геомагнитного поля // Земля и Вселенная. 1992. № 3. С. 3-7.
- Почтарев В.И.* О динамике каспийского центра вековых изменений магнитного поля Земли // Геомагнетизм и Аэрономия. 1978. Т. 10. № 9. С. 183-185.
- Рикитаке Т.* Электромагнетизм и внутреннее строение Земли. Л.: Недра, 1968. 332 с.
- Советский энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1985. 1600 с.
- Стейси Ф.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.
- Таблицы физических величин / Ред. И.К. Кикоин. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е., Шрейдер А.А.* Основы экологической геофизики. СПб: Изд-во «Лань», 2004. 384 с.
- Тяпкин К.Ф.* Физика Земли. Киев: Вища школа, 1998. 312 с.
- Физика Земли. Новый взгляд на некоторые проблемы / В.В. Кузнецов, Н.Н. Семаков, В.Н. Доровский, П.Е. Котляр. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с.
- Физический энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: «Советская энциклопедия», 1983. 928 с.
- Хмелевской В.К.* (ред.) Геофизика. Учебник. М.: КДУ, 2007. 320 с.
- Хмелевской В.К., Горбачев Ю.И., Калинин А.В., Селиверстов Н.И., Шевнин В.А.* Геофизические методы исследований. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2004. 232 с.
- Храмов Ю.А.* Физики. Биографический справочник. М.: Наука, 1983. 400 с.
- Яновский Б.М.* Земной магнетизм. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1953. 592 с.
- Яновский Б.М.* Земной магнетизм. II. Теоретические основы магнитометрического метода исследования земной коры и геомагнитные измерения. Л.: ЛГУ, 1963. 462 с.
- Яновский Б.М.* Земной магнетизм. I. Морфология и теория магнитного поля Земли и его вариаций. Л.: ЛГУ, 1964. 446 с.
- Яновский Б.М.* Магнитное поле Земли. Л.: Знание, 1967. 48 с.
- Barton C.E., Hutchinson R., Quilty P. et al.* Quest for the magnetic poles: relocation of the South magnetic pole at sea, 1986. Record Bureau of Mineral Resources, geology and geophysics. 1986. 20 p.
- Bauer L.A.* Beitrage zur Kenntniss des Wesens der Sakular-variation des Erdmagnetismus. Dissertation of Univer. Berlin. 1895. 195 p.
- Bullard E.C.* The removal of trend from magnetic surveys // Earth Planet Sci. Lett. 1967. V. 2. № 4. P. 293-300.
- Courtillot V. et al.* Su rune acceleration recente de la variation seculaire du champ magnetique terrestre. C.R. Acad. Sci. Paris. Ser. D. 1978. V. 287. P. 1095-1098.
- Dawson E., Newitt L.R.* The magnetic poles of the Earth. J. Geomag. Geoelectr. 1982. V. 34. P. 225-240.
- Madden T., Le Mouel J.L.* The recent secular variation and the motion at the core surface. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1982. V. A 306. P. 271-280.
- Yukutake T., Tachinaka H.* The non-dipole part of the Earth's magnetic field. Bull. Earthquake Res. Inst. 1968. N 46. P. 1027-1074.

8. ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Развитие представлений о тепловом состоянии Земли, тепловых явлениях и возрасте Земли. Тепловой баланс Земли. Геотермические измерения на континентах и в океане. Определение теплового потока и геотермического градиента, их связь с основными, структурными единицами земной коры. Особенности тепловых полей в зонах перехода от континента к океану. Механизмы переноса тепла в Земле: теплопроводность, перенос тепла излучением, тепловая конвекция. Способы оценки температуры в земной коре. Температура в мантии: понятие о верхнем и нижнем пределах, экспериментальное определение температуры плавления, формула Клаузиуса-Клайперона. Температура в ядре Земли: температура плавления ядра, адиабатическая температура. Обобщенная температура по радиусу Земли.

Развитие представлений о тепловом состоянии Земли, о тепловых явлениях и возрасте Земли

2 млн - 4 тыс лет назад. Жрецы древнего Вавилона, основываясь на положении звезд и по их движению, пытались доказать, что наша планета существует около 2 млн лет. Старинные персидские сказания утверждают, что Земля существует около 10-12 тысячелетий. В Библии подробно рассказывается о том, что Мир был создан за шесть дней. Однако библейские высказывания относительно возраста планеты и времени возникновения на Земле жизни довольно туманны. Различные теологические изыскания и расчеты, как правило, определяли продолжительность существования нашей планеты около 4-5,5 тысячи лет [Ясаманов, 1988].

1500 г. до н.э. Взрыв вулкана Санторин (о. Тира в Средиземном море), с которым связывают гибель минойской цивилизации [Болт, Хорн, Макдоналд, Скотт, 1978, с. 169-171]. Согласно гипотезе доктора наук, сотрудника Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН И.В. Мелекесцева, с этим извержением связана гибель легендарной Атлантиды. Уничтожение древней цивилизации явилось результатом выпадения пепла и следами прохождения ударной волны, мощность которой превосходила мощность ударных волн, зарегистрированных при самых мощных термоядерных взрывах на поверхности Земли и в ее атмосфере, а также результатом одного или нескольких цунами, сопровождавших обрушение вулканической постройки [Викулин, 2008, с. 176].

7-6 вв. до н.э. Фалес Милетский (625-547) - основатель философской школы, поставил вопрос о необходимости сведения всего многообразия явлений к единой основе, которой он считал воду – «влажную природу» [Ацюковский, 2003, с. 48; Дорфман, 2007а, с. 39].

Анаксимандр (610-546), ученик Фалеса, ввел понятие первоначала – апейрона или эфира [Ацюковский, 2003, с. 48-50], который порождает враждующие стихии – «холодное» и «горячее», т.е. огонь и воду [Исаков, 2004, с. 47-49].

5-4 вв. до н.э. Философ Гераклит (ок. 530-470) из Эфеса высказал мнение, что элементарной субстанцией должен быть огонь [Дорфман, 2007а, с. 39].

Анаксагор (500-428) из г. Клазомен (Малая Азия) высказал предположение, что имеется бесконечное число элементарных составляющих материи. В теории материи Анаксагора имеются два фундаментальных понятия. Во-первых, семена – «бесчисленные подбочастные», и, во-вторых, противоположные качества – светлое и темное, сухое и влажное, теплое и холодное. Помимо семян и противоположных качеств, Анаксагор полагал, что во Вселенной существуют стихии, т.е. заполняющее все пространство среды – земля, вода, воздух и огонь [Дорфман, 2007а, с. 40]. Также Анаксагор считал, что началом всего является стремительный вихрь, движущийся вокруг Земли и несущий Солнце – раскаленную металлическую или каменную глыбу [Исаков, 2004, 49-50].

В книге *Платона* (428/427-347) «Тимэй» (середина 4 в.) изложено его молекулярное учение. В основе учения заложены представления о корпускулярном строении всех четырех стихий предыдущих мыслителей (при этом он предполагал существование нескольких видов огня), о теплороде (как о материи огня) и о механике фазовых превращений [Дорфман, 2007а, с. 49-56, 83].

Тепло, по словам Платона, это то, что остается от огня в накаливаемых телах, когда пламя потушено.

Понятие теплорода в античную философию было занесено вместе со своими «братьями» Огнем и Светом из древнейших сказаний Востока. Оно господствовало и сохраняло свою власть над умами на протяжении более двух тысячелетий. Материя тепла упорно продолжала оставаться в физике и химии и тогда, когда была окончательно «потушена» сама теория флогистона – химического элемента тепла, и упразднено понятие материи огня или пламени, и даже тогда, когда теория материи света уступила волновой оптике [Дорфман, 2007б, с. 72].

3 в. до н.э. *Аристотель* (384-322) принял за основу четыре элементарных качества: земля, вода, воздух и огонь. Других элементов в природе быть не может, так как одновременное сочетание взаимно противоположных качеств – сухое и влажное, теплое и холодное – в одном предмете явно невозможно [Дорфман, 2007а, с. 58].

Начало н.э. На протяжении первых веков нашей эры появляется ряд комментариев «Физики» Аристотеля.

3 в. *Темистий* (320-390): «Быть может, прилегающий (к движущемуся телу – А.В.) воздух не только приходит в движение, но и приобретает сам силу приводить в движение, как я думаю, аналогично предмету, нагретому огнем. Такой предмет не только становится горячим, но и сам приобретает также силу нагревать и сохраняет ее непрерывно в течение некоторого времени... Подобно этому, воздух или вода... ставится, так сказать, самодвижущимися, и на некоторое время они оба одновременно и движутся и приводят в движение... Точно так же вода, нагретая огнем, не только остается теплой после удаления огня, но в течение долгого времени сохраняет способность нагревать» [Дорфман, 2007а, с. 73].

5 в. *Прокл* (410-485), последователь Платона, приходит к выводу о том, что «частишки огня или тепла» должны обладать быстрым движением [Дорфман, 2007а, с. 56].

14 в. Ректор Парижского университета *Жан Буридан* (*Buridan*, ок. 1300-1358) проводит аналогию между способностью тела вместить некоторое количество тепла и его способностью воспринимать некоторое количество напора. Выражаясь современным языком – между «теплоемкостью тела» и его «массой», являющейся как бы емкостью импульса – *impetus*'а [Дорфман, 2007а, с. 101-104].

17 в. – век опытной науки. Капиталистический способ производства в Западной Европе становится не только наиболее распространенным, но и считается широкими кругами населения того времени самым совершенным. А это означает постепенное проникновение количественных оценок во все звенья практической деятельности [Дорфман, 2007а, с. 129, 131].

1620 г. Выход в свет трактата *Ф. Бэкона* (*Bacon*, 1561-1626) «Новый органон», в котором, среди прочего, по замечанию Х. Гюйгенса, предложены «очень хорошие методы для построения лучшей философии – делать опыты и правильно их использовать. Он дал пример успеха этого метода в отношении теплоты тел, о которой он заключил, что она есть не что иное, как движение частиц, из которых они состоят» [Дорфман, 2007а, с. 189-190; Советский, 1985, с. 185].

1654 г. Ирландский архиепископ *Дж. Уссер* рассчитал, что мир был создан за 2004 года до рождения Иисуса Христа 26 октября в 9 часов утра.

Естествоиспытатели 17 в., наверное, были первыми, кто попытались оценить возраст Земли научными методами на основе уже известных скоростей, с которыми протекают некоторые геологические процессы. *Э. Галлей* (*Halley*, 1656-1742) исходя из

скорости накопления солей в морях и океанах и существующего баланса, установил, что наша планета существует около 10 тысяч лет.

Начало 20 в. Используя этот же метод, ученые установили, что возраст современных океанических впадин превышает 100 млн лет [Ясаманов, 1988].

1665 г. «Торичеллиева трубка» превращается в барометр – прибор по измерению давления [Дорфман, 2007а, с. 174].

Середина 17 в. Французский физик *Ж.П. Морен* (1583-1656) предпринял попытку теоретически определить температуру, получающуюся при смешении двух порций различно нагретой жидкости. Полученные им результаты были очень неопределенными. При своих определениях Морен пользовался термометром, изобретенным военным немецким инженером *Отто фон Герике* (1602-1686) [Дорфман, 2007а, с. 172, 314].

Вторая половина 17 в. Для измерения тепловых величин используются термоскопы и очень грубые термометры [Дорфман, 2007а, с. 312].

1671 г. Во Франции выходит в свет «Курс физики» *Жака Поро* (*Poro*). В части, касающейся теплоты, Поро придерживался трактовки Р. Бойля, приводя все его основные аргументы [Дорфман, 2007а, с. 193-194].

1675 г. Выход в свет фундаментального труда *Р. Бойля* (*Boyle*, 1627-1691) «On the Mechanical Origin of Heat and Cold», из которого следует, что Бойль, развивая идею Бэкона о тепловом движении частиц, до конца понимал и экспериментально продемонстрировал превращение упорядоченного механического движения в беспорядочное тепловое движение. Бойль принципиально отличает горение от нагрева. Он экспериментально исследовал вопрос о возможности возникновения тепла от трения в безвоздушном пространстве, чем было доказано, что воздух не требуется для нагрева посредством трения [Дорфман, 2007а, с. 189-191].

18 в. Тепловые явления стали привлекать к себе все более широкое внимание с практической точки зрения. Машиностроительная и химическая промышленность остро нуждались в точном измерении тепловых величин, поскольку этим определяется повторяемость технологических условий, а, следовательно, устойчивость качества выпускаемой продукции. В первую очередь это проявилось в усовершенствовании приборов, служивших для измерения температуры. Термоскопы и очень грубые термометры постепенно приобретают характер точных измерительных инструментов по мере того, как для градуировки их используются постоянные точки [Дорфман, 2007а, с. 312].

Почти все ученые в течение этого века полагали, что «движение, в котором состоит теплота, является дрожанием или колебанием частиц, но не самого нагретого тела, а частиц тонкой и очень упругой всепроникающей жидкой материи, по сути, платоновского теплорода. Эта материя заключена в порах нагретого тела или в промежутках между его частицами. Она распределена по всей Вселенной и легко проникает в наиболее плотные тела; эта материя... будучи видоизменена различными путями, вызывает свет, а также явления электричества, магнетизма и т.д.» [Дорфман, 2007а, с. 310].

1701 г. *И. Ньютон* опубликовал заметку «Шкала степеней теплоты и холода», в которой описывается термометр, наполненный льняным маслом. В этой работе Ньютон употребил термин «calor», который переводился различными исследователями как «нагретость», «температура» или «количество тепла». Таким образом, в самом начале 18 в. физики хотя и различали понятия температуры и количества тепла, но не имели еще надлежащей терминологии для их обозначения [Дорфман, 2007а, с. 312-313].

1702 г. Французский физик *Амонтон* (*Amontons*) описал изобретенный им воздушный термометр [Дорфман, 2007а, с. 313].

1724. Амстердамский коммерсант и физик-любитель *Г. Фаренгейт* (*Fahrenheit*, 1686-1736) продолжил эксперименты Морена. Он предложил принять за постоянную точку температуру смеси воды и льда с нашатырным спиртом, обозначив ее числом 32. За вторую точку он принял температуру человеческого тела, обозначив ее числом 92.

Позднее он принял за вторую точку температуру кипения воды, обозначив ее цифрой 212. В настоящее время один градус температурной шкалы Фаренгейта $1^{\circ}F$ равен $1/180$ разности температур кипения воды и таяния льда при атмосферном давлении, а точка таяния льда имеет температуру $+32^{\circ}F$. Температура по Фаренгейту ($t^{\circ}F$) связана с температурой по Цельсию ($t^{\circ}C$) соотношением $t^{\circ}C = 5/9(t^{\circ}F - 32)$ [Дорфман, 2007а, с. 313; Советский, 1983, с. 1392].

1730 г. Известный французский естествоиспытатель *Р. Реомюр* (*Reaumur*, 1683-1757) отметил на своем термометре температуру таяния льда 0° , а кипения воды 80° [Дорфман, 207а, с. 313]. Т.е. один градус шкалы Реомюра $1^{\circ}R$ равен $1/80$ разности температур кипения воды и таяния льда при атмосферном давлении, т.е. $1^{\circ}R = 5/4^{\circ}C$ [Советский, 1983, с. 1116].

1742 г. Шведский астроном *А. Цельсий* (*Celsius*, 1701-1744) из Упсалы стал изготавливать термометры, у которых низшая постоянная точка, соответствовавшая плавлению льда, обозначалась цифрой 100° , а верхняя, соответствовавшая кипению воды, - цифрой 0° . Шкала была перевернута в 50-х гг. 18 в. и с тех пор известна как шкала Цельсия $t^{\circ}C$ [Дорфман, 2007а, с. 313; Советский, 1983, с. 1462].

В России применялся термометр петербургского академика француза *О.Н. Делиля* (*J. Delisle*, 1688-1768), на шкале которого точка таяния льда обозначена цифрой 150° , а точка кипения воды – цифрой 0° . М.В. Ломоносов (1711-1765) пользовался в своих исследованиях термометром О.Н. Делиля, но с перевернутой шкалой.

Таким образом, каждый исследователь измерял температуру с помощью того термометра, который случайно имелся в его распоряжении [Дорфман, 2007а, с. 313].

1739 г. В «Курсе физики» *Питер ван Мушенбрека* тепловые явления рассматривались в разделе «Огонь». В основе феноменологической теории теплоты лежало упомянутое выше представление о тепловом движении частиц огня, передающих свое движение атомам вещества.

Лишь очень немногие физики были в ту эпоху сторонниками кинетической теории атомов вещества. К ним принадлежали, прежде всего, *Д. Бернулли* (*D. Bernoulli*, 1700-1782) и *М. Ломоносов*, пытавшиеся развивать микроскопические кинетические представления [Дорфман, 2007а, с. 311].

1744-1746 гг. Немец *Г.В. Крафт* (*Kraft*, 1701-1754), академик Петербургской академии, пользуясь термометром Фаренгейта, вывел формулу для вычисления результирующей температуры смеси двух одинаковых жидкостей.

Середина 18 в. Исследования Крафта были продолжены петербургским профессором *Г.В. Рихманом* (1711-1753) для смеси, состоящей из многих жидкостей.

1750-е гг. Шотландский физик *Дж. Блэк* (*Black*, 1728-1799), тщательно избегавший популярности, начал пионерные работы по калориметрическим исследованиям веществ.

1770 г. Шведский физик *И.К. Вильке* попытался распространить формулу Рихмана на смеси веществ, отличающихся по своему составу, и пришел к явно неправильным результатам. Вильке так и не смог установить причины неудачи.

1772 г. *Дж. Блэк* подробно сообщает о результатах своих калориметрических измерений в своих лекциях и они, таким образом, становятся достоянием всего мира.

1784 г. Финский физик *И. Гадолином* (1760-1852), используя представление об удельной теплоемкости, получил правильную формулу для определения температуры смеси разных по составу жидкостей [Дорфман, 2007а, с. 314-316].

1747-1749 гг. В «Трудах Петербургской академии» публикуется несколько работ *М.В. Ломоносова*: «Размышления о причине теплоты и холода», «Опыт теории упругости воздуха» и др., в которых предпринимается попытка выяснить характер теплового движения молекул и объяснить на основе кинетических представлений упругие свойства газов. В этих работах Ломоносов активно выступает против теории теплорода как специфической тепловой материи [Дорфман, 2007а, с. 324-325].

1780-е гг. *А. Лавуазье (Lavoisier, 1743-1794)* удалось вскрыть подлинную природу химических процессов горения и доказать полную несостоятельность теории огня – флогистона – как химического агента. При этом у А. Лавуазье не хватило духа «замахнуться» на сокрушение концепции теплорода, хотя для этого у него были все данные [Дорфман, 2007а, с. 311-312].

1783 г. *А. Лавуазье и П. Лапласом (Laplace, 1749-1827)* опубликован мемуар «О теплоте», в котором проведены прецизионные измерения удельной теплоемкости с помощью изобретенного ими ледяного калориметра. Эти исследования привели к открытию изменения объема тела при изменении его температуры – теплового расширения [Дорфман, 2007а, с. 318-320; б, с. 82].

1791-1792 гг. Появились работы женевого физика *Пьера Прево (1751-1839)* «О равновесии огня» и «Физико-механические исследования теплоты», в которых впервые была предложена новая концепция этих явлений – теория теплового равновесия [Дорфман, 2007а, с. 340-341].

1803 г. Изданы лекции Дж. Блэка одним из его учеников *Дж. Робайсоном*. Стало ясно, что *Дж. Блэк* внес в науку о теплоте наиболее крупный вклад. Блэк, прежде всего, обратил внимание на то, что «тепло постоянно и легко передается от нагретых тел окружающим их более холодным телам, и, когда оно переходит от одного к другому, оно проникает во все виды материи без исключения». Это свойство рассматривается Блэком как одно из наиболее фундаментальных свойств тепла. Дж. Блэк впервые обратил внимание на то, что при постепенном нагревании льда наблюдается задержка в росте температуры, которая поразила его своим несоответствием с обычным мнением о роли тепла в процессе плавления. «Большое количество тепла или теплорода, входящего в тающий лед, не производит никакого другого эффекта, кроме как сообщает ему жидкотекучесть». Именно Блэк назвал эту теплоту «скрытой теплотой» [Дорфман, 2007а, с. 317].

Начало 19 в. Впервые физика предстает как цельная самостоятельная наука. В области изучения теплоты постепенно укреплялись представления об агрегатных состояниях. Открыто понятие теплоемкости. Теория теплорода господствует, но одновременно к концу 18 в. набирает силу и кинетическая теория теплоты [Дорфман, 2007а, с. 346-347].

И в то же время: «Все гипотезы, все более или менее остроумные предположения, которые господствовали в первой половине прошлого столетия, - писал *Г. Кювье (Cuvier, 1769-1832)* в отчете первому консулу Франции Бонапарту, - теперь дискредитированы истинными людьми науки. ... Только эксперименты, прецизионные эксперименты, сделанные посредством взвешивания, измерения и расчетов, примененные путем сопоставления ко всем веществам и на всех веществах подтвержденные, - таков сегодня единственно законный путь рассуждений и доказательств» [Дорфман, 2007б, с. 5].

Первая половина 19 в. Первым важнейшим событием в физике этой эпохи является устранение пережитков в физических теориях света, магнетизма и теплоты. Крушение теории теплорода сопровождается вторым важнейшим событием – открытием фундаментального закона энергетической эквивалентности и превратимости всех видов движения и взаимодействия – закона сохранения энергии. Насущные требования повседневной практики заставили инженеров самостоятельно разработать упрощенные методы в области теплоты в связи с расширяющимся производством и применением паровых машин, а также разнообразных нагревательных, сушильных и других устройств.

1815-1883 гг. Индонезия находится на западном краю «огненного кольца» - зоны мощнейшей вулканической активности и частых землетрясений. Плотность населения достигает 500 человек на км² [Маршалл, Стэнмейер, 2008]. Наиболее крупное за историческое время извержение на планете наблюдалось на вулкане *Тамбора в 1815 г.*, который считался потухшим. Общий объем выброшенных при извержении горных пород

составил около 100 км^3 , выделившаяся энергия близка 10^{20} Дж , число погибших – 92 тыс. человек.

Следующее катастрофическое извержение в регионе произошло на вулкане *Кракатау* в 1883 г. Параксизмальная фаза извержения длилась всего два дня и представляла собой серию гигантских взрывов, сильнейший из которых 27 августа был слышен на расстоянии 4800 км. Пепел был выброшен в стратосферу на высоту 80 км. В радиусе 150 км воздушной волной были выбиты все окна. Общий объем выброшенных продуктов извержения составил около 16 км^3 , выделившаяся энергия около 10^{18} Дж [Болт, Хорн, Макдоналд, Скотт, 1978, с. 167-169; Викулин, 2008, с. 178; Гущенко, 1979, с. 61, 66; Макдоналд, 1975, с. 65].

1824 г. В Париже вышла маленькая книга инженера *Сади Карно* (*Carnot*, 1796-1832) «Размышление о движущей силе огня и машинах, способных развивать эту силу». В книге было введено понятие об обратимом круговом процессе (названного впоследствии циклом Карно), состоящем из двух изотермических и двух адиабатических процессов. Доказано, что коэффициент полезного действия (*КПД*) тепловой машины не зависит от свойств рабочего тела, определяется температурами нагревателя и охладителя и не может быть больше *КПД* цикла Карно. По сути, Карно уже опирается на первое начало термодинамики – принцип невозможности *perpetuum mobile* (вечного двигателя) первого рода.

Книга обратила на себя внимание лишь десять лет спустя и данные, изложенные в ней, по сути, явились основой новой науки, названной в 1854 г. *лордом Кельвиным* термодинамикой [Дорфман, 2007б, с. 74-77; Советский, 1985, с. 549-550; Физический, 1983, с. 244].

1830 г. Выход в свет во Франции и получившего широкое распространение в Европе справочника физика *Ж. Пекле* (*J. Peclet*) «О теплоте и о ее применении в искусствах и ремеслах», в котором рассматриваемая эпоха характеризуется появлением прикладной физики и, как следствие, расширением фактического материала самой физики [Дорфман, 2007б, с. 9-10].

1834 г. Французский физик и инженер *Б. Клапейрон* (*Clapeyron*, 1799-1864) математически переработал теорию Карно и определил кривую фазового перехода первого рода (плавления, парообразования и др.).

1840-1842 гг. Молодым немецким корабельным врачом *Р. Майером* (*Mayer*, 1814-1878), сопровождавшим судно, плывшее из Европы в Индонезию, на основании наблюдений за цветом крови матросов, исходя из теории Лавуазье, согласно которой животная теплота есть результат процесса горения, фактически, открыт закон сохранения энергии [Дорфман, 2007б, с. 83].

1843 г. Пивоваром и физиком *Дж. Джоулем* (*Joule*, 1818-1889) экспериментально обосновывается закон сохранения энергии и устанавливается механический эквивалент тепла, равный $1 \text{ ккал} = 426,9 \text{ кгс}\cdot\text{м}$; $1 \text{ Дж} = 0,239 \text{ кал} = 0,102 \text{ кгс}\cdot\text{м}$ [Дорфман, 2007б, с. 78; Советский, 1985, с. 385; Физический, 1983, с. 417].

1847 г. *Г. Гельмгольц* (*Helmholtz*, 1821-1894) произносит речь, в которой впервые математически строго обосновывается закон сохранения энергии [Дорфман, 2007б, с. 80-82; Советский, 1985, с. 284; Физический, 1983, с. 701-702].

1848 г. *Лорд Кельвин* ставит вопрос о создании абсолютной шкалы температур [Дорфман, 2007б, с. 124].

1850 г. Немецкий физик *Р. Клаузиус* (*Clausius*, 1822-1888) усовершенствовал зависимость фазового перехода первого рода (уравнение Клапейрона-Клаузиуса), дал одновременно с *У. Томсоном* (*лордом Кельвиным*) первую формулировку второго начала термодинамики (устанавливает необратимость макроскопических процессов, протекающих с конечной скоростью) [Советский, 1985, с. 586, 1334; Физический, 1983, с. 94-95].

Вторая половина 19 в. Ознаменовалась огромными успехами почти во всех областях естествознания. Завершается становление классической физики. Паровая машина стала в этот период основным двигателем, как в промышленности, так и на транспорте. В центре внимания оказался вопрос экономичности и повышения эффективности паровых машин. Резко возросла потребность в инженерах. Это привело, прежде всего, к созданию учебных физических лабораторий при высших учебных заведениях и разделению физики на теоретическую и экспериментальную [Дорфман, 2007б, с. 87-93].

1865 г. *З. Клаузиус* показал, что процесс превращения теплоты в работу подчиняется определенной физической закономерности – второму началу термодинамики, которое можно сформулировать строго математически, если ввести особую функцию состояния - энтропию – меру необратимости рассеяния энергии [Советский, 1985, с. 586; Физический, 1983, с. 903-904].

1881 г. На Международном геологическом конгрессе в Болонье утверждена принятая сейчас геохронологическая шкала, отражающая порядок чередования различных слоев коры и дающая представление о продолжительности «относительного времени» - о продолжительности отрезков времени между слоями [Ясаманов, 1988].

1883 г. Русский физик *В.А. Михельсон* (1860-1927) в работе «Второй закон термодинамики с точки зрения аналитической механики и теории вероятностей» подчеркнул, что обоснование его «на чисто механической почве» вообще вряд ли возможно без применения теории вероятностей [Дорфман, 2007б, с. 134].

1895 г. *П. Кюри* (*Curie*, 1859-1906) установил независимость магнитной восприимчивости диамагнетиков от температуры и ее обратно пропорциональную зависимость от температуры для парамагнетиков (закон Кюри). Открыл для железа существование температуры, выше которой у него исчезают ферромагнитные свойства (точка Кюри) и скачкообразно изменяются некоторые другие свойства, например, удельная электропроводность и теплоемкость [Храмов, 1983, с. 150].

1896 г. *А. Беккерель* (*Becquerel*, 1852-1908) обнаружил явление спонтанного испускания лучей, проникающих сквозь черную бумагу, явление, которому впоследствии *М. Складовская-Кюри* (*Skłodowska-Curie*, 1867-1934) дала название радиоактивности [Дорфман, 2007б, с. 158, 175].

1897-1899 гг. *П. Кюри* (*Curie*, 1859-1906) совместно с *М. Складовской-Кюри* открывают новые радиоактивные элементы полоний и радий, наведенную радиоактивность и исследуют свойства радиоактивного излучения [Храмов, 1983, с. 150]. На основании радиоактивного распада урана, содержащегося в минералах и горных породах, и превращения его в свинец, а в последствии и на основании калий-аргонового, рубидий-стронциевого, свинцового, самарий-ниодимового и радио-углеродного методов, были составлены шкалы абсолютного летоисчисления нашей планеты, возраст которой оценивается в 4,6 млрд лет. Определения возраста метеоритов позволило определить и возможный возраст солнечной системы в 10 млрд лет [Ясаманов, 1988].

Конец 19 в. Стало ясно: химическое горение не обеспечивает достаточной мощности и длительности излучения Солнца. *Лордом Кельвином* (*Kelvin*, 1824-1907) предложен механизм гравитационного сжатия, впоследствии названным кельвиновским сжатием, которое смогло объяснить энергетику Солнца. Кельвиновский механизм «давал» Солнцу 30 млн лет жизни. Сторонники Кельвина не верили в геологические данные о куда большем возрасте Земли, считая это проблемой геологии. Ныне теория Кельвина объясняет первичный разогрев звезд [Сергеев, 2008, с. 128].

Лорд Кельвин попробовал установить и возраст Земли, основываясь на разнице температур между тем состоянием, в каком находилась наша планета, будучи раскаленным шаром, и теперешним, считая скорость остывания постоянной. Он пришел к выводу, что Земля существует примерно 30 (20-40) млн лет [Ясаманов, 1988].

Согласно [Любимова, 1968, с. 3, 12-13, 33-37, 140-152, 236], начало изучения термики Земли связано с работами Кельвина, пытавшегося определить возраст Земли по скорости потери первоначального тепла путем теплопроводности в результате сравнения вычисленного теплового потока с наблюдаемым у поверхности.

1937 г. Выход в свет работы А.Н. Тихонова [1937] «О влиянии радиоактивного распада на температуру Земли», принципиально изменившей кельвиновскую схему расчетов возраста Земли.

Вторая половина 1940-х гг. Выход космогонической теории О.Ю. Шмидта, раскрывшего космогоническое содержание термики Земли и планет и развивавшего планетарный подход к рассмотрению геофизических проблем на основе варианта первоначально холодной Земли – следующий шаг в развитии термики Земли.

1950-е – начало 1960 гг. Развитие термики Земли было связано с изучением природы источников тепла с применением физики твердого тела к пониманию и расшифровке процессов переноса тепла в условиях высоких температур и давлений. С математической точки зрения такой подход привел к учету переменной коэффициентов теплопередачи и переменной функции источников тепла в уравнении теплопроводности.

1953 г. Экстраполяция лабораторных данных о плавлении минералов в область давлений до ядра Земли позволила Симу (F. Simon) получить полуэмпирическое уравнение для температуры плавления в условиях земных недр. Основываясь на этих данных, Джекобс (J. Jacobs) в рамках холодной модели О.Ю. Шмидта объяснил существование внутреннего ядра Земли из твердого железа [Джекобс, 1979, с. 116-146].

1958-1959 гг. В.Н. Жарков определяет температуру в ядре Земли $\sim 5000^{\circ}$.

Начало 1960-х гг. На основании результатов многочисленных определений величин теплового потока из недр Земли, выполненных в разных регионах планеты, было убедительно показано существование как его устойчивого среднего значения $Q_{0, ср} = (1,50 \pm 0,15) \cdot 10^{-6} \text{ кал/см}^2 \cdot \text{с} = (62,0 \pm 6,2) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ для всей Земли, в целом, так и наличие зон с аномально высокими и низкими тепловыми потоками [Lee, Uyeda, 1965; Магницкий, 1965, с. 5-6].

Конец 1960-1970-е гг. Характеризуется переходом от рассмотрения сферически симметричных квазиоднородных моделей к изучению горизонтальных неоднородностей теплового поля. Широкий размах приобретают региональные исследования теплового потока и поиски связей термических параметров с другими геолого-геофизическими факторами и тектоническими структурами. Все больший круг специалистов начинает заниматься проблемами термики Земли. Радиоастрономическими методами определен тепловой поток из недр Луны, который по порядку величины оказался подобным земному.

Показан глубинный характер выделенных аномалий теплового потока, и он подтвержден данными электромагнитного зондирования.

Многочисленными измерениями величин теплового потока в разных регионах планеты отмечена корреляция теплового потока с возрастом геологической формации: чем древнее формация, тем меньший тепловой поток, и наоборот [Магницкий, 1965, с. 5-55].

Строятся тепловые модели Земли. Согласно [Круть, 1978, с. 184], по одной из них [Любимова, 1968], термическая модель предусматривает циклическое переплавление верхней мантии, начавшееся около 2,5 млрд лет назад, причем первый цикл мог длиться около 500 млн лет, а последующие – 100-200 млн лет, что коррелируется с тектоническими циклами и стадиями, а также увязывается с гипотезой многократной зонной плавки мантии. При этом теория теплопроводности не может объяснить значительные региональные изменения теплового потока и требует учета перемещения вещества. Проникающая конвекция – магм и горячих растворов – принимается причиной

выноса тепла в геотермических районах. Этот вывод подтверждается и более современными данными.

1980-1990-е гг. «Тепло радиоактивного распада не является основным фактором в формировании пространственно-временных вариаций кондуктивного теплового потока через поверхность Земли» [Смирнов, Сугробов, 1980].

«На основании общеизвестных физических законов предлагается механизм перераспределения энергии в глубинных геофизических процессах (фазовых переходах, плавлении горных пород, землетрясениях и др.) и извержениях вулканов. Обосновывается энергосфера Земли на глубинах 100-300 км, где перераспределение энергии осуществляется по принципу «световодов»» [Кутыев, 1990].

На основании результатов «температурных измерений на Кольской скважине за период с 1974 по 1984 г. (14 термограмм) методами разведочного анализа выделена общая часть профиля температуры с поправкой на различную выстройку отдельных термограмм. Сравнение температурного профиля с профилем теплопроводности позволило сделать вывод о том, что тепло переносится в основном некондуктивным путем» [Рыкунов, Рогачева, 1991].

1903 г. П. Кюри открыл количественный закон снижения радиоактивности, введя понятие периода полураспада, и показал его независимость от внешних условий. Исходя из этого, предложил использовать период полураспада как эталон времени для установления абсолютного возраста земных пород [Храмов, 1983, с. 150].

1904 г. В Италии в г. Лардарелло начала работу первая в мире геотермальная (преобразующая тепло Земли в электрическую энергию) электростанция мощностью 400 *Квт* [Кирюхин, Делемень, Гусев, 1991, с. 3].

1905 г. Э. Резерфорд (Rutherford, 1871-1937) провел первую оценку возраста Земли. Полученное им значение составило 500 млн лет, что намного, более чем на порядок по величине, превосходило предполагавшееся в то время максимальные геологические возрасты.

Лорд Релей (Rayleigh, 1842-1919) установил неоднородное распределение радиоактивных источников в Земле. Оказалось, что концентрация радиоактивности в магматических горных породах намного превосходит ту величину, которую должна иметь Земля для объяснения наблюдаемого теплового потока. Он предположил, что радиоактивные элементы находятся только в земной коре. Это сразу сняло проблему теплопроводности, которая ранее привела Кельвина к ошибочному выводу о возрасте Солнца и, следовательно, Земли.

Релей установил, что основные магматические породы (базальт, габбро) беднее радионуклидами, чем более легкие кислые гранитные породы. Этот факт служит основой теории формирования земной коры из вещества мантии и теории распределения температуры внутри Земли [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 56].

1911 г. Вихерт указывал в своих лекциях, что температура в центре Земли должна быть меньше 8000° , так как в противном случае плотность ядра была бы слишком мала.

В настоящее время имеющиеся у нас данные о температуре в глубоких частях Земли почти так же неопределенны, как и догадки ученых в 1911 г. Однако теперь мы яснее видим многие источники ошибок. Среди них, например, сомнительные предположения, на которых основаны фундаментальные расчеты теплопроводности земных недр, а также недостаточность знаний о веществе Земли и зависимости его точки плавления от глубины. Даже в тех случаях, когда применяемые уравнения являются хорошими приближениями, некоторые численные постоянные нередко бывают неопределенны [Гутенберг, 1963, с. 173].

1914-1917 гг. Первая Мировая война и появление первого в мире социалистического государства привели к тому, что развитие взаимоотношений науки и общества оказалось существенно различным в социалистических и капиталистических странах [Храмов, 1983, с. 218].

1938-1939 гг. Теория термоядерного синтеза, построенная *Х. Бете (Bethe)*, позволила выявить наиболее вероятные циклы термоядерных реакций в звездах и, тем самым, предложить новый источник энергии звезд [Сергеев, 2008, с. 128; Советский, 1985, с. 135; Физический, 1983, с. 759].

Немецкий радиохимик *О. Ганн (Han, 1879-1968)* открыл явление деления ядер урана под действием нейтронов [Советский, 1985, с. 273].

1940-е гг. Разработка радиоизотопного метода, который определил возраст Земли в более чем 3 млрд. лет [Сергеев, 2008, с. 128].

1956 г. *Вулкан Безымянный*, Камчатка. Сведений об извержениях вулкана не было, и он считался потухшим. Начиная с 29 сентября 1955 г. начались землетрясения, частота которых постепенно увеличивалась до 22 октября, когда начались слабые и умеренные взрывы на вулкане. В середине ноября извержение усилилось, было выброшено облако пепла на высоту 5 км. 17 ноября было так темно, что в Ключах днем пришлось зажигать свет в домах, а машины ходили при включенных фарах. Но в конце ноября извержение резко ослабло, и активность вулкана сохранялась на низком уровне до марта 1956 г.

30 марта в 17 часов 11 минут неожиданно началась кульминация, которая закончилась через 15 минут. Сначала произошел ужасающей силы взрыв, в результате которого вулкан «выстрелил» плотную черную струю на восток под углом $30-45^0$ к горизонту, быстро достигнув высоты более 30 км, а через 15 минут другой взрыв выбросил тучу пепла уже на высоту 43 км. Мощность каждого из этих взрывов, по подсчетам И.В. Мелекесцева, была эквивалентна мощности взрывной волны 10-мегатонного взрыва, произведенного на поверхности Земли. Выделившаяся энергия составила $2 \cdot 10^{18}$ Дж. В Ключах наступила непроглядная тьма, и в течение следующих 3,5 часов там отложился слой пепла толщиной 20 мм. Наблюдательный пункт вулканологов, находившийся в 10 км от вулкана, был полностью уничтожен. На расстоянии 24 км от вулкана деревья диаметром до 25 см были срезаны под корень. На расстоянии 30 км от вулкана была полностью содрана кора на обращенной к вулкану стороне деревьев, сухие стволы загорелись, а толщина слоя пепла составила 25 см. На расстоянии 10 км к востоку от вулкана толщина слоя выпавшего пепла составила 50 см. Отложения раскаленных лавин покрыли площадь 60 км^2 слоем толщиной до 50 м. Когда тучи рассеялись, оказалось, что вершина вулкана исчезла [Болт, Хорн, Макдоналд, Скотт, 1978, с. 165-167; Гущенко, 1979, с. 22; Макдоналд, 1975, с.65]. По подсчетам Г.С. Горшкова, энергия взрыва вулкана Безымянного 30 марта равна годовой продукции энергии Куйбышевской (ныне Самарской) электростанции [Святловский, 1969, с. 110].

После катастрофического извержения 1956 г. вулкан Безымянный находится в стадии практически непрерывного извержения [Викулин, 2008, с. 177-178].

1960 г. Начало строительства самого крупного в настоящее время (2008 г.) комплекса геотермальных электростанций «Гейзеры» в 116 км к северу от Сан-Франциско [Фишети, 2008].

Середина 1960-х гг. Концентрация научных сил в изучении высокотемпературных гидротермальных систем произошла в Новой Зеландии, где на опыте разведки и эксплуатации геотермальных месторождений Вайракей выросло новое поколение исследователей, определивших пути развития отрасли на ближайшие десятилетия [Кирюхин, Делемень, Гусев, 1991, с. 3-4].

1966 г. Пущена первая геотермальная электростанция в бывшем СССР в п. *Паужетка*, Камчатка, мощность которой составила 5 Мвт. К 1980-м гг. ее мощность была доведена до 7 Мвт [Советский, 1985, с. 291].

1978 г. Начаты разведочные работы на Мутновском геотермальном месторождении с целью выявления теплоносителя для ГеоЭС мощностью 200 Мвт.

2000 г. Начала работу *Верхне-Мутновская геотермальная электростанция* мощностью 12 Мвт, возведенная на вулкане Мутновский, Камчатка.

2003 г. Начала работу рядом расположенная Мутновская геотермальная электростанция мощностью 50 Мвт.

Большое значение для развития инженерии геотермальных месторождений в России имели работы Б.И. Пийпа, В.М. Сугробова, Е.А. Вакина и их коллег и учеников В.А. Дроздина, А.В. Кирюхина и других [Кирюхин, Гусев, Делемень, 1991, с. 4].

1983 г. Советские ученые впервые в мире получили тепловые карты живого работающего мозга: приборы регистрировали термоотчеты на раздражения, не касаясь головы животного и человека. Мозг работает постоянно и непрерывно. Тепловые ответы на разные раздражители появляются в разных участках коры головного мозга. Сами тепловые волны могут быть четко локализованными в пространстве или же диффузными, то есть как бы размазанными [Смирнова, 1986].

В последнее время все чаще говорят о Земле, как о живой [Гольдин, 2003; Михаил, 2004]. Поэтому приведенные выше данные о тепловом поле головного мозга позволяют предположить, что и тепловое поле Земли с его изменениями во времени может являться неким суммарным, интегральным показателем (индикатором) «работы» всех геодинамических процессов, протекающих на планете – тепловой машиной.

Середина 1980-х гг. В мире разведано и эксплуатируется 16 крупных геотермальных месторождений с общей мощностью 2580 Мвт.

Конец 1980-х гг. В мире разведано и эксплуатируется 17 крупных геотермальных месторождений, обеспечивающих суммарную мощность ГеоЭС 4092 Мвт, в том числе очень крупное геотермальное месторождение «Гейзеры» в США, 1792 Мвт [Кирюхин, Делемень, Гусев, 1991, с. 3, 6].

2008 г. Геотермальные электростанции сооружены в 24 странах, их суммарная мощность составляет 8900 Мвт. Наибольшая доля этой мощности 2850 Мвт, приходится на США (в том числе 2490 Мвт на Калифорнию, на комплекс станций «Гейзеры»), но это составляет лишь 0,36% всего производства электроэнергии в стране. С 2000 г. производство геотермальной энергии во Франции, в Кении и в России утроилось [Фишети, 2008].

2006 г. Исландия встала перед выбором: остаться лишь островком первозданной природы, привлекательной для большого количества туристов из всех стран мира, или совершить рывок в технологическое будущее. Проблема в следующем.

С одной стороны, в стране такое количество горячих источников, что почти все дома на острове отапливаются с помощью геотермальной энергии. Как один из результатов – чистота генофонда, которая приводит в восторг молекулярных биологов. С другой – желание вырваться в передовые страны мира путем использования дешевой электроэнергии с целью выплавки алюминия привело к крупнейшей за всю европейскую историю экологической катастрофе, за которую экологи всего мира осудили действия промышленников [Гьюдис, Бендиксен, 2008].

2006-2008 гг. Что-то похожее наблюдается в настоящее время и на Камчатке. С одной стороны, Камчатка «является уникальным «горячим пятном» на земном шаре и по мощности теплового выноса превосходит Исландию» [Смирнов, Сугробов, Галушкин, 1982]. На Камчатке, фактически, нетронутая природа и в последнее время имеет место все увеличивающийся поток туристов, включая и туристов из-за рубежа. С другой – стремление к лучшей жизни и большей независимости от центра толкает регион на расширение объемов добычи полезных ископаемых, включая газ и нефть.

Общие сведения о тепловом балансе Земли

[Ботт, 1974; с. 213 – 214; Гутенберг, 1963; с. 147 – 149]

Средняя температура на земной поверхности изменяется приблизительно от 0 до -40⁰С в районе Северного полюса и от -10 до -50⁰ в районе Южного полюса и составляет

около 26^0 на протяжении всего года в экваториальной зоне. Средняя температура всей земной поверхности около 15^0 , со средними колебаниями около 2^0 в течение года.

Температура какой-либо точки на земной поверхности зависит главным образом от солнечной радиации, достигающей этой точки, и угла, под которым солнечные лучи падают на поверхность. Следует учитывать также излучение, отдаваемое Землей обратно в пространство, и теплообмен посредством воздушных течений. Средний поток солнечного тепла, достигающий поверхности Земли на континентах, составляет по порядку величины $10^{-2} \text{ кал/см}^2 \text{сек} = 10 \text{ вт/см}^2$. Поэтому поток тепла из недр Земли, составляющий около $10^{-6} \text{ кал/см}^2 \text{сек} = 1 \text{ мвт/см}^2$, по сравнению с ним пренебрежимо мал. Температура дна океанов определяется локальной температурой воды, которая в глубоких океанах близка к 0^0 .

Изучение тепловых процессов, протекающих в Земле, - один из самых умозрительных разделов геофизики. Объясняется это тем, что данные о наблюдаемом на поверхности тепловом потоке и температуре в недрах Земли можно интерпретировать многими различными способами. Для областей Земли глубже 100 км наши знания о распределении температуры весьма ненадежны, а расположение источников тепла и механизм его переноса неизвестны. Однако изучение теплового режима весьма важно, поскольку потеря тепловой энергии Землей может быть, прямо или косвенно, причиной большей части тектонических и магматических процессов.

Основные энергетические процессы, в которых участвует Земля, представлены табл. 8.1. Самое большое количество энергии Земля получает от Солнца, но значительная ее часть переизлучается обратно в пространство. Лишь малая доля солнечной энергии проникает в глубину, измеряемую метрами. В слоях, расположенных близко к поверхности континентов, все периодические изменения температуры убывают с глубиной по экспоненциальному закону. На глубине порядка 1 м от поверхности суточные изменения температуры становятся настолько малыми, что ими можно пренебречь. Так при среднем для поверхностных пород коэффициенте теплопроводности $\chi \approx 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$, интервал изменения температуры в 20^0C на поверхности Земли теоретически составит около $1,4^0$ на глубине 30 см и менее чем $0^0,004$ на глубине 1 м. Изменение температуры на поверхности Земли на глубину 30 см передается примерно через 10 час. Лишь малая часть солнечной энергии проникает внутрь Земли на глубину, превышающую 30-40 м, где температура остается постоянной. Именно по этой причине начиная с этих глубин, как правило, в шахтах и производится измерение теплового потока.

Таблица 8.1. Основные составляющие энергетического баланса Земли [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 55].

Источник энергии	Величина энергии, <i>эрг/год</i>
Солнечная энергия	10^{32}
Геотермическая энергия	10^{28}
Энергия, теряемая при замедлении вращения Земли (за счет неупругости при приливном взаимодействии Земля-Луна)	$3 \cdot 10^{26}$
Тепло, выносимое при извержении вулканов	$2,5 \cdot 10^{25}$
Упругая энергия землетрясений	10^{25}

Эти расчетные значения, в основном, согласуются с наблюдениями. Поэтому солнечное излучение является основным источником энергии лишь для процессов, протекающих на поверхности твердой Земли и над ней. Влияние солнечной энергии на процессы в недрах Земли пренебрежимо мало по сравнению с той энергией, которая выделяется внутренними источниками тепла. Энергия, высвобождающаяся при

землетрясениях, как и энергия приливного трения, замедляющего вращение Земли, также невелика по сравнению с геотермической потерей тепла.

В настоящее время принято считать, что основным источником современной тепловой энергии в недрах Земли является радиоактивный распад долгоживущих изотопов. На ранних этапах истории Земли существенную роль в тепловых процессах могла играть освобождающаяся гравитационная энергия. По мере рассеяния тепла малая доля потока Земли переходит в другие формы энергии, которые вызывают тектонические и магматические процессы, метаморфизм и создают магнитное поле Земли (см. главу 7).

Энергетический баланс с позиции современной теории глобального развития Земли с его «привязкой» к тектонической активности и взаимосвязью с возможными эндогенными источниками энергии, возбуждающими геомагнитное поле, подробно описан в работе [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 204-212].

Тектономагматическая активность Земли связана с движениями земных масс и плавлением земного вещества. Проявляется эта активность в магматических внедрениях глубинного вещества в земную кору (например, в океанических рифтовых зонах Земли), в деформациях земной коры (например, в горных поясах Земли), во вторичном переплавлении коровых пород (например, в зонах подвига или при образовании гранитных плутонов), при землетрясениях и во многих других случаях движения земного вещества. Однако, в конце концов, все эти перемещения земных масс приводят к преобразованию кинетической энергии движения вещества в тепло, которое с течением времени рассеивается в окружающем пространстве и теряется с тепловым излучением Земли. Поэтому естественным мерилom тектономагматической активности Земли является поступающий из мантии глубинный тепловой поток.

Магнитное поле Земли возбуждается эндогенными источниками энергии. Мощность такого поля сравнительно невелика и, по разным оценкам, заключена в пределах от $2 \cdot 10^{16}$ до 10^{19} эрг/с. В настоящее время можно считать почти очевидным, что генерация геомагнитного поля связана с конвективными процессами, развивающимися в жидком и электропроводящем веществе внешнего (жидкого) ядра Земли. (В предыдущей главе отмечен и другой механизм генерации геомагнитного поля, связанный с вихревыми движениями газообразного вещества, образующегося на границе между внутренними твердым и внешним жидким ядром). Ясно также, что магнитное поле Земли связано и с вращением Земли.

Основная сложность с разработкой теории геомагнитного поля, в соответствии с требованиями теории глобальной эволюции Земли, связана с тем, что в земном ядре отсутствуют заметные источники энергии, способные возбуждать это поле. Наиболее вероятными источниками энергии геомагнитного поля могут быть два процесса. Первый из них – это возможно продолжающееся остывание земного ядра после этапа его перегрева, связанного с формированием ядра в конце архея, в результате которого выделилось около $5,52 \cdot 10^{37}$ эрг кинетической энергии. Второй и более реальный механизм генерации геомагнитного поля может быть связан с возникновением на поверхности земного ядра струйных течений дезинтегрированного мантийного вещества. Такие течения, по сути, замыкают собой конвективные движения мантии в единые замкнутые структуры, с механической точки зрения дополняя модель конвекции, и позволяют связать такую модель с механизмом генерации геомагнитного поля.

Определение теплового потока и геотермического градиента на континентах и в океане

Когда-то считалось, что Земля может по существу представлять собой тепловую машину. Это означает, что энергия, вызывающая геодинамические явления, может быть результатом тепловых процессов. Приведенные выше общего плана данные показывают, что в самом общем виде, «философски», такая точка зрения на процессы, протекающие на

Земле, может быть обоснована. Однако если говорить конкретно, с «термической» точки зрения, то в настоящее время нельзя определенно ответить на вопрос: «Может ли Земля рассматриваться как тепловая машина?» Термальная история Земли известна недостаточно, так как она непосредственно связана с проблемой происхождения Земли и солнечной системы, проблемой - еще далекой от своего решения.

Температура внутренних частей Земли в настоящее время известна с очень малой точностью. Температура ее верхних частей до глубин 50 км известна несколько лучше. Мы располагаем следующими источниками сведений о температуре верхних частей Земли: данными геотермических измерений, данными о генерации тепла главными типами горных пород в результате распада радиоактивных элементов, данными о температурах изливающихся лав и данными об электропроводности.

Тот факт, что тепло повсеместно истекает из недр Земли в пространство, с очевидностью доказывается повышением температуры с глубиной в любой скважине или шахте; температурные градиенты, измеренные на разных объектах, изменяются от 25^0 до 40^0C на 1 км. Следовательно, тепловой баланс может осуществляться только в том случае, если тепло поступает во внешнее пространство из недр Земли.

Следует отметить, что в некоторых случаях измеренный тепловой поток оказывается направленным в обратную сторону – от поверхности земли направление. Два таких случая были отмечены во время измерений теплового потока у берегов Камчатки во время рейса НИС «Вулканолог» в 1978 г. Однако оба эти случая, по всей вероятности, связаны с циркуляцией морской воды в верхней части земной коры, которая постоянно подвергается вследствие активных сейсмотектонических процессов дроблению и оползням [Смирнов, Сугробов, 1980б].

Тепловой поток определяется как произведение:

$$Q = -\chi \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (8.1)$$

где χ - коэффициент теплопроводности, $\partial T / \partial n$ – температурный градиент по нормали $\vec{n}$ к поверхности Земли.

На континентах температурные градиенты определялись путем измерения температуры и коэффициента теплопроводности пород на различных глубинах в буровых скважинах. Обычно для этого применяются максимальные термометры, которые находятся нередко в воде, но часто в неподвижном воздухе. По возможности измерения проводятся в течение нескольких часов с помощью нескольких термометров одновременно. Перед измерениями необходимо выждать некоторое время, чтобы в скважине (или шахте) установилось тепловое равновесие. Это время должно быть в несколько раз больше времени, затраченного на бурение скважины. Затем значения, полученные в течение нескольких периодов измерений, осредняются.

Теплопроводность образцов горных пород из скважины измеряется или в лаборатории, или же непосредственно на месте.

На Камчатке оценка теплового потока проводилась по глубоким скважинам Богачевской структуры на Кроноцком полуострове; величина измеренного теплового потока составила $46 \pm 10 \text{ мВт/м}^2 = 1,11 \text{ мккал/(см}^2\text{с)}$ [Смирнов, Сугробов, Галушкин, 1982].

Пример измерения теплового потока в скважине «Рукхоуп» (Станоп, северная Англия) показан на рис.8.1. Тепловой поток здесь оценивается значением $2,16 \pm 0,07 \text{ мккал/(см}^2\text{с)}$.

По-видимому, впервые метод измерения термического градиента океанического дна опробовал Петтерсон. В последующие годы (1950 г.) Буллард и его коллеги применили этот метод в Тихом и Атлантическом океанах. Данный метод основан на измерении разности температур в отложениях океанического дна вдоль вертикального зонда, который имел длину около 0,5 м и диаметр около 3 см. В этих экспериментах зонд

находился примерно в течение 15 мин на расстоянии около 100 м над дном океана. После этого он со скоростью 2-3 м/с заталкивался в дно и оставался там в течение 30-40 мин. Поведение зонда детально изучалось и экспериментально и теоретически. По имеющимся оценкам при благоприятных условиях ошибки в определении температурного градиента не превышают 3%.

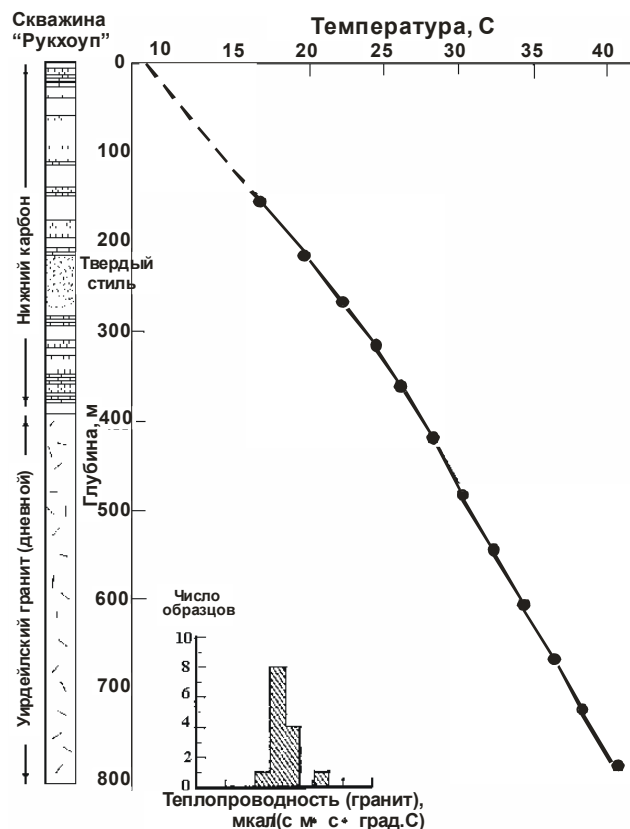


Рис. 8.1. Результаты определения теплового потока в скважине «Рукхоуп» (Станоп, Северная Англия). Измерения проводились через три года после завершения бурения. Измерения теплопроводности 13 гранитных образцов, взятых с равноотстоящих горизонтов между глубинами 427 и 792 м, представлены гистограммой внизу [Ботт, 1974, с. 215]. Общие результаты таковы:

Термический градиент (427 – 792 м)	$= 32.45 \pm 0.01^0 \text{ C/км,}$
Поправка за топографию	$= -1.55 \pm 0.50^0 \text{ C/км,}$
Исправленный термический градиент	$dT/dn = 30.90 \pm 0.51^0 \text{ C/км,}$
Измеренная теплопроводность	$\chi = 0.0070 \pm 0.0002 \text{ кал/(см } ^\circ \text{C),}$
Тепловой поток исправленный за топографию	$= 2.16 \pm 0.07 \text{ мккал/(см}^2 \text{ с).}$

На Камчатке и прилегающих к ней провинциях массовые измерения теплового потока на море стали проводиться Институтом Вулканологии совместно с другими Институтами страны в середине 1970-х г. Во время второго рейса НИС «Вулканолог» в 1977 г. по программе «Изучение роли теплового поля Земли в геодинамике» был выполнен большой объем измерений [Смирнов, Сугробов, 1979]. Использовались приборы конструкции А.Л. Александрова – ПТГ-3 с автономной регистрацией сигнала и ПТГ-4 с телеметрической передачей сигнала на борт судна по кабель-тросу.

В акваториях Охотского и Берингова морей исследовалось распределение температуры с глубиной. Оказалось, что годовые колебания температур на поверхности воды сильно затухают на глубинах 250-300 м и практически полностью на глубине 500-700 м. Ниже устанавливается адиабатический градиент температуры и можно считать, что фактор колебания температуры на поверхности моря не влияет на температурное поле в осадках.

Коэффициент теплопроводности донных осадков измерялся с помощью игольчатого зонда постоянной мощности с погрешностью измерений около 3% и оценивался по влажности донных осадков. Значение коэффициента теплопроводности, оказалось, лежит в пределах $1,61 \leq \chi$, $\text{мккал}/(\text{см}\cdot\text{с}\cdot\text{град}) \leq 2,50$, в среднем, $\chi \approx 2,0$ $\text{мккал}/(\text{см}\cdot\text{с}\cdot\text{град})$ [Смирнов, Сугробов, Галушкин, 1982].

Определенные значения теплового потока расположены в пределах более чем порядка по величине $0,42$ [18] $\leq Q$, $\text{мккал}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ [$\text{мвт}/\text{м}^2$] $\leq 5,50$ [230] [Смирнов, Сугробов, 1979, 1980а, б; Смирнов, Сугробов, Галушкин, 1982].

Температурные градиенты отдельных областей Земли также сильно различаются, а также изменяются и с глубиной, причем зависят, главным образом, от теплопроводности. При этом значения температурных градиентов варьируют в пределах $0,1 - 0,01$ $\text{град}/\text{м}$. Часто в качестве репрезентативного значения принимается значение $1/30$ $\text{град}/\text{м} \approx 30$ $\text{град}/\text{км}$.

Коэффициент теплопроводности χ определялся многими исследователями. Как правило, теплопроводность данного образца для большинства пород уменьшается с увеличением температуры. Для образцов, отобранных из дна океана, существенно водосодержание, так что необходимо обеспечить такое положение, при котором водосодержание таких образцов не изменялось бы. Из опубликованных данных следует, что $\chi = 0,005$ $\text{кал}/(\text{см}\cdot\text{град}\cdot\text{с})$ для многих пород коры, он близок к значению $0,01$ для ультраосновных пород. Для оливина и пироксена определено значение $\chi = 0,012$ при 0°C и $\chi = 0,008$ $\text{кал}/(\text{см}\cdot\text{град}\cdot\text{с})$ при 200°C . Следует отметить, что, согласно современным данным, коэффициент теплопроводности осадочных пород земной коры сильно зависит от пористости и температуры.

Связь теплового потока с основными структурами земной коры

Средние значения теплового потока для разных регионов Земли приведены в табл. 8.2 (сомнительные результаты исключены) и представлены на рис. 8.2 а, б, в, г.

Значения Q на поверхности Земли, как видно из данных табл. 8.2 и рис. 8.2, изменяются в достаточно больших пределах. Наибольшая частота таких значений, как видно из данных рис. 8.2, приходится на значение $Q_0 = 1,1 \cdot 10^{-6}$ $\text{кал}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$. Однако кривая распределения несимметрична. Это приводит к тому, что среднее значение теплового потока приходится на величину $Q_{0,ср} = (1,50 \pm 0,15) \cdot 10^{-6}$ $\text{кал}/(\text{см}^2\cdot\text{с}) = 63,0 \pm 6,3$ $\text{мвт}/\text{м}^2$. При таком среднем значении теплового потока общая потеря тепла Землей путем теплопроводности составляет $2,4 \cdot 10^{20}$ $\text{кал}/\text{год}$ или 10^{28} $\text{эрг}/\text{год}$ с точностью около 10%.

Распределение значений теплового потока по поверхности Земли не совсем случайно (рис. 8.2 б, в). Для щитов и платформ Q обычно составляет $0,9 \cdot 10^{-6}$ $\text{кал}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$. В противоположность этому тепловой поток в ряде районов, особенно в горах последнего цикла складчатости (Альпы, горы Японии), оказывается повышенным до $2 \cdot 10^{-6}$ $\text{кал}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ и даже выше. Это же относится и к некоторым областям на дне океанов. Хотя средний тепловой поток через дно океанов приблизительно равен потоку на континентах и отличается постоянством на обширных океанических равнинах, но на дне океанов имеются области – подводные валы, где тепловой поток резко повышен и доходит до $6,7 \cdot 10^{-6}$ $\text{кал}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ (рис. 8. 2).

Регионы с более высокими (положительными) аномалиями теплового потока называются «горячими точками». В настоящее время все еще ведутся споры относительно того, движутся ли эти горячие точки вместе с тектоническими плитами во время их дрейфа или же они имеют более глубокое происхождение (в мантии). Суть проблемы заключается в том, что из равенства тепловых потоков на материках и океанах следует равенство на единице площади количества радиоактивных элементов, генерирующих тепло. Это особенно удивительно, если вспомнить, что литосфера под континентами и

океанами имеет разное строение (см. рис. 6.3). Действительно, известно, что континентальные породы содержат вблизи поверхности намного больше радиоактивных веществ, чем океанические. Это различие должно каким-то образом уравниваться на глубине.

Таблица 8.2. Средние значения теплового потока в $\text{мккал}/(\text{см}^2\text{с})$ в регионах с различными типами геологического строения коры [Стейси, 1972; с. 270].

Материки		
Докембрийские щиты	0.92 ± 0.17	(26)
Последокембрийские неорогенические области	1.54 ± 0.38	(23)
Последокембрийские орогенические области (кроме зон	1.48 ± 0.56	(68)
Кайнозойского вулканизма)	2.16 ± 0.46	(11)
Зоны Кайнозойского вулканизма	1.43 ± 0.56	(128)
Среднее для материков (кроме геотермальных областей)	1.41 ± 0.52	(51)
«Среднесеточное» для материков *)		
Океаны		
Основная часть бассейнов	1.28 ± 0.53	(273)
Океанические хребты	1.82 ± 1.56	(338)
Желоба	0.99 ± 0.61	(21)
Прочие (шельфы и др.)	1.71 ± 1.05	(281)
Среднее для дна океана	1.60 ± 1.18	(915)
«Среднесеточное» для океанов *)	1.42 ± 0.78	(338)
Среднее для Земли (по всем значениям)	1.58 ± 1.14	(1043)
«Среднесеточное» для Земли *)	1.43 ± 0.75	(389)

*) Каждое значение, использованное для получения «среднесеточного» значения, представляет собой среднее из всех измерений, попадающих на квадрат 5×5^0 (300 x 300 морских миль). Таким способом уменьшается «вес» мест, густо покрытых измерениями. При вычислении «среднесеточного» для всей Земли были использованы дополнительные данные, что объясняет некоторое различие в значениях этих трех среднесеточных значений.

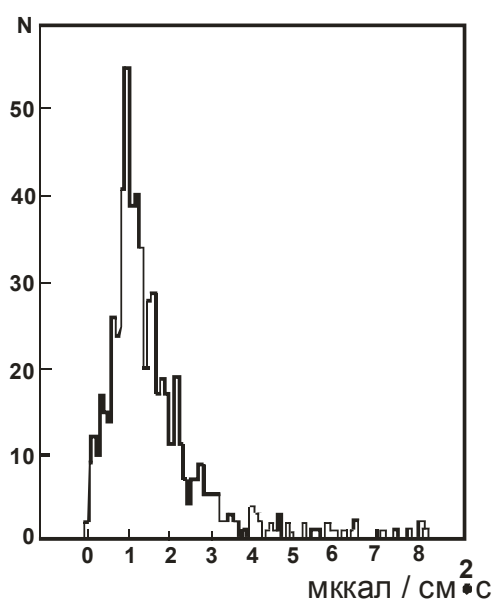


Рис. 8.2а. Гистограмма распределения значений тепловых потоков для Земли в целом [Магницкий, 1965; с. 6].

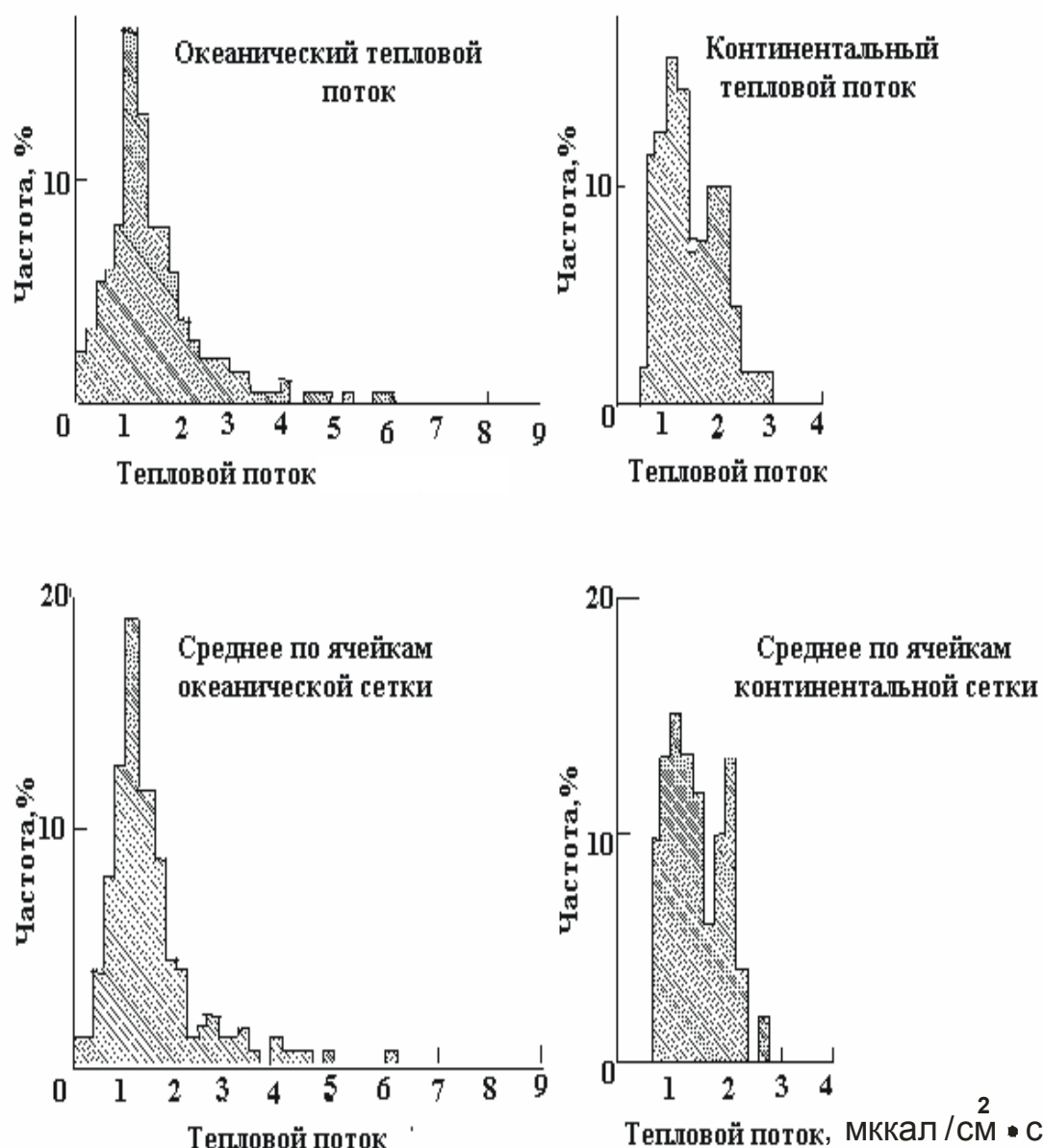


Рис. 8.2 б. Сравнение распределений океанического и континентального тепловых потоков. Вверху – гистограммы значений теплового потока, внизу – гистограммы средних значений по сетке с ячейкой 90 тыс кв. морских миль; 1 морская миля = 1.8 км [Ботт, 1974, с. 217].

Общая связь теплового потока с геологией видна также из данных табл. 8.2 и рис. 8.2. Из сравнения регионов разного типа следует, что чем раньше закончились магматические процессы, связанные с формированием региона (орогез), тем меньше величина современного теплового потока. Этот общий вывод, по-видимому, верен, но не нужно забывать, что существуют значительные изменения теплового потока местного характера. В частности, они наблюдаются над такими структурами, как Срединно-Атлантический хребет, где, вероятно, имеются локализованные источники тепла, находящиеся на глубинах до нескольких десятков километров. Вероятно, такие источники аналогичны вулканическим областям на суше; их вклад в глобальное распределение потока мал. К приведенной потере тепла Землей через теплопроводность следует добавить потери тепла другими путями.

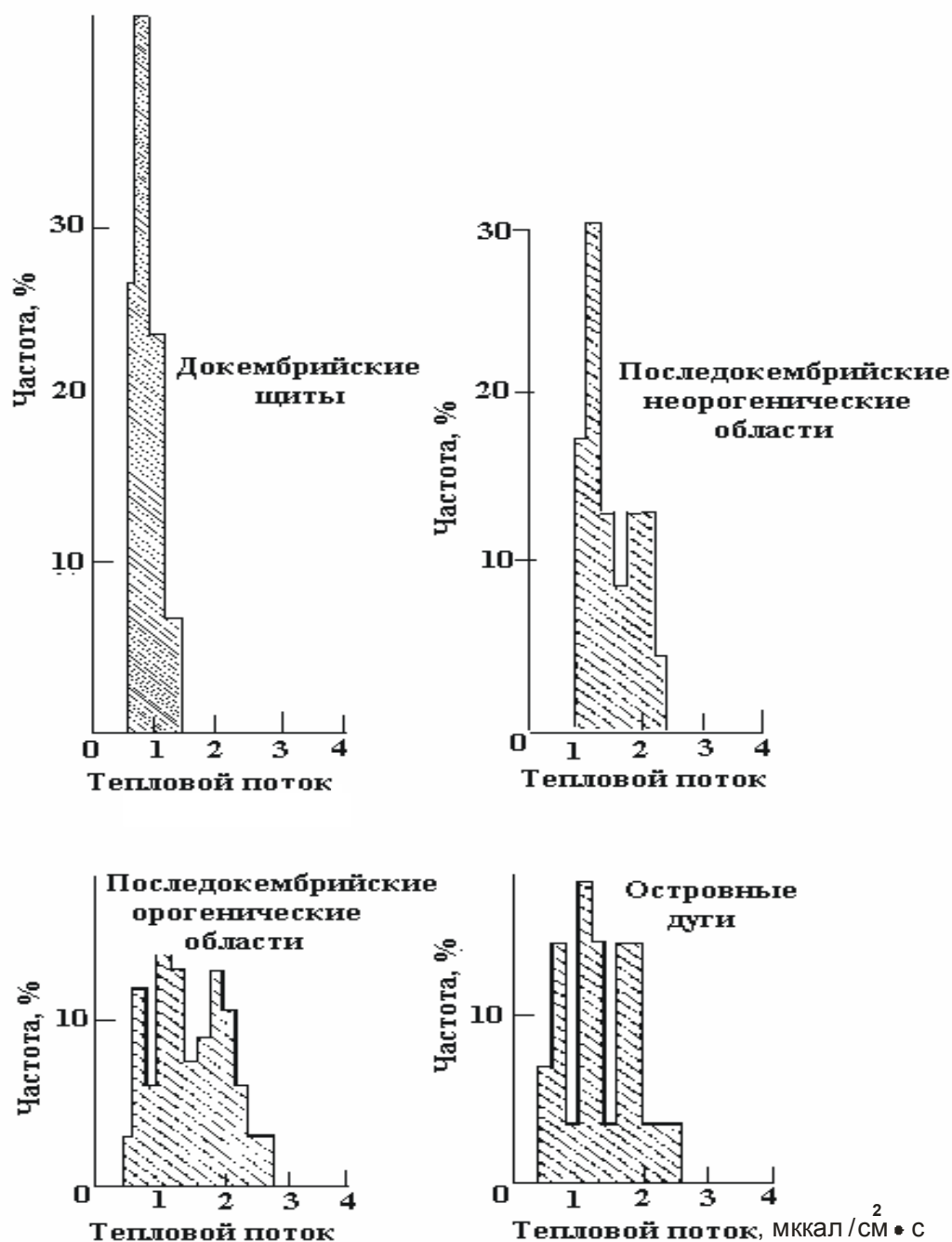


Рис. 8.2 в. Гистограммы значений теплового потока для разных континентальных регионов [Ботт, 1974; с. 219].

Магматическая деятельность Земли приводит к поднятию и излиянию на поверхность раскаленных лав и других продуктов. Считая, что с начала кембрия ($5 \cdot 10^8$ лет назад) было около 30 излияний платобазальтов объемом каждое в 10^6 км^3 , что каждый грамм поднятого на поверхность базальта дал за счет охлаждения 300 кал и за счет теплоты кристаллизации 100 кал , получаем потерю тепла в $0,8 \cdot 10^{17} \text{ кал/год}$. Если учесть вулканизм дна океанов, другие виды вулканизма, то можно эту потерю увеличить на порядок, т. е. считать $Q = 10^{18} \text{ кал/год}$. Таким образом, этот путь теплопотерь, который может быть доминирующим для некоторых ограниченных районов, пренебрежимо мал в масштабе всей Земли.

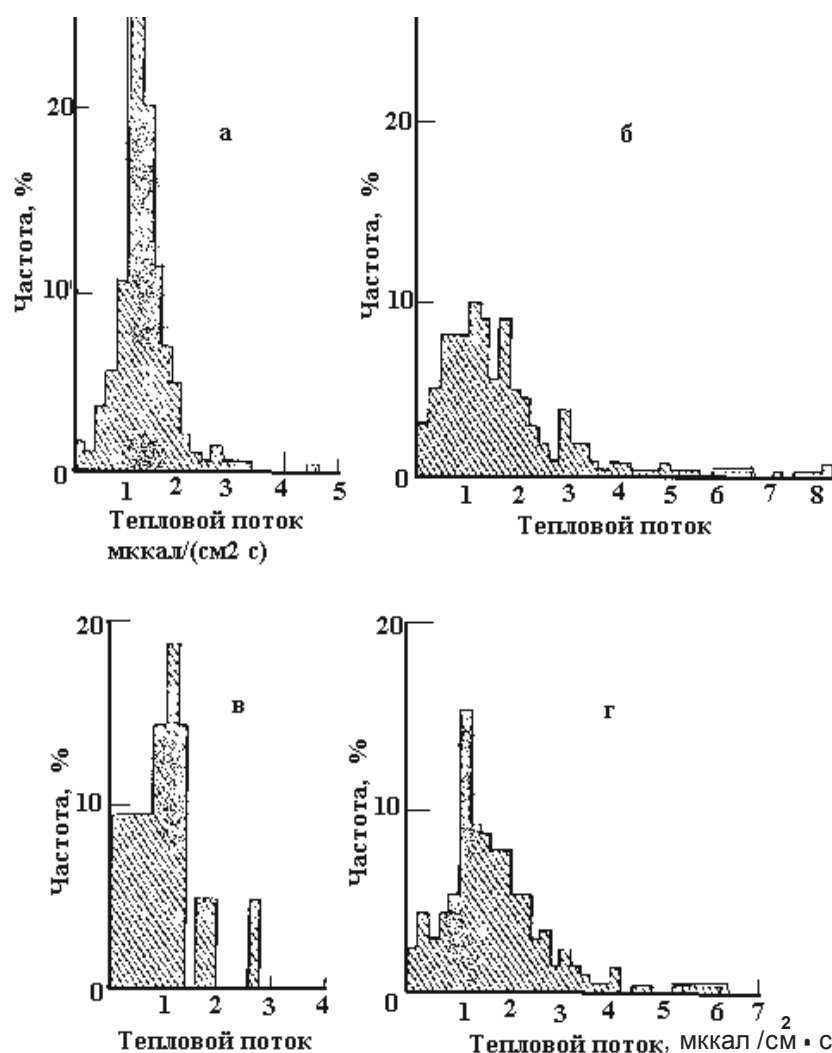


Рис. 8.2 г. Гистограммы значений теплового потока для четырех основных типов океанических регионов [Ботт, 1974; с. 220]; а – океанические котловины, б – океанические хребты, в – океанические желоба, г – другие океанические регионы.

Наконец, следует учесть вынос тепла термальными водами. Такие области, как гейзерные поля, например, долина Гейзеров на Камчатке, области выходов термальных источников по разломам, как, например, термальная линия Копет-Даг, дают вынос тепла в размерах 10^{16} - 10^{17} кал/год, т. е. их вклад весьма невелик. Гораздо существеннее вынос тепла водами, циркулирующими в осадочной толще Земли. Произвести точную оценку теплотерьер таким путем не удастся, но вполне возможно, что она достигает величины того же порядка, что и через теплопроводность. Таким образом, следует иметь в виду, что приведенной выше значение потери тепла в $2,4 \cdot 10^{20}$ кал/год может быть увеличено примерно вдвое.

Особенности тепловых полей в зонах перехода от континента к океану

Данные измерения теплового потока в зонах перехода от континента к океану, полученные при исследовании северо-западной окраины Тихого океана [Смирнов, Сугробов, 1979, 1980а, б; Смирнов, Сугробов, Галушкин, 1982], кратко охарактеризованные выше, показывают следующее. Тепловой поток в зонах перехода является таким параметром, который дает наиболее полную информацию о возрасте тектоно-магматической активности, строении и мощности коры, термодинамических условиях в тектоносфере, структуре энергетического баланса переходных зон и т.д.

Многочисленные измерения величины теплового потока позволили построить карту измеренного и фонового теплового потока северо-западной зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Анализ этой карты подчеркивает наличие закономерной связи зон высокого (более $2 \text{ мккал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = 2,0 \text{ епт}$), промежуточного ($1,2\text{--}2,0 \text{ епт}$) и низкого (менее $1,2 \text{ епт}$) теплового потока с определенными тектоническими структурами региона, а также с возрастом тектоно-магматической активности. При этом оси всех аномалий высокого теплового потока в северо-западной зоне перехода совпадают с простираением областей тихоокеанской складчатости и вулканизма, т.е. с простираением Идзу-Бонинской, Японской, Курило-Камчатской и Алеутской систем островных дуг. Относительно осей геоантиклинальных поднятий островных дуг оси аномалий смещены во впадины окраинных морей [Смирнов, Сугробов, 1980а]. Максимальные температуры и минимальная мощность литосферы характерны для геосинклинальных впадин окраинных морей. В осевых частях этих структур астеносферный слой поднимается до 20 и даже 10 км, на флангах он опускается до глубин 40-50 км [Смирнов, Сугробов, 1980б].

Установлено существование парадоксальной (с точки зрения радиогенной природы теплового потока и преимущественной концентрации радиогенных элементов в земной коре) зависимости: чем выше величины теплового потока, тем меньше мощность земной коры в зонах перехода от континента к океану. Исключение составляют только вулканические пояса. Эта закономерность является общей для большинства тектонических структур Земли, что позволяет сделать следующий вывод. Тепло радиоактивного распада не является основным фактором в формировании пространственно-временных вариаций кондуктивного теплового потока через поверхность Земли [Смирнов, Сугробов, 1980а].

Установлена зона резко нестационарного теплового поля в областях современного вулканизма на островных дугах северо-западной части Тихого океана. Выделяется довольно большое число региональных и локальных аномалий, природа которых требует своего выяснения [Смирнов, Сугробов, 1980б].

Командорская котловина, расположенная в Беринговом море севернее сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, является уникальным «горячим пятном» на земном шаре и по мощности теплового потока превосходит Исландию. При этом в отличие от других котловин окраинных морей Тихого океана аномально высокий тепловой поток в ней не может быть объяснен подвигом литосферной плиты. Это ставит новые вопросы перед гипотезой субдукции литосферных плит [Смирнов, Сугробов, Галушкин, 1982].

Механизмы переноса тепла в Земле

[Магницкий, 1965, с. 6-12; Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 58-59]

Теплопроводность. В настоящее время единственной более или менее достоверно определенной величиной, характеризующей теплотери Земли, является тепловой поток Q_0 , обусловленный теплопроводностью. Поэтому в при оценке температуры верхних частей Земли часто исходят из приведенного выше значения теплового потока $Q_{0,ср}$, считая, что весь перенос тепла осуществляется только через теплопроводность.

Исходным в этом случае будет уравнение теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P(x, y, z, t), \quad (8.2)$$

где ρ - плотность, c – теплоемкость, T – температура, χ - теплопроводность, P – генерация тепла в единице объема, t – время.

Направляя ось z вертикально вниз и считая в первом приближении, что T и P не зависят от x и y , приходим к случаю одномерной задачи:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) + P(z, t). \quad (8.3)$$

Поскольку в дальнейшем расчеты будут вестись для глубин не более 100 км, то кривизной Земли можно пренебречь.

В качестве граничных условий при решении (8.3) можно взять температуру T_0 и тепловой поток $Q_{0,cp}$ на поверхности Земли. Осложнения возникают с начальными условиями. Если температуру U считать от $T_0 = const$: $U = T - T_0$, т. о. решение уравнения

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + P(z, t)$$

при постоянных ρ , c и χ , при начальном: $U(z, 0) = 0$ и граничных: $U(0, t) = 0$, $U(\infty, t) \neq \infty$ условиях дается формулой

$$U(z, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \int_0^\infty \frac{h}{\sqrt{t-\tau}} \left[e^{-\frac{(\zeta-z)^2}{4h^2(t-\tau)}} - e^{-\frac{(\zeta+z)^2}{4h^2(t-\tau)}} \right] P(\zeta, \tau) d\zeta, \quad (8.4)$$

где $h^2 = \chi/\rho c$ – тепловая функция.

Как показали исследования, для глубин менее 100 км в случае Земли температурный режим можно считать стационарным, полагая P не зависящей от времени, что связано с медленным изменением P со временем при большом возрасте Земли. Ошибки при этом будут составлять единицы процента.

Таким образом, при оценке современной температуры на глубинах до 100 км уравнение (8.3) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -P(z). \quad (8.5)$$

Решение этого уравнения не зависит от начального условия.

Перенос тепла излучением и экситонами. При температурах свыше 800-1500⁰С значительное количество тепла передается через породу лучеиспусканием. При более высоких температурах можно ожидать преобладания лучистого переноса. Эффективность этого переноса определяется прозрачностью силикатных минералов к красным и инфракрасным лучам. Добавка коэффициента k_r лучистого переноса к теплопроводности выражается приблизительно так:

$$k_r = \frac{16n^2 s T^3}{3e},$$

где n – показатель преломления, s – постоянная Стефана-Больцмана, e – коэффициент прозрачности. Непрозрачность может препятствовать лучистому переносу, она зависит от количества свободных электронов.

Другой механизм заключается в переносе тепла экситонами. Нейтральные атомы могут возбуждаться радиацией, энергия которой недостаточна для образования свободных электронов, при передаче энергии возбуждения соседнему атому происходит и передача тепла. В некоторых областях мантии экситонная теплопередача (при глубинах больших 100 км) может быть интенсивнее лучистого переноса.

Тепловая конвекция. В жидкой среде она может вынести большое количество тепла даже при сравнительно небольшом градиенте. По-видимому, именно конвекцией

передается тепло вверх через внешнее ядро. Многие данные, связанные с происхождением основных поверхностных структур, свидетельствуют о существовании конвекции в мантии. Вязкость верхней мантии может быть достаточно малой, чтобы допустить конвекцию при сравнительно небольшом температурном градиенте, превышающем адиабатический.

Важная геотермическая роль конвекции состоит в том, что тепло из недр Земли может быть вынесено к поверхности Земли гораздо быстрее, чем посредством теплопроводности. Гипотеза конвекции в верхней мантии объясняет уменьшение геотермического градиента глубже 50-100 км от поверхности Земли.

Способы оценки температуры в земной коре

[Магницкий, 1965, с. 6-12]

Теплопроводность. Для определения температуры в пределах земной коры достаточно решить уравнение (8.5), для чего необходимо знать вид функций $P(z)$ и $\chi(z)$. Наибольшие затруднения связаны с определением генерации тепла P .

Основным источником тепла в верхних частях Земли являются радиоактивные элементы, рассеянные в горных породах. В табл. 8.3 приведены осредненные данные о генерации тепла на 1 см^3 для разных пород.

Таблица 8.3. Данные о генерации тепла на 1 см^3 для различных пород [Магницкий, 1965; с. 8].

Порода	Гранит	Габбро	Эклогит	Дунит	Хондриты	Железные метеориты
$P \cdot 10^{13} \text{ кал}/(\text{см}^3 \text{ с})$	5.7	1.2	0.1	0.02	0.04	0.00003

Чтобы получить вид функции $P(z)$, необходимо рассматривать два случая: случай континентальной коры и случай океанической коры (рис. 6.3). Континентальная кора имеет мощность в среднем около 40 км и состоит из «гранитного» и «базальтового» слоев мощностью примерно по 20 км каждый.

«Гранитный» слой состоит не из одного гранита; генерация тепла в гранитах падает с увеличением их возраста. С учетом этих данных, примем генерацию тепла P в «гранитном» слое равной $4,2 \cdot 10^{-13} \text{ кал}/(\text{см}^3 \text{ с})$, что соответствует составу слоя на 2/3 из гранита и 1/3 из базальта.

В случае океанической коры будем считать, что кора мощностью 6 км имеет генерацию тепла такую же, как у габбро. Генерацию тепла в подкоровом слое можно определить следующим образом. Близость значений тепловых потоков на континентах и океанах (табл. 8.2) указывает на то, что через единицу поверхности в единицу времени проходит одинаковое количество тепла в обоих случаях. Однако на континентах эта генерация, в основном, сосредоточена в коре, куда были увлечены радиоактивные элементы в процессе образования земной коры при дифференциации вещества мантии Земли. Под океанами же генерация тепла рассредоточена на большую глубину, так как мантия здесь почти дифференцирована (кора очень тонкая). Таким образом, генерация тепла в недифференцированной мантии получится путем рассредоточения источников тепла континентальной коры на всю глубину дифференциации, которая составляет около 400 км. Таким образом, рассредоточивая источники равномерно до глубин 400 км, получим генерацию тепла в оболочке под океанами в $0,25 \cdot 10^{-13} \text{ кал}/(\text{см}^3 \text{ с})$.

Определим зависимость $\chi(z)$. Как уже отмечалось выше, теплопроводность зависит от состава пород, давления и температуры. Для глубин до 50 км основную роль играет решеточная часть теплопроводности, причем влияние давления на этом интервале глубин пренебрежимо мало по сравнению с влиянием температуры. Из теории твердого тела

Дебая следует, что если известен коэффициент теплопроводности χ_0 при температуре T_0 , то коэффициент теплопроводности χ при температуре T будет определяться из соотношения:

$$\chi = \chi_0 T_0 / T. \quad (8.6)$$

Подставляя (8.6) в (8.5) и учитывая приведенные выше количества генерации тепла под океанами и материками можно рассчитать значения температур в пределах земной коры (табл. 8.4).

Таблица 8.4. Распределение температуры в коре, имеющей строение, описанное в тексте [Магницкий, 1965, с. 12].

Параметры	Континент			Океан		
Глубина, км	20	40	50	11	40	50
Температура, °C	380	650	700	130	850	1100

Магматическая деятельность Земли как показатель температуры земных глубин [Магницкий, 1965; с. 16 – 21]. Различают два основных типа магматической деятельности Земли: эффузивный, при котором лавы извергаются на поверхность, и интрузивный, при котором расплав застывает внутри земной коры, образуя интрузивные горные породы. Оба эти типа могут быть использованы для оценки температуры Земли. Наиболее прямые данные можно получить по измерениям температур вулканических лав.

То обстоятельство, что вулканы существуют не повсеместно, вызывает сомнение в том, насколько репрезентативны данные о температуре земных глубин, определенные таким путем.

В соответствии с базой данных [Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007] на Земле в течение последних 12 *тыс лет* отмечено 6226 извержений 562 вулканов. Из них в пределах окраины Тихого океана отмечено 5353 (86%) извержений 364 (61%) вулканов. Значительное число вулканов приурочено к молодым орогеническим зонам, к зонам современных разломов (например, в Восточной Африке), к океаническим валам. Однако если учесть проявление вулканизма, например, с начала кембрия, то картина размещения вулканов окажется более равномерной. К этому следует добавить весьма широко распространенную вулканическую деятельность океанического дна, что было установлено исследованиями последних десятилетий.

Таким образом, можно утверждать следующее. Во-первых, температуры, получаемые по данным вулканических извержений, достаточно репрезентативны, хотя, вероятно, они и несколько выше средней температуры соответствующих глубин, поскольку по данным сейсмологии вещество оболочки Земли везде твердое и расплавы встречаются лишь в виде отдельных локальных очагов. И, во-вторых, все проявления вулканизма, начиная с кембрия, могут приниматься во внимание при оценках современных температур внутри Земли.

При оценке температур земных глубин по вулканической деятельности возникают две основные задачи: определение глубины первичного источника питания вулканов и определение температуры в очаге.

1. Работами камчатских ученых П.И. Токарева, А.А. Гусева, Л.С. Шумилиной и С.А. Федотова показано, что у берегов Камчатки и Курильских островов на глубинах около 60 - 100 км существует слабый минимум сейсмической активности (см. рис. 3.2). Этот минимум некоторыми исследователями связывается с тем, что на этих глубинах существуют очаги вулканов, в которых происходит образование расплавленной магмы. Однако существует точка зрения, согласно которой таких очагов как таковых не

существует и магматический расплав в виде больших капель поступает из верхней мантии.

2. Прямые измерения дают значения изливающихся лав в интервале 800-1200⁰С. Так, при извержении кратера Билукай на склоне вулкана Ключевской (Камчатка) в 1938 г. температура магмы достигала 1100-1200⁰С [Мархинин, 1985, с. 38-39]. Измерения температуры лавы Южного прорыва Толбачинского извержения (Камчатка) в 1976 гг. непосредственно у выхода ее на поверхность, не далее 250 м от подножия извергающегося конуса показали значения 1060-1070⁰С [Большое..., 1984, с. 146]. При этом во время извержения Северных конусов в 1975 г. на уголке одного из выброшенных газопепловой струей ксенолитов был обнаружен частично расплавленный кристалл диопсида, температура плавления которого равна 1400⁰С [Ковалев, Кутыев, 1977].

Таким образом, анализ магматической деятельности Земли показывает, что на глубинах около 100 км значения температуры могут достигать 800-1400⁰С. Полученные значения не противоречат приведенным выше оценкам.

Температура верхних частей Земли по данным об электропроводимости [Магницкий, 1965; с. 21 – 22]. Электропроводимость вещества Земли на разных глубинах может быть использована для определения температуры, так как она очень сильно зависит от температуры. Электропроводность вещества Земли для глубин 20-100 км составляет 10⁻⁴ ом⁻¹см⁻¹. Используя экспериментальные данные о параметрах, определяющих значение электропроводимости вещества верхней части мантии, можно показать, что температура на глубинах 20-100 км имеет значение около 1200-1400⁰С.

Таким образом, все способы определения дают для глубин около 100 км значение температуры от 1000 до 1400⁰С.

Температура в мантии [Магницкий, 1965, с. 22-33]

Понятие о нижнем и верхнем температурных пределах в мантии. При оценке температуры в оболочке Земли на глубинах от 50 км до 2900 км (до границы земного ядра) возникают еще большие затруднения. При этом ненадежность получаемых результатов значительно увеличивается. Для этих глубин нельзя применить метод, основанный на использовании тепловых потоков, ввиду полного отсутствия данных. Неприменим и метод, исходящий из определения температур лав. Со значительными трудностями мы сталкиваемся и в методе, основанном на определениях электропроводности.

Рассмотрение вопроса о температуре больших глубин лучше всего начать с попыток установить возможные верхний и нижний пределы температуры на соответствующих глубинах. В качестве нижней границы обычно принимается кривая адиабатической температуры, так как нагрев за счет сжатия должен обязательно быть, а отток тепла, могущий понизить эту границу, был для больших глубин, видимо, невелик.

Адиабатический градиент определяется термодинамической формулой:

$$dT/dp = \alpha T / c_p \rho, \quad (8.7)$$

где p – давление; α - коэффициент объемного расширения; ρ - плотность пород, c_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Как было показано (см. раздел 5), распределение плотности ρ с глубиной (r) в настоящее время достаточно хорошо известно. Наибольшие затруднения связаны с определением α и c_p . Если для горных пород взять средние значения $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹, $c_p \approx 0,3$ кал/г·град, определяемые экспериментально, то, учитывая, что

$$dp = - \rho g dr, \quad (8.8)$$

и, следовательно, из (8.7)

$$dT/dr = g\alpha T/c_p, \quad (8,9)$$

получим адиабатический градиент:

$$dT/dr \approx 0,5^{\circ}C/км,$$

при этом принималось $T = 1300^{\circ}C$. Однако такая оценка слишком груба, так как α и c_p меняются с глубиной.

Для более строгой оценки величины отношения α/c_p воспользуемся известными из термодинамики и физики твердого тела соотношениями. В результате, если знаем температуру T_1 на глубине H_1 , можно получить следующее соотношение:

$$\ln \frac{T}{T_1} = \int_{H_1}^H g \frac{\alpha}{c_p} dH. \quad (8.10)$$

В табл. 8.5 приведены значения α/c_p и T/T_{100} , вычисленные теоретически, а также несколько иным способом, основанным на теории Дебая (см. [Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971, с. 116-120]), а также адиабатические температуры, считая, что $T_{100} = 1250^{\circ}C$. Температуры в последнем столбце табл. 8.5 могут рассматриваться как нижний предел температуры мантии.

Расчеты и имеющиеся экспериментальные данные показывают, что в мантии Земли кривая температуры плавления всегда идет круче, чем кривая равновесной температуры.

Экспериментальное определение температуры плавления в мантии. Сейсмические данные позволяют установить, что поперечные волны проходят через мантию Земли (рис. 4.5, 4.10). Исключение, возможно, составляют отдельные камеры под активными вулканами (магматические очаги). Таким образом, оболочка Земли от границы Мохоровичича ($H \approx 33$ км; см. раздел 3, рис. 4.10, 4.11; раздел 5, рис. 5.2) до границы ядра ($H \approx 2900$ км) находится в эффективно твердом состоянии. Если учесть, что интервал разжижения силикатных стекол обычно начинается при температурах около $1,1T_m$, где T_m – температура плавления, то для всех глубин в мантии Земли за возможный верхний предел температуры можно принять температуру плавления.

Таблица 8.5. Температуры в мантии по теории Дебая, по формуле (8.10) и адиабатические температуры.

Глубина, Н, км	Теория Дебая		По формуле (8.10)		Адиабатическая температура, $T, ^{\circ}C$
	$\alpha/c_p \cdot 10^{-12},$ $г/эрг$	T/T_{100}	$\alpha/c_p \cdot 10^{-12},$ $г/эрг$	T/T_{100}	
50	-	-	4,68	0,97	-
100	5,2	1,00	4,50	1,00	1250
200	4,77	1,05	4,02	1,04	1300
600	2,22	1,20	2,17	1,17	1500
1000	1,51	1,30	1,60	1,26	1700
1800	1,05	1,44	1,22	1,40	1900
2900	0,87	1,61	0,95	1,58	2200

К сожалению, определение температуры плавления для больших глубин связано со значительными трудностями. Имеющиеся экспериментальные данные относятся к

некоторым простейшим случаям и не позволяют отыскать T_m для глубин, больших 50-100 км. Для «сухого» диопсида получено, например:

$$p = 23,3[(T/1665)^{4,46} - 1],$$

где T – в абсолютной шкале, p – в кбар. Это дает градиент кривой плавления $15,4^0 \text{ К/кбар}$. Для пород обычно градиенты ниже; так, для базальта всего 6^0 К/кбар . Присутствие воды делает ситуацию еще более неопределенной.

Формула Клаузиуса-Клайперона. Гипотезы плавления Линдемана и Жаркова. Экстраполяция опытных данных на большие глубины по формуле Клаузиуса-Клайперона $dT_m/dp = \Delta V/\Delta S$ практически невозможна из-за незнания изменения ΔS с увеличением давления, где ΔV и ΔS – изменение объема и энтропии при плавлении.

В силу этого в настоящее время пользуются формулами, построенными по той или иной гипотезе о процессе плавления.

Определение температуры плавления по Линдеману основано на предположении, что плавление наступает тогда, когда амплитуда тепловых колебаний атомов достигает определенной доли от параметра решетки.

Расчеты показывают, что температура плавления T_m на глубине H связаны с температурой плавления T_{m1} на глубине H_1 следующим образом:

$$T_m = T_{m1} \frac{(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2)_H}{(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2)_{H_1}}, \quad (8.11)$$

где V_P и V_S – скорости продольных и поперечных волн на соответствующих глубинах, значения которых изменяются в соответствии с данными, приведенными на рис. 4.10. Выражение (8.11) называется формулой Линдемана.

Другое определение T_m основано на гипотезе, которая заключается в том, что плавление наступает при некоторой определенной концентрации дефектов в решетке (гипотеза В.Н. Жаркова [Жарков, Трубицын, Самсонов, 1971]). Расчеты показывают, что

$$T_m = T_{m0} \frac{w_0}{w} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1/3}, \quad (8.12)$$

где w , ρ , T_m и w_0 , ρ_0 , T_{m0} – энергии образования дефекта, плотности среды и температуры при давлениях p и p_0 соответственно.

Из опытов с перидотитом $1/3 = 2,55$.

Реальные температуры в мантии. На рис. 8.4 приведены кривые плавления в оболочке Земли от глубины 100 км до границы ядра. Значение температуры T_{m0} на глубине 100 км принято равным 1800^0 К .

Кривая 1 на рис. 8.4 получена методом Линдемана при условии, что молекулярный вес вещества оболочки – величина постоянная. Кривая 2 – получена методом критической концентрации тепловых дефектов в случае $w = w_0$. Формула (8.12) справедлива в слое однородного состава, поэтому она применяется для слоев от 100 км до 400 км и от 1000 км до 2900 км, которые, как было показано в разделе 3, могут считаться однородными. Значение для T_m в интервале от 400 км до 1000 км можно получить интерполяцией. Плотность ρ_0 на глубине 100 км для нижнего слоя находится экстраполяцией кривой плотности (по Буллену, модель «А»), значение плотности – наиболее близкое к действительности. Вертикальные линии на кривых рис. 8.4 показывают границы неопределенности, если для $1/3$ взять вместо 2,55 значения 2,3 или 2,8. Маловероятно, что

энергии образования дефектов для разных компонент мантии равны, скорее следует ожидать, что такая энергия больше в более плотном нижнем слое. Следовательно, можно предполагать, что на глубинах больше 400 км кривая 2 должна подойти ближе к кривой 1, чем показано на рис. 8.4. Для совпадения обеих кривых достаточно, чтобы энергия образования дефектов в более плотном нижнем слое была больше на 40%, что представляется умеренным требованием.

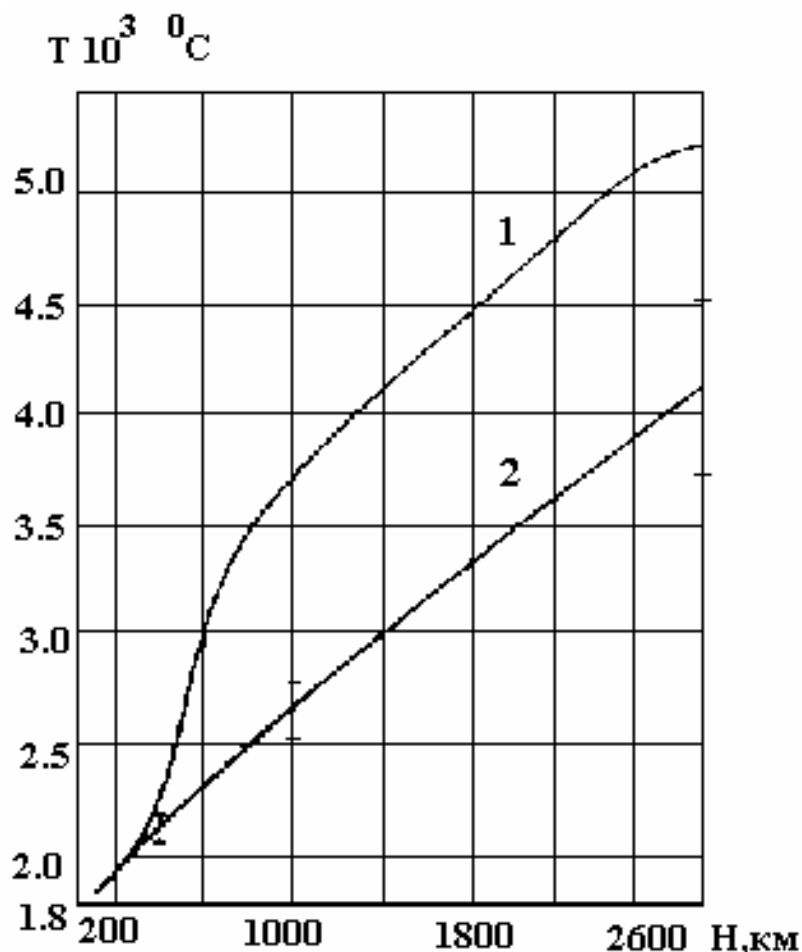


Рис. 8.4. Кривые плавления в оболочке Земли в диапазоне глубин от 100 км до границы ядра, в предположении, что $T_{м0}$ ($H = 100$ км) = 1800°C . Вертикальные линии на кривых показывают границы неопределенности. Видно, что температура на границе ядра, по-видимому, не может превышать 5000°C [Магницкий, 1965; с. 33].

В заключение отметим, что температура на границе ядра, как следует из данных, представленных на рис. 8.4, не может превышать 5000°C .

Температура в ядре Земли [Магницкий, 1965, с. 37-38]

Общие замечания. Земное ядро начинается на глубине 2900 км (см. раздел 3, рис. 4.10, 4.11; раздел 5, рис. 5.2) и находится в жидком состоянии. На глубине 5100 км отмечается появление внутреннего ядра (рис. 4.11), которое можно считать эффективно твердым.

О температуре ядра имеется еще меньше сведений, чем о температуре в мантии Земли.

Поскольку земное ядро является металлическим по своим свойствам, то для описания его свойств может быть применена теория металлов. Жидкое состояние

внешнего ядра позволяет утверждать, что температурный градиент в ядре не превосходит адиабатический.

Хотя вопрос о составе ядра остается дискуссионным, тем не менее, в последние годы появляется все больше материалов, подтверждающих большую роль железа в его составе.

Уравнение состояния железа сейчас хорошо известно до давлений, включающих и соответствующие давления в области ядра. Поэтому предположение о железном ядре позволяет определить температуру ядра по давлению и плотности. Однако получаемые при этом температуры неоправданно высоки: от 6000^0K на границе ядра до 11000^0K в центре Земли. По-видимому, ядро не может быть чисто железным, хотя железо и играет большую роль при описании физико-химических свойств ядра. Предположение о том, что ядро состоит из сплава железа, например, с кремнием, сразу делает вопрос о температуре весьма неопределенным.

Температура плавления ядра. Обычно температура в ядре оценивается по температуре плавления железа, при этом применяют формулу Симона:

$$p/a = (T_m/T_{m0})^c - 1, \quad (8.13)$$

которая была сначала получена эмпирически, а затем выведена из формулы Линдемана (8.11). Здесь a и c – постоянные. Пользуясь экспериментальными данными, для величины c получено значение $c = 1,9$. На рис. 8.5 приведена кривая плавления Fe для условий в ядре, если для железа $T_{m0} = 1805^0K$.

Адиабатическая температура. На рис. 8.5 пунктиром дана кривая плавления для железа, полученная по методу критических концентраций дефектов и уравнению состояния для железа. Эта кривая соответствует значению $c = 2,15$ в формуле Симона (8.13). Если считать, что переход к твердому внутреннему ядру вызван кристаллизацией, то по кривым на рис. 8.5 можно подсчитать температуру, которая на глубине 5000 км равна 6000^0K . Конечно, наличие примесей к железу может довольно заметно изменить эту температуру. При оценке адиабатической температуры независимо от гипотезы о железном составе ядра используется формула для адиабатической температуры, которая для случая жидкого слоя примет вид:

$$T^3/\rho V_P^3 = const. \quad (8.14)$$

Приняв T на глубине 5000 км за единицу, получим температуры в ядре (табл. 8.6).

При $T_{5000} = 6000^0K$ находим температуру на границе ядра с мантией $T_{2900} = 4300^0K$, что лежит внутри пределов температуры на границе ядра (см. рис. 8.4). Интересно отметить, что полученный адиабатический градиент практически совпадает с градиентом температуры плавления для железного ядра (см. рис. 8.5). Адиабатический градиент для железного ядра, вычисленный по уравнению состояния железа, вдвое меньше (табл. 8.6) и дает на границе ядра $T_{2900} = 5200^0K$, что совпадает с предельной температурой плавления оболочки.

Таблица 8.6. Распределение температура в ядре в долях T при $H = 5000$ км: $T_{H=5000} = 1$. При $T_{5000} = 6000^0K$ находим $T_{2900} = 4300^0K$ [Магницкий, 1965, с. 38].

Глубина, H , км	T_H / T_{5000}	
	[Жарков, 1962]	По формуле (8.10)
2900	0.86	0.72
3500	0.92	0.81
4000	0.95	0.89
5000	1.00	1.00

Конечно, принятое значение $T_{5000} = 6000^{\circ}\text{K}$ может быть заметно завышенным, так как добавление к железу, например, примесей кремния в количестве 20% снижает температуру плавления на 300°K . Если же ядро состоит в основном не из железа, а из металлизированных силикатов, то сказать что-либо о температуре ядра еще труднее. Однако, применяя формулу Линдемана, можно все еще оценить и температуру плавления металлизированных силикатов. На рис. 8.5 кривая «силикаты» показывает предполагаемый ход плавления.

Обобщенная температура по радиусу Земли

1. По В.А. Магницкому [Магницкий, 1965, с. 38-45]. Подводя итог имеющихся сведений о температуре земных недр, можно отметить следующие основные температуры: $T_{100} = 1100-1300^{\circ}\text{C}$, $T_{400} = 1400-1700^{\circ}\text{C}$, $T_{2900} = 2200-4700^{\circ}\text{C}$. Если провести плавную кривую через середины этих интервалов (точки А, В, С), то получим наиболее вероятное распределение температур внутри Земли по имеющимся у нас данным (рис. 8.6).

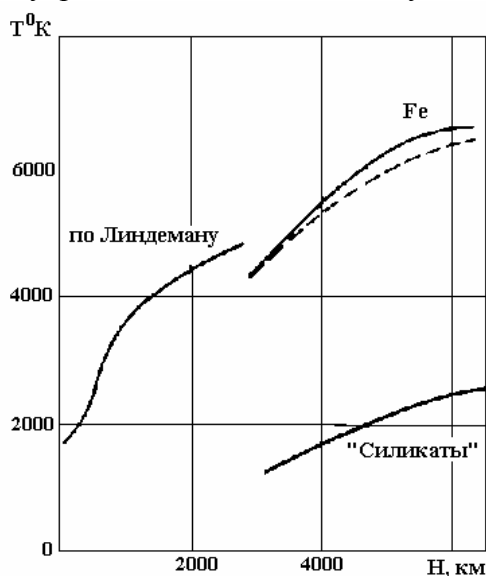


Рис. 8.5. Кривая плавления Fe для условий в ядре при $T_{m0} = 1805^{\circ}\text{K}$. Пунктиром для железа проведена кривая плавления, рассчитанная с помощью метода критических концентраций дефектов в соответствии с уравнением состояния железа [Магницкий, 1965, с. 37].

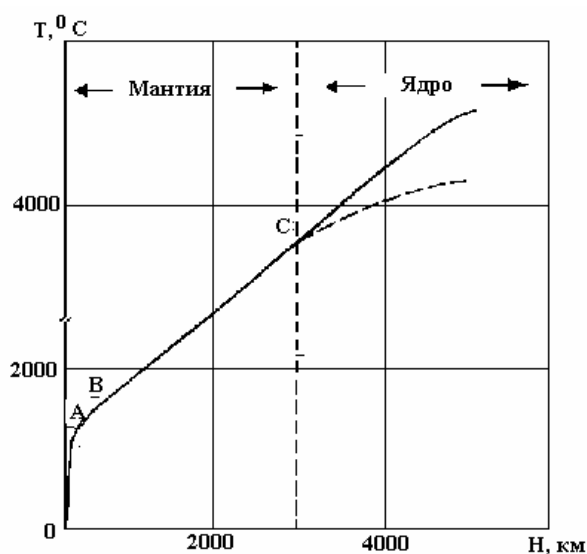


Рис. 8.6. Вероятное распределение температур внутри Земли [Магницкий, 1965, с. 38]

Для ядра на глубинах больше 2900 км кривая температур проведена до точки С по адиабате. Пользуясь формулой (8.14), получим для глубины 5000 км температуру 5000°С, что по существу не отличается от простой экстраполяции температурной кривой из оболочки в ядро. Пунктиром показан ход кривой температуры от точки С по адиабате в жидком ядре железного состава.

2. По Дж. Джекобсу [1979, с. 116-137]. Разумное с точки зрения термодинамики объяснение понижения температурного градиента с увеличением глубины дал Дж. Джекобс. Кратко, согласно [Шейдеггер, 1987, с. 102-104], суть сводится к следующему.

Определение распределения температуры внутри Земли следует, в принципе, начать с распределения плотности, из которого, применив закон тяготения Ньютона, можно вычислить распределение давления с глубиной (см. главу 5). Далее необходимо по аналогии с зависимостью между сжимаемостью и давлением предположить, что объемный коэффициент температурного расширения α зависит от давления p по закону:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_0} + bp, \quad (8.15)$$

где α_0 и b – постоянные.

Теперь можно определить распределение температуры внутри Земли. Адиабатический градиент температуры (при постоянной энтропии) удовлетворяет уравнению:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_{S=const} = \frac{\alpha T}{\rho C_p}, \quad (8.16)$$

где T – температура, ρ – плотность и C_p – теплоемкость при постоянном давлении, S – энтропия. Подставляя (8.15) в (8.16) получим:

$$\frac{dT}{T} = \frac{dp}{\rho C_p \left(\frac{1}{\alpha_0} + bp\right)}. \quad (8.17)$$

Если далее предположить, что C_p – величина постоянная, то полученная зависимость может быть проинтегрирована:

$$\ln T = \frac{1}{C_p} \int \frac{dp}{\rho \left(\frac{1}{\alpha_0} + bp\right)}. \quad (8.18)$$

Поскольку зависимость плотности от глубины (и от давления) приблизительно известна, то уравнение (8.18) может быть проинтегрировано численно.

Если начать все вычисления с глубины $H = 100$ км, на которой положить $T = 1500^\circ\text{K}$, то результатом вычислений по схеме (8.15) – (8.18) будет зависимость, качественно близкая зависимости на рис. 8.6 при значении температуры центре Земли примерно 6000°K .

Новые данные о тепловом поле Земли

Данные о распределении температуры внутри Земли, приведенные в главе 8, как можно было видеть, использованы, в основном, из литературы 1960-1970-х гг. Новые

использованные нами данные, приведенные в работах [Смирнов, Сугробов, 1979, 1980а, б; Смирнов, Сугробов, Галушкин, 1982; Рыкунов, Рогачева, 1991; Кирюхин, Делемень, Гусев, 1991; Сорохтин, Ушаков, 2002], в общем объеме «тепловых» данных о Земле составляет небольшую величину. И сделано это было вполне сознательно по следующим причинам.

Все использованные нами данные, по сути, являются самосогласованными, подогнанными под определенную «тепловую» модель Земли, что и позволяет достаточно наглядно продемонстрировать «работу» различных физических и геофизических теорий и моделей в комплексе.

Новые же данные о тепловом поле Земли, полученные в последнее десятилетие, позволили уточнить значения некоторых параметров, сформулировать новые задачи и подходы, но пока не привели к каким-либо принципиально новым идеям. Эти новые данные, как и использованные нами в работе, в основном, «старые» данные, возможно, будут еще не один раз пересматриваться, уточняться и опять «подгоняться» к следующей приближенной термической модели Земли.

Тепловая модель Земли, как уже отмечалось выше, является самой умозрительной из всех геофизических моделей нашей планеты. Поэтому, представляется, что недоучет некоторых последних данных в настоящее время не является принципиальным моментом, на котором в настоящее время в учебной литературе можно было бы акцентировать внимание.

Литература

- Ацюковский В.А.* Общая эфиродинамика. Моделирование структур вещества и полей на основе представлений о газоподобном эфире. М.: Энергоиздат, 2003. 584 с.
- Болт Б.А., Хорн У.Л., Макдоналд Г.А., Скотт Р.Ф.* Геологические стихии. М.: Мир, 1978. 440 с.
- Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976 / Ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 638 с.
- Ботт М.* Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 375 с.
- Викулин А.В.* Мир вихрей. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.
- Викулин А.В., Водинчар Г.М., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А.* Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений и. Сборник докладов IV международной конференции. 14-17 авг. 2007. с. Паратунка Камч. обл. Петропавловск-Камчатский: ИКИРР ДВО РАН, 2007. 499 с.
- Гольдин С.В.* Физика «живой» Земли // Проблемы геофизики XXI века / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003. С. 17-36.
- Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
- Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: Изд-во ИЛ, 1963. 264 с.
- Гьюдис М., Бендиксен Й.* Энергия жизни // National Geographic. Россия. 2008. № 3. С. 138-161.
- Джекобс Дж.* Земное ядро. М.: Мир, 1979. 306 с.
- Дорфман Я.Г.* Всемирная история физики. С древнейших времен до конца XVIII века. М.: КомКнига, 2007а. 352 с.
- Дорфман Я.Г.* Всемирная история физики. С начала XIX до середины XX вв. М.: КомКнига, 2007б. 320 с.
- Жарков В.Н.* Физика ядра Земли // Труды ИФЗ АН СССР. 1962. Т. 20.

- Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В.* Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. М.: Наука, 1971. 384 с.
- Исаков А.Я.* Концепции современного естествознания. Часть 1. Древние цивилизации. Античный период. Эпоха Возрождения. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. 165 с.
- Кирюхин А.В., Делемень И.Ф., Гусев Д.Н.* Высокотемпературные гидротермальные резервуары. М.: Наука, 1991. 160 с.
- Ковалев Г.Н., Кутыев Ф.Ш.* Оценка температурных условий в мощных пеплогазовых струях Толбачинского извержения 1975 г. (Камчатка) по структуре вулканических бомб // Доклады АН СССР. 1977. Т. 237. № 5. С. 1171-1174.
- Круть И.В.* Введение в общую теорию Земли. Уровни организации систем. М.: Мысль, 1978. 368 с.
- Кутыев Ф.Ш.* К энергетике геологических процессов // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. С. 69-75.
- Любимова Е.А.* Термика Земли и Луны. М.: Наука, 1968. 280 с.
- Макдоналд Г.* Вулканы. Фундаментальные труды зарубежных ученых по геологии, геофизике и геохимии. М.: Мир, 1975. 432 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
- Мархинин Е.К.* Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
- Маршалл Э., Стэнмейер Дж.* Вот-вот начнется настоящее светопредставление // National Geographic. Россия. 2008. № 2. С. 144-163.
- Михаил Александрович Садовский. Очерки. Воспоминания. Материалы / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2004. С. 242-246.
- Мархинин Е.К.* Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
- Рыкунов А.Л., Рогачева Л.Е.* Особенности распределения температуры в Кольской сверхглубокой скважине // Вулканология и сейсмология. 1991. № 6. С. 70-77.
- Святловский А.* Вулканы служат людям. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1969. 136 с.
- Сергеев А.* Почему мы доверяем науке? // Вокруг света. 2008. № 3. С. 120-128.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях. I. Тепловой поток и тектоника // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 59-73.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях. II. Карта измеренного и фонового теплового потока // Вулканология и сейсмология. 1980а. № 1. С. 16-31.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях. III. Оценки глубинных температур и мощность литосферы // Вулканология и сейсмология. 1980б. № 2. С. 3-18.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., Галушкин Ю.И.* Тепловой поток в зоне сочленения Алеутской и Курило-Камчатской островодужных систем // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 96-115.
- Смирнова В.* Тепловой портрет мозга // Наука и жизнь. 1986. № 8. С. 33-36.
- Советский энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1985. 1600 с.
- Сорохтин О.Г., Ушаков А.С.* Развитие Земли. М.: Изд-во МГУ, 2002. 560 с.
- Стейси Ф.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. 343 с.
- Тихонов А.Н.* О влиянии радиоактивного распада на температуру Земли // Изв. АН СССР. Серия геогр. и геофиз. 1937. № 3.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.
- Шейдеггер А.* Основы геодинамики. М.: Недра, 1987. 384 с.

Физический энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.

Фишети М. Тепло Земли // В мире науки. 2008. № 1. С. 82-83.

Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник. М.: Наука, 1983. 400 с.

Ясаманов Н. Сколько тебе лет, Земля? // Наука и жизнь. 1988. № 2. С. 82-86.

Lee W.H.K., Uyeda S. Review of heat flow data // Terrestrial Heat Flow. Washington. Nat. Acad. Sci. America. 1965.

9. РЕОЛОГИЯ ЗЕМЛИ, ПРИРОДА ЕЕ ОСНОВНЫХ СЛОЕВ И РАЗДЕЛЯЮЩИХ ИХ ГРАНИЦ

Хроника появления и развития основных представлений физики вязкоупругих тел и их применение к веществу Земли.

Среда в физике Земли. Процесс ползучести и его феноменологическое описание. Зависимость между напряжением и деформацией для некоторых реологических сред. Реология Земли. Вещество Земли в условиях высоких давлений и температур. Фазовые диаграммы.

Природа и характер границы Мохоровичича. Происхождение земной коры. Строение мантии. Ядро Земли

Хроника появления и развития основных представлений физики вязкоупругих тел и их применение к веществу Земли

1506 г. Леонардо да Винчи (*Leonardo da Vinci*, 1452-1519) первый установил понятие *сопротивления* жидких и газообразных сред движущимся в них телам. До этого под влиянием непререкаемого авторитета *Аристотеля* (384-322 до н.э.) и его «Физики» и на основании наблюдения за лодкой, *движущейся под действием паруса и неподвижной в безветрие*, считали, что причиной движения является среда и движение в пустоте не возможно: нет движителя (ветра). Ядро, в соответствии с представлениями Аристотеля, движется потому, что за ним смыкается воздух и, тем самым, толкает его вперед [Лойцянский, 1973, с. 17].

1660 г. Английский ученый *Р. Гук* (*R. Hooke*, 1635-1703) обнаружил, что при растяжении стержня его удлинение пропорционально приложенной силе – закон Гука [Физический, 1983, с. 139]. Среда с такими упругими свойствами в последствии получила название *тело Гука*. В обобщенном виде тензор деформаций с тензором напряжений для тела Гука связан с помощью соотношений (4.17) и/или (4.18).

1663 г. Французским ученым *Б. Паскалем* (*B. Pascal*, 1623-1662) открыт закон – закон Паскаля, согласно которому давление на поверхности жидкости, произведенное внешними силами, передается жидкости одинаково во всех направлениях [Физический, 1983, с. 523].

1684 г. *И. Ньютоном* (*I. Newton*, 1643-1727) открыт основной закон вязкого течения жидкости и газа:

$$F = \eta \frac{\Delta V}{\Delta z} S, \quad (9.1)$$

согласно которого динамическая *вязкость* (внутренне трение) η – есть свойство текучих тел оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой, отстоящей на Δz , $\frac{\Delta V}{\Delta z}$ - градиент скорости течения, или скорость сдвига. Величина $\varphi = 1/\eta$ - называется *текучестью*, величина $\nu = \eta/\rho$ называется *динамической вязкостью*. Тело, удовлетворяющее закону вязкого течения (1), называется *жидкостью Ньютона* [Физический, 1983, с. 99, 474].

1736 г. Выход в свет фундаментальной монографии *Л. Эйлера* (*L. Euler*, 1707-1783) «Механика, или Наука о движении в аналитическом изложении», в которой автор установил законы равновесия жидкостей и дал общие уравнения гидродинамики [Викулин, 2008, с. 30].

1783 г. Выход в свет труда *Д. Бернулли* (*D. Bernoulli*, 1700-1782) «Гидродинамика» - академический труд, выполненный автором во время его работы в Петербургской

Академии наук. С выходом этого трактата связано появление термина *гидродинамика* [Лойцянский, 1973, с. 20].

1819 г. Французскими учеными *П. Дюлонгом* (*P. Dulong*, 1785-1838) и *А. Пти* (*A. Petit*, 1791-1820) эмпирически установлен закон – закон Дюлонга-Пти, согласно которому теплоемкость твердых тел при постоянном объеме C_v и температуре $T \geq 300^0 K$ постоянна и равна:

$$C_v = 3Rn / M = 3R / \bar{A} \approx 6 \text{ кал}/(\text{моль} \cdot K). \quad (9.2)$$

Здесь $R = 8,314 \cdot 10^7 \text{ эрг}/(\text{моль} \cdot \text{град})$ – универсальная газовая постоянная, M – относительная молекулярная масса, n – число атомов в молекуле, $\bar{A}$ – средняя относительная атомная масса [Жарков, 1983, с. 174].

1822, 1845 гг. Анализ ошибочного решения задачи о вращающейся жидкости в цилиндре, приведенного в «Началах» И. Ньютона, сначала (1822) приводит *А. Навье* (*A. Navier*, 1785-1836) к идее введения количественной меры вязкости, пропорциональной градиенту скорости, а впоследствии (1845) *Дж.Г. Стокса* (*J. Stokes*, 1818-1903) к построению теории вязкости жидкостей – уравнению *Навье-Стокса* [История, 1971, с. 184-185; Храмов, 1983, с. 254-255].

1873 г. Уравнения Навье-Стокса в криволинейных координатах вывел *Д.К. Бобылев* [Лойцянский, 1973, с. 24], судя по всему, русский исследователь.

1827 г. Английским ботаником *Р. Брауном* (*R. Brown*, 1773-1858) под микроскопом наблюдалось беспорядочное движение цветочной пыльцы, взвешанной в воде – *броуновское движение*.

1905-1906 гг. *А. Эйнштейном* (*A. Einstein*, 1879-1955) совместно с польским ученым *М. Смолуховским* (*M. Smoluchowski*, 1872-1917) дана полная теория *броуновского движения*. Оказалось, что средний квадрат смещения частицы $\bar{L}^2$ за большое число ее столкновений пропорционален времени t : $\bar{L}^2 \sim Dt$. Коэффициент пропорциональности D называется коэффициентом *диффузии*.

Диффузия (от лат. diffusion – распространение, растекание) – взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга вследствие теплового движения частиц вещества. Диффузия происходит в направлении уменьшения концентрации вещества и ведет к его равномерному распределению по занимаемому объему. Диффундировать могут *дефекты, вакансии, дислокации, дырки* и другие *квазичастицы* [Физический, 1983, с. 58, 174, 186, 249-250].

1834 г. Французским инженером *Б.П.Э. Клайпероном* (*B. Clapeyron*, 1799-1864) из анализа *цикла Карно* (*S. Carnot*, 1796-1832) для конденсирующегося пара, находящегося в тепловом равновесии с жидкостью, получено термодинамическое уравнение.

1850 г. Немецкий физик *Р. Клаузиус* (*R. Clausius*, 1822-1888) усовершенствовал уравнение, полученное Клайпероном, и обобщил его на другие фазовые переходы – *уравнение Клайперона-Клаузиуса*, сопровождающиеся поглощением или выделением теплоты - т.н. *фазовым переходам I рода*: испарение, плавление, сублимация и др. Согласно уравнения Клайперона-Клаузиуса, теплота фазового перехода L (например, теплота испарения, теплота плавления) при равновесно протекающем процессе определяется выражением:

$$L = T_m \frac{dP}{dT_m} (V_2 - V_1), \quad (9.3)$$

где T_m – температура перехода (плавления) при изотермическом процессе, dP/dT_m – значение производной от давления по температуре на кривой фазового равновесия,

$(V_2 - V_1)$ - изменение объема вещества при переходе его из 1-ой фазы во 2-ю [Физический, 1983, с. 288].

С помощью уравнения Клайперона-Клаузиуса можно построить график изменения температуры плавления с глубиной для материала мантии [Стейси, 1972, с. 283-286].

Фазовый переход, в широком смысле – переход вещества из одной фазы в другую при изменении внешних условий – температуры, давления, магнитного и электрического полей и т.д.; в узком смысле – скачкообразное изменение физических свойств при непрерывном изменении внешних параметров.

Значение температуры, давления или какой-либо другой физической величины, при котором происходит фазовый переход, называется *точкой перехода*. Различают фазовые переходы двух родов. При *фазовом переходе I рода* скачком меняются такие термодинамические характеристики вещества, как плотность, концентрация компонентов; в единице массы выделяется или поглощается вполне определенное количество теплоты, называемой *теплотой фазового перехода*. При *фазовом переходе II рода* некоторая физическая величина, равная нулю с одной стороны от точки перехода, постепенно растет (от нуля) при удалении от точки перехода в другую сторону, при этом плотность изменяется непрерывно, теплота не выделяется и не поглощается [Физический, 1983, с. 800].

1848 г. Французским ученым *О. Браве* (*O. Bravais*, 1811-1863) высказана гипотеза, согласно которой пространственные решетки кристаллов построены из закономерно расположенных в пространстве точек – узлов (мест расположения атомов), которые могут быть получены путем параллельных переносов – трансляций.

1890-1891 гг. Русский ученый *Е.С. Федоров* (1853-1919) доказал возможность существования 230 пространственных групп симметрии кристаллов – 230 вариантов упорядочения расположения частиц в твердом теле.

1912 г. Немецкие физики *М. фон Лауэ* (*M. Laue*, 1879-1960), *П. Книппинг* и *В. Фридрих* (*W. Friedrich*, 1883-1968) открыли дифракцию рентгеновских лучей на кристаллах, окончательно утвердив представление о твердом теле как упорядоченной дискретной структуре [Физический, 1983, с. 735; Храмов, 1983, с. 43].

1853 г. Немецкими физиками *Г. Видеманом* (*G. Wiedemann*, 1826-1899) и *Р. Францем* (*R. Franz*) экспериментально установлен закон, согласно которому отношение коэффициента теплопроводности χ к удельному электросопротивлению σ для металлов при одинаковой температуре постоянно – закон Видемана-Франца:

$$\chi / \sigma = \text{const} . \quad (9.4)$$

1881 г. Датский физик *Л. Лоренц* (*H. Lorentz*, 1853-1928) экспериментально показал, что отношение, выражающее закон Видемана-Франца, пропорционально температуре T :

$$\chi / \sigma = LT, \quad (9.5)$$

где L – число Лоренца.

1902 г. Немецкий физик *П. Друде* (*P. Drude*, 1863-1906) дал физическое объяснение закону Видемана-Франца (9.5), рассматривая электроны в металле как газ и применив к нему методы кинетической теории газов [Физический, 1983, с. 75, 185].

1855 г. Французским ученым *Сен-Венаном* (*Баре де Сен-Венан, Saint-Venant*, 1797-1886) предложен принцип (*принцип Сен-Венана в теории упругости*), согласно которому уравновешанная система сил, приложенных к какой-либо части тела, вызывает в нем напряжения, быстро убывающие по мере удаления от этой части, и может быть заменена эквивалентной системой сил [Советский, 1985 с.1189].

1858 г. Г. Видеман установил существование деформации кручения у ферромагнитного стержня, по которому течет электрический ток, при помещении стержня в продольное магнитное поле [Физический, 1983, с. 75].

1866 г. Изучая природу вязкости в газах, английский физик Дж. Максвелл (J. Maxwell, 1831-1879) предположил, что параметры реального тела точнее будут описываться в том случае, когда напряжения в нем будут представлять собой суперпозицию чисто упругих и чисто вязких составляющих, каждая из которых определяется по законам Гука и Ньютона соответственно. Такое *вязкоупругое* тело стало называться *телом Максвелла*. Механическая модель тела Максвелла соответствует последовательному включению упругой пружины и поршня, движущегося в вязкой жидкости [Кольский, 1955, с. 103-108; Шейдеггер, 1987, с. 142].

1874 г. О. Майер (O. Meyer) рассмотрел другую, отличную от максвелловой, комбинацию упругого и вязкого элементов.

1892 г. Построения Майера обобщил В. Фохт (W. Voigt), который предположил, что компоненты напряжения в твердом теле выражаются в виде суммы двух групп членов, из которых первая пропорциональна деформации, а вторая – скорости изменения деформации. Тело с такими свойствами стало называться *телом Фохта* [Кольский, 1955, с. 104].

Тело Фохта, по сути, является *упруговязким*, так как представляет собой попытку учесть в первом приближении некоторые отклонения от идеальной упругости [Магницкий, 2006, с. 284]. Механическая модель тела Фохта соответствует параллельному включению упругой пружины и поршня, движущегося в вязкой жидкости [Кольский, 1955, с. 103-108].

В зависимости от той или иной комбинации соединения упругого и вязкого элементов различают и другие тела. Например, *тело Келивина* характеризуется *упругим последствием*: в случае, если изменяется напряжение, то тело по экспоненте переходит в состояние, соответствующее закону Гука (*телу Гука*). *Тело Кельвина-Фохта* – *жестковязкое тело*, соответствует последовательному включению упругой пружины с механической моделью Фохта. Механическая модель *тела Бингама* соответствует модели тела Максвелла, в которой между пружиной и поршнем помещен расположенный на горизонтальной плоскости блок, приходящий в движение только *после преодоления трения покоя* [Стейси, 1972, с. 223].

1871 г. Французским ученым Сен-Венаном построена теория течения идеально пластичного (неупрочняющегося) материала – *течение Сен-Венана* [Советский, 1985 с.1189; Физический, 1983, с. 546].

1873 г. Голландским физиком Ван-дер-Ваальсом (J.D. van der Waals, 1837-1923) предложено одно из первых уравнений состояния реального газа, учитывающего конечность объема молекул и их взаимодействие [Физический, 1983, с. 67].

1879 г. Выход в свет книги Г. Ламба (G. Lamb) «Treatise on the Mathematical Theory of the Motion of Fluids», известное по всем многочисленным последующим изданиям на многих языках мира как «Гидродинамика» – фундаментальное руководство, принадлежащее к числу самых лучших книг всей мировой литературы по гидродинамике. В этом труде впервые предмет гидродинамики изложен во всей своей полноте, включая упругость, вязкость и процессы распространения и *поглощения* волн в среде [Ламб, 2003].

Поглощение звука – явление необратимого перехода энергии звуковой (сейсмической) волны в другие виды энергии и, в частности, в теплоту. Характеризуется коэффициентом поглощения α , который определяется как обратная величина расстояния ($[\alpha] = \text{см}^{-1}$), на котором амплитуда волны уменьшается в $e = 2,718$ раз. Поглощение звука характеризуется также коэффициентом потерь $\varepsilon = \alpha\lambda/\pi$ или добротностью $Q = 1/\varepsilon$, λ – длина волны. Величина $\alpha\lambda$ – логарифмический декремент затухания.

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\rho V^2} \left[\frac{4}{3}\eta + \xi + \chi \left(\frac{1}{C_v} + \frac{1}{C_p} \right) \right], \quad (9.6)$$

где ρ - плотность среды, V – скорость звука (сейсмической волны), ω - круговая частота волны, η и ξ - коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости соответственно, χ - коэффициент теплопроводности, C_v , C_p - теплоемкости среды при постоянном объеме и давлении.

Если при прохождении волны нарушается равновесие состояния среды, то поглощение звука оказывается значительно большим и оно называется релаксационным поглощением и описывается формулой

$$\alpha = \frac{1}{2V_0^3} \frac{\omega^2 \tau (V_\infty^2 - V_0^2)}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (9.7)$$

где τ - время релаксации, V_0 и V_∞ - скорости звука при $\omega\tau \ll 1$ и при $\omega\tau > 1$ соответственно. В этом случае поглощение звука сопровождается дисперсией звука [Физический, 1983, с. 554].

1908 г. Немецкий физик Э. Грюнейзен (*E. Gruneisen*, 1877-1949) установил, что отношение коэффициента теплового расширения металла α к его удельной теплоемкости C_v (при постоянном объеме) не зависит от температуры – *закон Грюнейзена* (см. ниже).

1911 г. Э. Грюнейзен получил формулу, связывающую частоту колебаний атомов кристаллической решетки с упругими константами кристалла – *формула Грюнейзена*.

1919 г. Э. Грюнейзен развил общую теорию кристаллического состояния, он является одним из основоположников теории твердого тела [Храмов, 1983, с. 93; Физический, 1983, с. 139].

1910 г. Ф. Линдеман (*F. A. Lindemann*) построил теорию [Гутенберг, 1963, с. 164], позволяющую связывать температуру плавления T_m с критической (предельной) частотой колебаний кристаллической решетки, которую он вычисляет с помощью дебаевской теории твердых тел. Линдеман предположил, что отношение средней квадратичной амплитуды тепловых колебаний к квадрату постоянной решетки остается постоянным на кривой плавления (см. ниже).

1912-1914 гг. Голландским П. Дебаем (*P. Debye*, 1884-1966), немецким М. Борном (*M. Born*, 1882-1970), американским Т. Карманом (*T. Karman*, 1881-1963) и австрийским Э. Шредингером (*E. Schrodinger*, 1887-1961) физиками построена динамическая теория кристаллической решетки как совокупность связанных квантовых осцилляторов различных частот (1910-1912).

1912 г. Голландским физиком П. Дебаем установлена кубическая зависимость теплоемкости кристалла от температуры – *закон теплоемкости Дебая*. При температурах $T \gg \theta_d$ (в классической области) теплоемкость твердого тела описывается законом Дюлонга-Пти и может быть связана с упругими свойствами кристаллической среды.

Характеристическая температура твердого тела - температура Дебая θ_d , определяется соотношением $k\theta_d = \hbar\omega_d/2\pi$ или

$$\theta_d = \bar{V} \frac{\hbar}{2\pi k} \omega_d \approx \bar{V} (6\pi^2 n)^{1/3}, \quad (9.8)$$

где ω_d - предельная частота упругих колебаний кристаллической решетки, k , $\hbar$ – постоянные Больцмана (*L. Boltzmann*, 1844-1906) и Планка (*M. Planck*, 1858-1947)

соответственно, $\bar{V}$ – усредненная скорость звука, n – число атомов в единице объема [Физический, 1983, с. 145-146, 186].

В рамках теории Дебая закон Грюнейзена (для большинства элементов и простых соединений) записывается в виде [Жарков, 1983, с. 139]:

$$\frac{\alpha}{C_v} = \theta_d V \frac{d\theta_d}{dP}, \quad (9.9)$$

где V – объем тела, P – давление.

В рамках теории Дебая формула Линдемана, в виде, который принят в геофизике, записывается следующим образом [Жарков, 1983, с. 183]:

$$T_m(H) = T_{m,100} \left[\frac{\rho_{100}}{\rho(H)} \right]^{2/3} \left[\frac{\theta_d(H)}{\theta_{d,100}} \right]^2, \quad (9.10)$$

где ρ – плотность, θ_d – дебаевская температура, индекс (100) указывает, что значения параметров соответствуют глубине $H = 100$ км.

1922 г. А.Ф. Иоффе (1880-1960) объяснил низкую прочность, наблюдаемую у реальных кристаллов, влиянием *макроскопических дефектов* (трещин, надрезов) на их поверхности – *эффект Иоффе* [Физический, 1983, с. 735].

1923 г. Первый и наиболее существенный шаг на пути построения реальных моделей Земли сделали американские геофизики Л. Адамс (L.H. Adams) и Е. Вильямсон (E.D. Williamson). Они предложили использовать сейсмический параметр (4.69), зависящий от скоростей продольной и поперечной сейсмических волн: $F = K / \rho$ (K – модуль сжатия, ρ – плотность), для определения детального хода плотности в недрах Земли. Модуль сжатия, по определению, равен $K = \rho \Delta P / \Delta \rho$, где ΔP – приращение давления. Полагая, что приращение давления происходит по гидростатическому закону $\Delta P = \rho g \Delta H$, где ΔH – приращение глубины, получаем *уравнение Адамса-Вильямсона* в виде:

$$\Delta \rho = \frac{\rho g}{F} \Delta H, \quad (9.11)$$

позволяющее определить детальное распределение плотности в недрах Земли и соответственно построить реальную модель Земли [Жарков, 1983, с. 155-156; Магницкий, 2006, с. 258-263].

1924 г. Выход в свет, по-видимому, первой фундаментальной обобщающей работы Дж. Джеффриса (J. Jeffreys) «The Earth», в которой в комплексе проанализированы геофизические процессы, протекающие на Земле. В России эта книга известна в переводе с четвертого дополненного и переработанного издания [Джеффрис, 1960].

1926 г. В физику твердого тела один из ее основателей Я.И. Френкель (1894-1952) ввел понятие о тепловых *дефектах* [Жарков, 1983, с. 179] и указал на их роль в процессах диффузии [Физический, 1983, с. 735].

Дефекты кристаллической решетки (от лат. defectus – недостаток, изъян) – любое отклонение от ее идеального периодического атомистического строения. Дефекты могут быть либо атомарного масштаба, либо макроскопических размеров. Образуются в процессе кристаллизации под влиянием тепловых, механических и электрических воздействий. Простейшим точечным дефектом является *вакансия* [Физический, 1983, с. 152].

1929 г. И.Е. Таммом (1895-1971) введено понятие фонона – квантового колебательного движения атомов, составляющих кристаллическую решетку.

Динамическая теория кристаллической решетки позволяет объяснить упругие свойства (Земли) твердого тела, связав значения статических модулей упругости с силовыми константами. Тепловые свойства: температурный ход теплоемкости (*Дебая закон теплоемкости*), коэффициент теплового расширения (*Грюнейзена закон*) и *теплопроводности* – объясняются как результат затухания сейсмических упругих волн - изменения с температурой числа фононов и длины их свободного пробега [Физический, 1983, с. 735].

1930 г. В физику твердого тела наряду с дефектами по Френкелю В. Шоттки (W. Schottky, 1886-1976) введено понятие вакансии [Жарков, 1983, с. 180; Храмов, 1983, с. 301].

Вакансия (от лат. *vacans* – пустующий, свободный) – отсутствие атома или иона в узле кристаллической решетки. Вакансии находятся в термодинамическом равновесии с решеткой, возникают и исчезают в результате теплового движения атомов, беспорядочно перемещаются в кристалле, обмениваясь местами с соседними атомами. Движение вакансий является главной причиной диффузии атомов в кристалле. У алюминия, например, одна вакансия приходится на 10^{12} атомов. Несмотря на малую концентрацию, вакансии существенно влияют на физические свойства кристалла [Физический, 1983, с. 60].

1931 г. Американским физиком Л. Онсагером (L. Onsager, 1903-1976) установлена одна из основных теорем термодинамики необратимых процессов, согласно которой в термодинамических системах, в которых имеются градиенты температуры, концентрации компонентов, химических потенциалов и др., возникают необратимые процессы теплопроводности, диффузии, химических реакций и др. [Физический, 1983, с. 488].

1934 г. В физику твердого тела английским ученым Г. Тейлором (G.I. Taylor) и немецкими учеными Е. Орованом (E. Orowan) и М. Поляни (M. Polanyi) введено понятие о дислокациях. Оказалось, что при больших механических нагрузках реакция кристалла зависит от отсутствия или наличия дислокаций и других линейных дефектов кристаллической решетки [Жарков, 1983, с. 184].

Дислокации (от позднелат. *dislocation* – смещение), краевые и винтовые, которые называются *дисклинациями*, – дефекты кристалла, представляющие собой линии, вдоль которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. Механические свойства кристаллов – *прочность* и *пластичность* в значительной мере обусловлены существованием дислокаций и их движением [Физический, 1983, с. 163, 735].

1943 г. А.А. Ильюшиным построена теория малых упругопластичных деформаций.

Пластичность (от греч. *plastikos* – годный для лепки, податливый) – свойство материалов твердых тел сохранять часть деформации при снятии нагрузки, которые ее вызвали. *Пластичность кристаллов* – свойство кристаллических тел необратимо изменять свои размеры и форму под действием механических нагрузок. В поликристаллах перемещение зерен друг относительно друга происходит подобно движению частиц в сыпучих материалах и в некоторых случаях обеспечивает деформацию до 1000% - сверхпластичность [Физический, 1983, с. 546-549].

1948-1960 гг. Ф. Набарро (F.R.N. Nabarro) в Англии (1948) и Херрингом в США (1950) теоретически открыто явление диффузионной вязкости. Обобщение диффузионной вязкости на случай высоких давлений и применение ее к физике мантии Земли было сделано (1960) российским ученым В.Н. Жарковым.

В предельном случае высоких температур $T \gg \theta_d$ тепловой энергии достаточно, чтобы возбудить весь спектр тепловых колебаний атомов (фононов), что, физически, соответствует классическому приближению и позволяет для Земли фононами считать

упругие (продольные V_p и поперечные V_s) сейсмические волны и значение средней скорости $\bar{V}$ в (9.8) принять равной:

$$\frac{3}{\bar{V}^3} = \frac{1}{V_p^3} + \frac{2}{V_s^3}. \quad (9.12)$$

При этом значение дебаевской температуры оказывается равным $\theta_d = 660^0 K$, что для Земли определяет минимальный уровень глубины $H = 100$ км, начиная с которой классическое приближение $T_{H=100} \approx 1000^0 C > \theta_d$ заведомо выполняется и выражение для температуры Дебая (9.8) принимает вид [Жарков, 1983, с. 170-174, 181, 199]:

$$\theta_d \approx 10^{-3} \bar{V} \rho^{1/3}, \quad (9.13)$$

где θ_d измеряется в градусах при средней скорости $\bar{V}$ (9.12) в см/с и ρ в г/см³.

Таким образом, для определения термодинамических параметров большей части земных недр, начиная с глубины 100 км, может быть использована динамическая теория твердого тела Дебая, в основе которой заложены представления о кристаллической решетке как совокупности связанных осцилляторов, вакансиях, микроскопических и макроскопических дефектах и дислокациях, пластичности и др.

1950-е – 1960-е гг. Увеличение научного интереса к предмету «физика Земли», что сопровождалось «массовым» выходом книг по физике Земли и других планет как в нашей стране [Магницкий, 1953, 1965; Жарков, Паньков, Калачников и др., 1969; Жарков, Трубицын, Самсоненко, 1971], так и за рубежом [Гутенберг, 1963; Стейси, 1972; Ботт, 1974]. В результате в конце 1960-х гг. были созданы основы Новой глобальной тектоники [Новая, 1974] – современной «необычайно популярной» (по выражению Ю.М. Пуцаровского) геологической парадигмы.

1960-е гг. Существует очень много механизмов внутреннего трения, обеспечивающего затухание упругих волн в Земле (9.6) и (9.7), и неизвестно, какой из них играет наибольшую роль для Земли. По-видимому, три механизма должны быть наиболее существенными. Это – дислокационное затухание, скольжение по границам зерен (ползучесть Кoble [Теркот, Шуберт, 1985, с. 502-516]) и упорядочение под действием напряжений [Стейси, 1972, с. 235-236].

1960 г. Дислокационное затухание в металлах рассмотрено в обзоре Д. Ниблетта (D.N. Niblett) и Дж. Уилкса (J. Wilks).

1966 г. Применение теории дислокационного затухания в металлах к мантии рассмотрено в работе Р. Гордона (R.B. Gordon) и С. Нелсона (C.W. Nelson). В простой теории, результаты которой хорошо согласуются со многими экспериментальными данными, предполагается, что линия дислокации, закрепленная в двух точках, под действием напряжений выгибается и колеблется, как натянутая струна. Колебания линии дислокации отстают от напряжений по фазе, и это приводит к диссипации механической энергии.

1967 г. Е. Орован (E. Orowan) подверг сомнению эффективность дислокационного затухания в мантии и высказался в пользу механизма затухания, связанного со скольжением по границам зерен (с ползучестью Кoble). Приложенные напряжения делают некоторые положения атомов вдоль границ зерен более выгодными, а перемена знака напряжений приводит к тому, что более выгодными становятся другие положения. Т.о., в переменном поле напряжений атомы вдоль границ зерен перескакивают туда и обратно, запаздывание по фазе приводит к диссипации энергии.

1967 г. Д. Андерсон (D.L. Anderson) склоняется к механизму затухания, связанному с упорядочением атомов в междоузлиях. Этот механизм должен быть существенным, в

частности, в нижней мантии. Как и при скольжении по границам зерен, атомы перескакивают туда и обратно с запаздыванием по фазе относительно напряжений, что и определяет затухание [Стейси, 1972, с. 235-236].

2000-е гг. В последние годы было получено много новых данных о строении Земли и свойствах слагающего ее вещества [Николаев, 2003; Николаевский, 1966; Хаин, Короновский, 2007]. Эти данные используются для уточнения и построения новых моделей Земли [Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005; Сорохтин, Ушаков, 2002; Трухин, Показеев, Куницын, 2005] и выработки новой геологической парадигмы [Вихри, 2004; Милановский, 2007].

Среда в физике Земли [Магницкий, 2006, с. 284-285]

В предыдущих главах книги использовались преимущественно представления, развитые в механике простейших сплошных сред, каковыми являются идеальное упругое тело Гука и идеальная жидкость Ньютона. Между тем ряд особенностей механических свойств вещества Земли, проявляющихся в различных процессах, ясно показывает, что условия, с которыми встречаемся при изучении строения и физики Земли, далеко выходят за рамки идеальных сред.

Механические свойства вещества Земли отличаются сложностью и в известной мере противоречивостью. Например, вещество верхней мантии Земли реагирует на внешние нагрузки достаточной длительности и масштабов почти как вязкая жидкость. Вместе с тем даже в слое низких скоростей достаточно хорошо распространяются все виды упругих волн. В нижних частях коры существуют длительное время, измеряемое десятками миллионов лет, такие отклонения от равновесия, как «корни гор».

Сжатие Земли достаточно хорошо отвечает условиям равновесия вращающейся жидкости, несмотря на изменение в скорости вращения Земли. Вместе с тем собственные колебания Земли, нутация, приливы достаточно хорошо согласуются с выводами теории упругости, если не считать опять процессов затухания этих движений и запаздывания приливов по фазе.

Процесс возникновения глубоких и промежуточных землетрясений в рамках общепринятых моделей, опирающихся на принцип упругой отдачи Рейда, оказывается, в сущности, не объяснимым с обычных позиций механики упругой или идеально упругой среды.

Даже простое рассмотрение особенностей деформаций горных пород при геологических процессах создает огромные трудности при попытках их объяснения. Возникает сочетание таких свойств, как хрупкость и текучесть у одной и той же породы, как способность пород, находящихся в твердом состоянии, испытывать огромные необратимые деформации течения. Это касается всех типов пород – осадочных, изверженных, метаморфических. Вместе с тем в тех же породах эти деформации переходят в разрывы и разломы.

Все эти и ряд других явлений делают неизбежным рассмотрение ряда тел, отличающихся более сложным поведением, чем идеальное тело Гука и жидкость Ньютона.

Наиболее характерными явлениями неидеальной упругости являются процессы ползучести и релаксации напряжений. Рассмотрение этих процессов и позволяет установить исходные положения реологии вещества Земли.

Процесс ползучести и его феноменологическое описание

Медленные неупругие деформации [Жарков, 1983, с. 179-184]. Способность к медленным неупругим деформациям твердых поликристаллических тел обусловлена

наличием в них точечных и линейных дефектов кристаллической структуры – вакансий и дислокаций, включая и дисклинации – винтовые дислокации. Эти дефекты всегда присутствуют в реальных кристаллах. Они возникают при росте кристаллов после их образования и при пластической деформации. В физику твердого тела понятие о тепловых дефектах было введено Я.И. Френкелем в 1926 г., а понятие о дислокациях (краевых, винтовых и смешанных) было введено в 1934 г. Наряду с дефектами по Френкелю большое значение имеют дефекты по Шоттки (1935 г.), которые чаще называются просто вакансиями. Диффузионная вязкость поликристаллов была открыта теоретически в 1948-1950 гг. Обобщение диффузионной вязкости на случай высоких давлений и применение ее к физике мантии Земли было сделано В.Н. Жарковым в 1960 г.

Ползучесть. Рассмотрим деформацию сдвига [Магницкий, 2006, с. 285-290; Теркот, Шуберт, 1985, с. 562-563]. При деформировании кристаллических и стекловидных тел воздействиями, которые прикладываются в течение отрезка времени, существенно меньшего, чем некоторое характеристическое для данного материала время (такие деформации и напряжения в дальнейшем называются мгновенными), между деформациями ε и напряжениями σ в теле возникают соотношения, описываемые кривой, приведенной на рис. 9.1 в обобщенном виде.

До точки a (рис. 9.1 А) связь между ε и σ для чистого сдвига по закону Гука выражается в соответствии с (4.17) как:

$$\sigma = 2\mu\varepsilon, \quad (9.14)$$

где μ – один из коэффициентов Ламэ – модуль сдвига. Напряжение σ_a называется пределом пропорциональности, σ_b – пределом текучести или прочностью на течение, σ_d – прочностью на разлом. Участок bc называется областью текучести или пластической деформации, участок cd – областью упрочнения (в точке d происходит образование разрыва или разрушение материала). Описанные материалы называются пластическими.

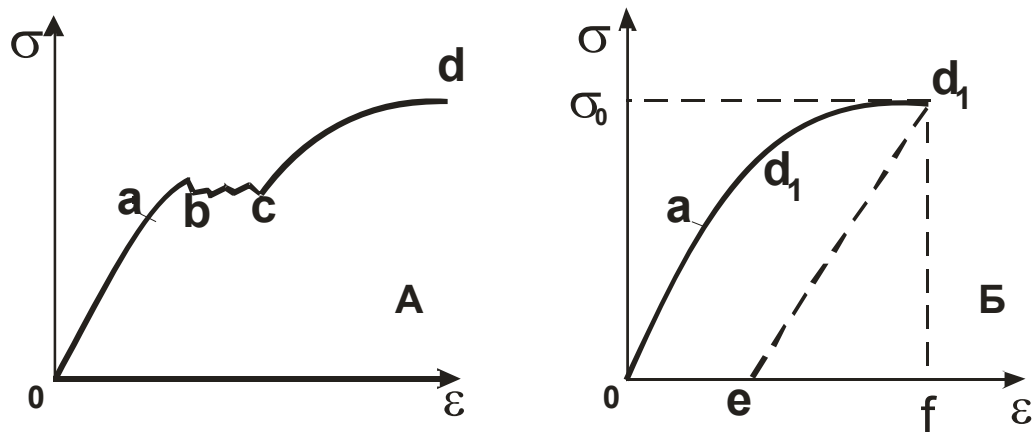


Рис. 9.1. Зависимость напряжений σ в среде от деформации ε ; А – в самом общем виде, Б – для хрупких тел [Магницкий, 2006, с. 286]. Пояснения в тексте.

Образование разрыва может произойти и до достижения прочности на течение, например, в точке d_1 (рис. 9.1 Б). Материалы, обладающие свойством разрушения без стадии течения, называются хрупкими.

Упругая идеально пластическая реология [Теркот, Шуберт, 1985, с. 562-563]. При низких всесторонних давлениях породы проявляют хрупкость, т.е. при больших приложенных напряжениях раскалываются. Однако, когда всестороннее (литостатическое) давление приближается к пределу прочности при хрупком разрушении

σ_0 , происходит переход от хрупкого, или упругого, поведения к пластическому (рис. 9.1 А). Переход от упругости к пластичности происходит при напряжениях, превышающих критическое значение σ_0 , называемого напряжением пластического течения или пределом упругости. В пластическом режиме материал течет и деформируется необратимо. После наложения нагрузки напряжение и деформация изменяются вдоль пути $Oabcd$ для пластического материала и вдоль пути Oad_1 для хрупкого материала. А после снятия нагрузки – вдоль пути d_1e , который практически параллелен начальному отрезку Oa , соответствующему упругой деформации, пути Oad_1e . В результате после снятия нагрузки возникает остаточная пластическая деформация Oe . В общем случае деформация среды, в которой происходит переход от упругости к пластичности, зависит от всей предыстории нагружения. На упругопластическую деформацию сильное влияние оказывает также температура. В частности, с ростом температуры величина предела упругого поведения обычно уменьшается. В большинстве исследований упругопластических деформаций предполагается, что кривые напряжение – деформация $\sigma(\varepsilon)$ не зависят от скорости приложения нагрузки. Таким образом, соотношение между напряжением и деформацией считается не зависящим от времени.

В самом общем виде вид кривой $\sigma(\varepsilon)$ для любого материала сильно зависит от условий, при которых данный материал находится: давления, температуры, скорости нагружения, длительности воздействия, предыдущей истории материала. Повышение давления и температуры ведет к усилению пластических свойств. Тела хрупкие при низких давлениях и температурах при повышении обоих или одного из этих параметров, делаются пластическими. Вместе с тем повышение одного давления ведет к повышению прочности материала. Наоборот, увеличение скорости нагружения ведет к усилению хрупких свойств. Даже жидкости при очень быстрых воздействиях разрушаются как хрупкие тела. Нагрузки в течение большого промежутка времени приводят, наоборот, к появлению процессов течения в материале.

Процесс постепенного нарастания деформации ε во времени при постоянном напряжении σ_0 , меньшем прочности на течение для данного материала, носит название *ползучести*.

Диффузионная ползучесть [Теркот, Шуберт, 1985, с. 502-516]. При очень низких уровнях напряжений преобладающим механизмом деформации пород путем ползучести является диффузия. Диффузионная ползучесть происходит благодаря диффузии атомов через внутренние области кристаллических зерен, когда к последним приложены напряжения. В результате диффузии происходит деформация зерен и возникает деформация породы. Диффузия также может происходить вдоль границ зерен. В некоторых случаях этот процесс преобладает над диффузией сквозь внутренние области зерен. Деформация кристалла, происходящая по механизму диффузии вдоль границ зерен, называется *ползучестью Кобле*.

Формула, связывающая зависимость скорости деформации от напряжения в рамках простой модели кристаллического твердого тела, следующая:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{12V_a D}{RTh^2} \sigma, \quad (9.15)$$

где D – коэффициент диффузии, R – универсальная газовая постоянная, V_a – объем активации, h – характерный размер кристаллических зерен, слагающих породу, T – температура.

Как видим, диффузионная ползучесть, также называемая *ползучестью Херринга-Наббаро*, приводит к линейному соотношению между скоростью деформации и напряжением. Это означает, что кристаллическое твердое тело ведет себя как ньютоновская жидкость с коэффициентом вязкости:

$$\eta = \frac{RTh^2}{24V_a D}. \quad (9.16)$$

Или, учитывая зависимость коэффициента диффузии от температуры T и давления P , выражение для коэффициента вязкости получим в виде:

$$\eta = \frac{RTh^2}{24V_a D_0} \exp\left(\frac{E_a + PV_a}{RT}\right) = \frac{RTh^2}{24V_a D_0} \exp\left(a \frac{T_m}{T}\right), \quad (9.17)$$

где E_a – энергия активации, D_0 – частотный множитель, T_m – абсолютная температура плавления кристаллической породы, T_m/T – приведенная температура. Параметры E_a , V_a , D_0 , a , T_m , обычно, определяются эмпирически.

Коэффициент диффузионной вязкости очень сильно изменяется с температурой и давлением. По сравнению с очень быстро меняющейся экспоненциальной функцией обратной абсолютной температуры температурная зависимость, задаваемая предэкспоненциальными множителями, несущественна. Благодаря этому с увеличением температуры вязкость η заметно падает. Из полученного равенства видно, что вязкость η – возрастающая функция давления.

Формула (9.17) получена для диффузионной ползучести в случае, когда атомы диффундируют сквозь зерна с коэффициентом диффузии D . Зависимость коэффициента вязкости от температуры и давления в том случае, если диффузия идет вдоль границ зерен, остается такой же, как и в случае диффузии сквозь зерна. Относительная роль этих двух механизмов диффузии – вдоль границ зерен и сквозь внутренние области зерен – определяется величиной отношения $\frac{\delta D_1}{hD}$, где δ – характерная длина зерна и D_1 – коэффициент диффузии вдоль границ зерен.

Дислокационная ползучесть [Теркот, Шуберт, 1985, с. 516-523]. Выше мы видели, каким образом перемещение вакансий в кристаллическом теле приведет к деформации ползучести. Теперь рассмотрим миграцию дислокаций и покажем, что при этом также происходит субсолидусная ползучесть. Дислокации представляют собой нарушения порядка в расположении атомов кристаллической решетки. Хотя существует большое многообразие сложных форм дислокаций, все они могут быть представлены в виде суперпозиции дислокаций двух основных типов: краевых и винтовых дислокаций.

Два основных процесса, которые реализуют дислокационную ползучесть, – это *скольжение* и *переползание* дислокаций.

Для краевых дислокаций процесс переползания сводится либо к удлинению, либо к укорочению лишней атомной плоскости, край которой является дислокацией.

Скольжение краевой дислокации представляет собой перемещение краевой дислокации в промежутке между соседней парой атомных плоскостей под действием приложенного к кристаллу сдвигового напряжения. Край дислокации, перемещаясь с одной атомной плоскости на другую, пройдет через всю решетку, это будет означать, что произошла некоторая сдвиговая деформация кристалла. Скольжение дислокаций – термически активируемый процесс, возникающий в результате воздействия на дислокацию сдвигового напряжения. Поскольку для этого требуется диффузия атомов через решетку, скольжение дислокаций является более быстрым процессом, чем переползание дислокаций.

Для количественного описания дислокационной ползучести предложено много различных формул. Поскольку все типы дислокационной ползучести являются термически активируемыми процессами, реология, определяемая такой ползучестью, зависит экспоненциально от давления и обратной абсолютной температуры (см. (9.17)).

В качестве примера рассмотрим один из подходов, в котором предполагается, что дислокации играют роль источников и стоков вакансий, подобную роли границ зерен в процессе диффузной ползучести. В этом случае можно воспользоваться формулой (9.15), из которой коэффициент эффективной вязкости можно получить в виде:

$$\eta_{eff} = \frac{RTb^2\mu^2}{24V_aD_0}\frac{1}{\sigma^2}\exp\left(\frac{E_a + PV_a}{RT}\right), \quad (9.18)$$

где b – вектор Бюргерса для дислокаций, μ – модуль сдвига (см. также [Жарков, 1983, с. 185]).

Как видим, коэффициент эффективной вязкости для дислокационной ползучести обратно пропорционален квадрату касательного напряжения и прямо пропорционален экспоненциальной функции давления, деленного на абсолютную температуру. Зависимость η_{eff} от напряжения приводит к тому, что породы легче деформируются в тех областях, где концентрируются напряжения.

Зависимость между напряжением и деформацией для некоторых реологических сред

Вязкость (внутренне трение) – свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Вязкость η измеряется в СГС $[\eta] = \text{з}/(\text{см}\cdot\text{с}) = 1 \text{ Пуаз (П)}$ или в СИ $[\eta] = \text{н}\cdot\text{с}/\text{м}^2 = \text{Па}\cdot\text{с}$ (Паскаль-секунда) = 10 П. Основной закон вязкого течения был установлен И. Ньютоном в 1687 г. [Физический, 1983, с. 99].

Вязкоупругость – свойство веществ в твердом состоянии быть как упругими, так и вязкими. При вязкоупругости напряжения и деформации зависят от *истории протекания процесса деформирования* и характеризуются рассеянием энергии на замкнутом цикле деформации (нагрузки) и постепенным исчезновением деформации при полном снятии нагрузок. При этом четко выражены *ползучесть материалов* и *релаксация напряжений*, которая может сопровождаться *фазовым переходом* [Физический, 1983, с. 100, 634].

Для сравнения приведем значения вязкости некоторых хорошо известных веществ. Вязкость воды при комнатной температуре равна 0,01 П, глицерина – 7 П, асфальта – 10^{10} – 10^{12} П, стекла при температуре отжига – 10^{13} П, меди при 200°C – 10^{18} П, стали при 450°C – порядка 10^{18} – 10^{20} П. Как будет показано ниже, вязкость вещества Земли изменяется в больших пределах 10^{-2} – 10^{24} П – т.е. от вязкости воды до вязкости самых прочных материалов.

Память среды. Искомые зависимости можно получить разными путями, исходя из некоторых схем, представлений о характере конкретных физических процессов и общих термодинамических соображений. Воспользуемся феноменологическим подходом, основанным на принципе Больцмана и Вольтера, позволяющем с помощью функции $K(t - \mathcal{G}, \sigma)$ учесть состояния материала в моменты времени $\mathcal{G}$, предшествующие моменту t :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{2\mu} + \int_0^t K(t - \mathcal{G}, \sigma) \cdot \sigma(t) d\theta. \quad (9.19)$$

В соотношении (9.19) первое слагаемое справа дает деформацию, полученную по закону Гука (4.17) или (9.14) для момента времени t .

Моделируя функцию $K(t - \mathcal{G}, \sigma)$ экспериментальными и теоретическими данными о ползучести, после преобразований соотношения (9.19) основное реологическое уравнение примет вид [Магницкий, 2006, с. 291-292]:

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{\mu\eta + \lambda\eta_1}{\eta\eta_1} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\lambda\mu}{\eta\eta_2} \sigma = \mu \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \frac{\lambda\mu}{\eta} \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (9.20)$$

где μ - эффективный модуль сдвига, η - эффективная вязкость, η_1 и η_2 - коэффициенты, характеризующие разными по сущности обратимым и необратимым физическими процессами, $\lambda = \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}$ - модуль упрочнения.

Принцип суперпозиции заключается в следующем [Хайкин, 1963, с. 478]. Представим себе, что мы подвергли тело какой-либо деформации, например, растяжению, а затем другой деформации, например, сдвигу. Пока предел пропорциональности не достигнут (т.е. пока тело остается гуковым), модули упругости, характеризующие упругие тела, в данном случае модули Юнга E и сдвига μ , являются константами, не зависящими от того, деформировано тело или нет. Поэтому при сдвиге в теле возникнут такие же дополнительные деформации $\sigma_\mu = \mu\varepsilon$, как и в том случае, если бы тело не было предварительно растянуто $\sigma_E = E\varepsilon$. Общее напряжение в теле будет представлять собой сумму тех напряжений (в данном случае: $\sigma_\mu + \sigma_E$), которые возникли бы, если бы тело было подвергнуто только растяжению или только сдвигу. Это и есть принцип суперпозиции (наложения) в применении к нашему конкретному случаю. Он справедлив потому, что упругие свойства тела не зависят от деформации, почему и соблюдается закон Гука. Принцип суперпозиции используется и при построении моделей различных реологических сред.

Среда Максвелла [Шейдеггер, 1987, с. 141-142]. Для вязкой (ньютоновской) жидкости напряжения и деформация связаны следующим образом:

$$\sigma = 2\eta \frac{\partial\varepsilon}{\partial t}. \quad (9.21)$$

Полагаем, что в вязко-упругой среде выполняется принцип суперпозиции и общее напряжение определяется суммой $\sigma_1 + \sigma_2$ вязкой ($\sigma_1 = 2\eta \frac{d\varepsilon}{dt}$) и упругой ($\sigma_2 = 2\mu\varepsilon$) составляющих. Тогда, выражая вязкую составляющую через упругую ($\sigma_1 = \frac{2\eta}{2\mu} \frac{d\sigma_2}{dt}$), для суммарного напряжения, опуская нижний индекс, получаем выражение, представляющее собой комбинацию соотношений (9.14) и (9.21):

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{2\mu_M} \frac{\partial\sigma}{\partial t} + \frac{\sigma(t)}{2\eta_M}, \quad (9.22)$$

где коэффициенты «жесткости» μ_M и «вязкости» η_M называются постоянными Максвелла (M). Отметим, что полагая модуль упрочнения равным нулю $\lambda = 0$, выражение (9.22) получается из (9.20). Если теперь допустить, что деформация поддерживается на постоянном уровне ($\varepsilon = \text{const}$), то релаксация напряжений со временем происходит по экспоненциальному закону, характеризующему постоянной τ - «временем релаксации» тела:

$$\sigma(t) \approx e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{\eta_M}{\mu_M}. \quad (9.23)$$

С другой стороны, если считать, что напряжение является постоянной величиной ($\sigma = const = \sigma_0$), то деформация (ползучесть) происходит с постоянной скоростью:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\sigma_0}{2\eta_M} = const. \quad (9.24)$$

Реологическая среда, описываемая уравнениями (9.22) – (9.24), называется *средой Максвелла* (*J. Maxwell*).

Как видим, если время приложения силы мало по сравнению с τ , тело ведет себя подобно упругому телу с модулями Ламэ λ_M и μ_M , если же это время велико по сравнению с τ , поведение тела подобно поведению жидкости с вязкостью $\eta_M = \tau\mu_M$ [Кольский, 1955, с. 104].

Тело Фохта [Кольский, 1955, с. 104-106]. Рассмотрим другой тип соединения упругого и вязкого элементов. Фохт предположил, что компоненты напряжения в твердом теле выражаются в виде суммы двух групп членов, из которых первая пропорциональна деформациям, а вторая – скоростям изменений деформации. Таким образом, в уравнениях движения (4.17) каждая компонента напряжения должна определяться суммой из двенадцати членов: шести членов с коэффициентами Ламэ, пропорциональными деформации и шести членов с соответствующими постоянными вязкости, пропорциональными скоростям деформации.

В случае одноосного растяжении стержня, когда боковая поверхность свободна от напряжений, для тела Фохта зависимость между напряжением и деформацией имеет вид:

$$\sigma = E\varepsilon + E' \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (9.25)$$

где модуль продольной упругости E равен:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu},$$

а коэффициент нормальной вязкости E' определяется соотношением:

$$\frac{E'}{E} = \frac{\lambda\mu\tau_1 + (3\lambda^2 + 4\lambda\mu + 2\mu_2)\tau_2}{(\lambda + \mu)(3\lambda + 2\mu)},$$

где

$$\tau_1 = \frac{\lambda'}{\lambda}, \quad \tau_2 = \frac{\mu'}{\mu}.$$

Оказалось, что продольные колебания стержня, поведение которого подобно телу Фохта, можно представить уравнением движения второго порядка, логарифмический декремент затухания Δ которого определяется выражением:

$$\Delta = \pi\nu \frac{E'}{E},$$

где ν - частота колебаний.

Тело Кельвина [Шейдеггер, 1987, с. 142-144]. Комбинация уравнений для упругих тел Гука (9.14) и ньютоновских жидкостей (9.21) в виде:

$$\sigma(t) = 2\mu_K \cdot \varepsilon(t) + 2\eta_K \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (9.26)$$

описывает тело Кельвина с постоянными μ_K и η_K и временем релаксации $\tau = \frac{\eta_K}{\mu_K}$.

Тело Кельвина характеризуется упругим последствием. Если имеет место изменение напряжения, то тело по экспоненте приходит в состояние, соответствующее закону Гука, что позволяет получить соотношение для постоянных величин материала из наблюдений фазовых смещений в вынужденных колебаниях при разных значениях частоты $\nu = 1/\tau$.

Если в уравнение (9.21) ввести предел текучести $\mathcal{G}$, то можно получить реологические тела обобщенного вида. Если принять $\mu = 0$, то получим соотношение:

$$\sigma(t) = \mathcal{G} + 2\eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (9.27)$$

которое является определяющим уравнением для *тела Бингама*. В (9.27) коэффициент η называется пластической вязкостью. Вводя в конститутивные уравнения все большее число понятий, мы тем самым можем моделировать разные стороны процесса деформации. Но, в то же время, при этом все больше усложняются уравнения, что при интерпретации получаемого результата может привести к потере физического смысла.

Согласно классификации Ф. Стейси [1972, с. 223], тело Максвелла является упруговязким, тела Кельвина и Фохта – жестковязкими, и тело Бингама – вязкопластическим.

Реология Земли

Реология пород земной коры [Теркот, Шуберт, 1985, с. 552-556]. Приповерхностные породы проявляют не только свойство хрупкости, обуславливающее образование отдельностей и разломов, но и, как об этом свидетельствует существование складок самого различного пространственного размера, деформируются жидкоподобным образом. Складкообразование можно приписать либо пластической деформации, либо жидкообразному течению. Имеются наблюдательные данные, свидетельствующие о возможности обоих этих процессов.

Пластические деформации, в основе которых заложена упругая идеально пластическая реология, описаны выше. Показано, что переход от упругости к пластичности происходит при напряжениях, превышающих критическое напряжение пластического течения.

Ниже покажем, как относительно холодные породы могут течь наподобие жидкости.

Микроструктура многих смятых в складки пород указывает на то, что деформация, приведшая к образованию складок, была результатом переноса массы путем диффузии. Однако исследования метаморфических реакций в породах свидетельствуют о том, что температура во время складкообразования составляла лишь малую долю температуры солидуса. Поэтому деформация не могла вызываться термически активируемой диффузией атомов, которая была рассмотрена выше. В данном случае скорость диффузного переноса массы увеличивается благодаря *растворению под давлением* в жидкой пленке, присутствующей между зернами породы. В этом процессе материал

растворяется в тех областях, где давление или напряжение велико, и выпадает в осадок там, где оно низко. Компрессионная ползучесть при растворении подобна ползучести Кобле в том отношении, что в обоих случаях перенос массы происходит вдоль границ зерен.

Примером деформации, обусловленной растворением под давлением, может служить уплотнение осадков.

Считается, что растворение под давлением играет важную роль при непрерывных деформациях самых разных пород земной коры. Исследования смятых в складки пород показали, что во многих из них действительно происходит такой процесс. Пока на границах зерен присутствует вода, она может действовать как растворитель минералов, слагающих зерна. Растворенные минеральные частицы диффундируют вдоль границ зерен из областей высокого давления, где растворимость велика, в области низкого давления, где она мала. Диффузия растворенных минералов приводит к ползучести.

Качественный расчет компрессионной ползучести при растворении можно выполнить подобно тому, как выше была рассчитана ползучесть, обусловленная диффузией вдоль границ зерен. В результате деформация, осуществляемая механизмом компрессионной ползучести, оказывается пропорциональной приложенному напряжению и эквивалентна течению ньютоновской жидкости. Коэффициент вязкости такой жидкости для кварца при температуре порядка 500°C оказывается порядка 10^{17} П.

Полученное значение коэффициента вязкости для пород земной коры при 500°C является низким. Тем не менее, ясно, что компрессионная ползучесть при растворении является важным механизмом деформации пород коры, на основе которого может происходить вязкое складкообразование при весьма низких температурах.

Реология мантии. Вязко-упругие свойства мантии могут быть определены несколькими способами: из реологического состояния $\sigma(\varepsilon)$ вещества мантии, ее механических свойств, с помощью данных о землетрясениях и других (например, данных о теплопроводности, см. [Жарков, 1983, с. 181-183]).

Реологический аспект рассмотрим в соответствии с данными работы [Теркот, Шуберт, 1985, с. 523-525, 536-551]. Выше были рассмотрены два главных механизма субсолидусной деформации пород – диффузионная и дислокационная ползучести. Какой из этих механизмов управляет течениями в мантии не известно, но на этот счет можно проводить некоторые более и менее обоснованные предположения. Если преобладает диффузная ползучесть, то мантия ведет себя как ньютоновская жидкость. Если же дислокационная – то поведение ее соответствует жидкости со степенной реологией:

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^n \quad (9.28)$$

при $n = 3$, где $n=2k+1$, k – целое число, C – положительная постоянная. (При $k = 0$, $n = 1$, получаем течение ньютоновской жидкости (9.21) и коэффициент C равен удвоенной вязкости жидкости $C = 2\eta$. С увеличением n градиенты скорости у стенок (где сдвиговое напряжение максимально) увеличиваются. Там, где напряжения малы, течение имеет практически жесткое ядро. «Тупой» профиль скорости при больших n возникает вследствие зависимости коэффициента эффективной вязкости от напряжения.)

Хотя понимать реологию мантии весьма важно, для построения качественной картины течения в мантии нет особой необходимости различать реологические уравнения (9.28) с $n = 1$ и $n = 3$. Если бы коэффициент вязкости определялся как коэффициент эффективной вязкости для дислокационной ползучести, то течения в мантии лишь количественно отличались бы от течения ньютоновской жидкости. Оказывается, однако, что с точки зрения влияния на мантийные течения намного более существенной является одинаковая для обоих видов ползучести зависимость коэффициента вязкости от температуры и давления, а не та или иная возможная зависимость от напряжения.

Информацию о реологии мантии можно получить, исследуя данные о послеледниковых поднятиях. Эти данные находятся в соответствии с предположением о том, что вещество мантии является ньютоновской жидкостью. Тогда коэффициент вязкости во всей мантии имеет порядок 10^{22} П.

Другим важным источником информации о реологии мантии являются лабораторные исследования ползучести. Поскольку основным минералом мантии является оливин, исследования его ползучести представляют особый интерес. Данные измерений сухого оливина при температуре 1400°C хорошо описываются реологическим законом с $n = 3$. Оказалось, что и другие геологические материалы в лабораторных условиях деформируются при высоких температурах в соответствии с нелинейным законом ползучести: $2 < n \leq 6,5$. (В соответствии с [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 55] мантия состоит из леорцита, который, согласно [Геологический, 1978, с. 390], представляет собой разновидность перидотита, сложенного переменными количествами пироксена и оливина с примесью хромшпинелида и магнетита.)

Как видим, экспериментальные данные согласуются с теоретической зависимостью для дислокационной ползучести. Это можно считать доказательством того, что при скоростях деформации, достигаемых в лаборатории, доминирующим механизмом деформации является дислокационная ползучесть.

Практическое постоянство коэффициента вязкости в мантии можно понять, рассмотрев его сильную зависимость от температуры и давления (9.17), (9.18), (9.28). Увеличение температуры мантии с глубиной стремится уменьшить коэффициент вязкости. Однако нарастание давления с глубиной, наоборот, стремится увеличить его. Эти два противоборствующих эффекта могут взаимно скомпенсироваться и сохранить коэффициент вязкости почти постоянным.

В соответствии с механическими свойствами мантии [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 79-81] совместить ее реологические (вязкопластические) свойства можно лишь в одном случае, считая, что мантийное вещество ведет себя подобно вару, т.е. очень вязкой жидкости. Используя приведенные выше значения отклонения геоида от равновесной фигуры эллипсоида вращения жидкого тела (около ± 100 м), характерные размеры мантии (примерно 3000 км) и возможные средние скорости конвективных течений в мантии (порядка 10 см/год), можно оценить среднюю вязкость всей мантии, которая по порядку величины совпадает с приведенной выше оценкой $3 \cdot 10^{22}$ П.

Судя по скорости вздымания областей, сравнительно недавно (около 10 тыс лет назад) освободившихся от нагрузки покровных ледников, таких, как Балтийский и Канадский континентальные щиты, вязкость мантийного вещества под континентами близка к 10^{22} П. Теоретические определения вязкости нижней мантии по кажущейся скорости дрейфа полюсов приводят к значениям порядка $(6 \cdot 10^{23} - 5 \cdot 10^{24})$ П. По расчетам, принимавшим во внимание адиабатическое распределение температуры в мантии, ее вязкость меняется от $(10^{20} - 5 \cdot 10^{20})$ П в астеносфере до $6 \cdot 10^{23}$ П в нижней мантии на глубинах около 2700 км.

Рассмотрим случай, когда к среде прикладывается периодическое напряжение $\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}$, что вызовет появление деформации $\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$. Тогда из общего выражения (9.20) можно получить реологическое частотное соотношение

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \omega),$$

которое позволит изучать реологические свойства среды как функции частоты ω [Магницкий, 2006, с. 294-305]. При таком рассмотрении характер изменений реологических свойств мантии наглядно будет проявляться в поведении так называемого фактора сдвиговой добротности Q , который обратно пропорционален диссипативной функции $1/Q$, определяющей затухание сейсмических волн и собственных колебаний Земли на разных глубинах мантии. Используя экспериментальные данные о затухании

упругих волн в Земле, удалось построить модели распределения этого фактора в мантии. Согласно таким моделям максимальная добротность мантии (около 600) наблюдается на глубинах около 1800-2500 км, в астеносфере и на подошве нижней мантии фактор добротности снижается приблизительно до 100. Можно ожидать, что в непосредственной близости от границы ядра механическая добротность мантийного вещества снижается еще больше.

В соответствии с приведенными данными о величине добротности в астеносфере верхней мантии под океаническими литосферными плитами на глубинах до 85-100 км вязкость частично расплавленного мантийного вещества не должна превышать $(10^{19} - 10^{20})$ П. Под континентальными плитами на глубинах около 250-300 км вязкость мантии возрастает до значений около $(10^{21} - 10^{22})$ П. В нижней мантии вязкость повсеместно возрастает с глубиной, достигая на глубинах около 2000 км значений порядка $(10^{24} - 10^{25})$ П. На еще больших глубинах в нижней мантии вязкость вещества вновь начинает уменьшаться, снижаясь, вероятно, до $(10^{19} - 10^{20})$ П в переходном слое D'' . Наконец, можно ожидать, что на подошве нижней мантии в слое Берзон, где происходит дезинтеграция мантийного вещества, его вязкость резко падает на много порядков, приближаясь в погранслое на поверхности земного ядра к вязкости «ядерного» вещества в самом ядре.

Данные о землетрясениях [Жарков, 1983, с. 189] позволяют приведенные выше значения о максимальной вязкости $(10^{24} - 10^{25})$ П на глубинах около 2000 км распространить и на меньшие глубины до 700 км, на которых отмечаются самые глубокие землетрясения. Действительно, рост касательных напряжений σ в соответствии с ((9.18): $\eta_{eff} \approx \sigma^{-2}$) понижает вязкость η_{eff} , а это приводит к релаксации напряжений, которые «рассасываются» за счет течений. Как только в какой-то зоне вязкость мантии снижается до $\eta_{eff} < 10^{22}$ П, она переходит из статического состояния в конвективное. Начинают происходить вынос тепла и резкое понижение температуры, что способствует возвращению мантии в исходное состояние с вязкостью $\eta_{eff} > 10^{23}$ П. Таким образом, физические условия в сверхглубокой (на глубинах более 700 км) мантии таковы, что вязкость в ней поддерживается на уровне $(10^{23} - 10^{24})$ П, а это и объясняет отсутствие в мантии сверхглубоких (с гипоцентрами на глубинах больших 700 км) землетрясений.

Проведенные с привлечением данных о землетрясениях оценки вязкости мантии дают правдоподобные и физически прозрачные результаты. Это позволяет сформулировать важный вывод, касающийся условий, определяющих реологическое состояние вещества мантии. Известно, что глубины гипоцентров максимально глубоких очагов тихоокеанских землетрясений достигают значений около 700 км в экваториальной зоне (сейсмофокальные зоны в районах Фиджи и Боливии) постепенно уменьшаясь до 200 км в среднеширотных районах (Алеутские острова – Аляска на севере окраины Тихого океана и Новая Зеландия и южная оконечность Южной Америки на южной окраине Тихого океана). От экватора к средним широтам вследствие вращения Земли уменьшается и значение центробежной скорости. Тогда, если принять, что максимальные по глубинам очаги землетрясений являются индикаторами положения изолинии $(10^{22}-10^{23})$ П вязкости в мантии, то напрашивается следующий физически прозрачный вывод: кроме P - T условий реологическое состояние вещества мантии определяется и величиной угловой скорости вращения Земли.

Как видно из (9.18), дислокационная вязкость мантии обратно пропорциональна квадрату касательного напряжения, распределение которого в мантии неизвестно. По оценкам они лежат в интервале 1 – 100 бар. Таким образом, если положить среднее значение касательного напряжения в мантии равным среднему значению 10 бар, то неопределенность в значении дислокационной вязкости из-за незнания величины касательных напряжений в мантии выразится коэффициентом, пропорциональным четырем порядкам по величине $10^{\pm 2}$ [Жарков, 1983, с. 185].

Таким образом, можно считать, что разные способы оценки вязкости вещества мантии дают примерно одинаковые результаты, т.к. все они укладываются в пределы «неопределенного» диапазона.

Вязкость ядра Земли. О вязкости вещества ядра Земли известно мало, различные способы ее оценки дают сильно расходящиеся результаты. Согласно обзору данных, приведенному в работе [Джекобс, 1979, с. 59-63], возможные значения вязкости вещества ядра лежат в больших пределах: от $(10^{-3} - 10^{-2}) \text{ П}$ до $(10^9 - 10^{11}) \text{ П}$. Суммируя все эти данные, согласно [Сорохтин, Ушаков, 2002, с. 81-82], можно заключить следующее.

Верхний предел вязкости «ядерного» вещества во внешнем ядре можно оценить по затуханию проходящих через него продольных сейсмических волн. При этом оказалось, что такая вязкость значительно меньше 10^9 П . С другой стороны, для генерации в ядре дипольного магнитного поля, ось которого близко совпадает с осью вращения Земли, необходимо, чтобы скорости течений «ядерного» вещества были достаточно большими для возникновения в них инерционных ускорений Кориолиса, способных «закрутить» такие течения в структуры с заметными широтными составляющими. Но для этого необходимы скорости течений «ядерного» вещества порядка сантиметров или даже десятков сантиметров в секунду. Однако течения с такими скоростями на поверхности ядра могут возникать только в том случае, если вязкость «ядерного» вещества окажется низкой для возникновения быстрых течений. Изучение переменных составляющих геомагнитного поля, а также энергетического баланса механизмов его генерации позволило определить, что вязкость жидкого вещества в земном ядре не превышает $0,4 \text{ П}$.

Учитывая сказанное, а также то, что температура в ядре приблизительно на $50-100^\circ\text{C}$ превышает температуру плавления «ядерного» вещества (т.е. оно перегрето), можно принять в первом приближении его вязкость приблизительно равной $0,1-0,01 \text{ П}$ – вязкости воды.

О вязкости внутреннего ядра практически ничего неизвестно, кроме того, что она на значительное число порядков должна превышать вязкость вещества во внешнем ядре.

Вещество Земли в условиях высоких давлений и температур

Уравнение состояния [Жарков, Трубицын, 1980, с. 183-256]. Уравнением состояния вещества называется зависимость давления P от объема V и температуры:

$$P = P(V, T).$$

Эту зависимость можно задать аналитически или в виде таблицы. Уравнение состояния является основным соотношением в физике высоких давлений и содержит ценную информацию о свойствах среды.

Исследование внутреннего строения планет или построение моделей планет, по существу, невозможно, если не располагаем уравнениями состояния веществ, из которых состоит данная планета. Сведения о составе можно получить экспериментально или из теоретических соображений.

Уравнение состояния Земли можно определить с помощью геофизических данных, а затем использовать для исследования внутреннего строения планет земной группы. Включение планет в число объектов геофизических, точнее, планетофизических, исследований при высоких давлениях, расширяет проблему, в частности, в двух направлениях. Во-первых, расширяется сам класс веществ, которые должны подвергаться исследованию, а именно – наряду с геофизическими материалами становится необходимым исследовать уравнения состояния космохимических элементов и соединений, т.е. тех веществ, которые встречаются в космосе. Во-вторых, расширяется

диапазон давлений – от 3,5 до 100 млн атм., соответствующих давлениям в центре планеты-гиганта Юпитера.

В общем случае свободную энергию кристалла можно представить в виде:

$$F(x, T) = E_n(x) + \theta_d f(\theta_d / T) + f_1(x, T), \quad (9.29)$$

где $x = \frac{V}{V_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$ – безразмерный объем (V_0 и ρ_0 – удельный объем и плотность при нормальных условиях), θ_d – характеристическая температура Дебая (9.8).

Первый член справа в (9.29) $E_n(x)$ представляет собой потенциальную часть свободной энергии, зависящую лишь от объема.

Второй член в (9.29) обусловлен тепловыми фононами с частотами ω_d (9.8), посредством которых происходит взаимодействие между собой кристаллических структур.

Третье слагаемое определяет высокотемпературные поправки к уравнению состояния. Возможность представления $F(x, T)$ в виде (9.29) определяется тем, что в интересующей нас области объемов и температур справедливы соотношения:

$$E_n(x) \gg \theta f(\theta / T), \quad E_n(x) \gg f_1(x, T). \quad (9.30)$$

Другими словами, $E_n(x)$ является основным членом в свободной энергии. Разделение зависящей от температуры части свободной энергии на два слагаемых возможно благодаря тому, что существует область температур, в которой третий член в (9.29) мал по сравнению со вторым.

Зная свободную энергию $F(x, T)$ можно обычным способом путем дифференцирования (9.29) определить уравнение состояния:

$$P = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T = -\rho_0 \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_T, \quad (9.31)$$

и изотермический K_T и адиабатический K_S модули сжатия вещества:

$$K_T = -V \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = -x \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)_T, \quad \frac{K_T}{K_S} = \frac{C_P}{C_V}, \quad (9.32)$$

которые соотношениями (4.69) связаны с упругими свойствами среды. Здесь C_P и C_V – теплоемкости при постоянных давлении P и объеме V соответственно.

Описать $E_n(x)$ какой-либо простой функцией с небольшим числом параметров в области давлений от 0 до 10^8 бар (атм.) не удастся. Поэтому при определении уравнения состояния используется метод графической интерполяции экспериментальных данных при $P < 10^6$ бар и теоретических данных при $P > 10^8$ бар.

Зависимости $P(\rho)$, определенные в лабораторных условиях в диапазоне давлений (10^4 - 10^7) бар для железа, его окислов и серного железа, из которых, в основном, состоит ядро Земли, имеют логарифмический вид:

$$\lg P \approx \rho,$$

плотность при этом изменяется в пределах 8-14 г/см³. Эти данные, в том числе, подтверждают сформулированные выше выводы о плотности вещества в ядре Земли.

Фазовые диаграммы [Магницкий, 2006, с. 28-30; 364-365]. Одним из способов оценки температуры в очагах вулканов заключается в использовании диаграммы плавления магматического вещества (рис.9.1). Если учесть широкую распространенность базальтовых лав, то вопрос о температуре в очагах вулканов решается достаточно просто. По данным, приведенным на рис. 9.1, находим для глубины 100 км температуру 1300⁰С, что хорошо согласуется с данными оценок, проведенных в главе 8. Конечно, при интерпретации такого рода данных имеются свои проблемы, которых здесь останавливаться не будем.

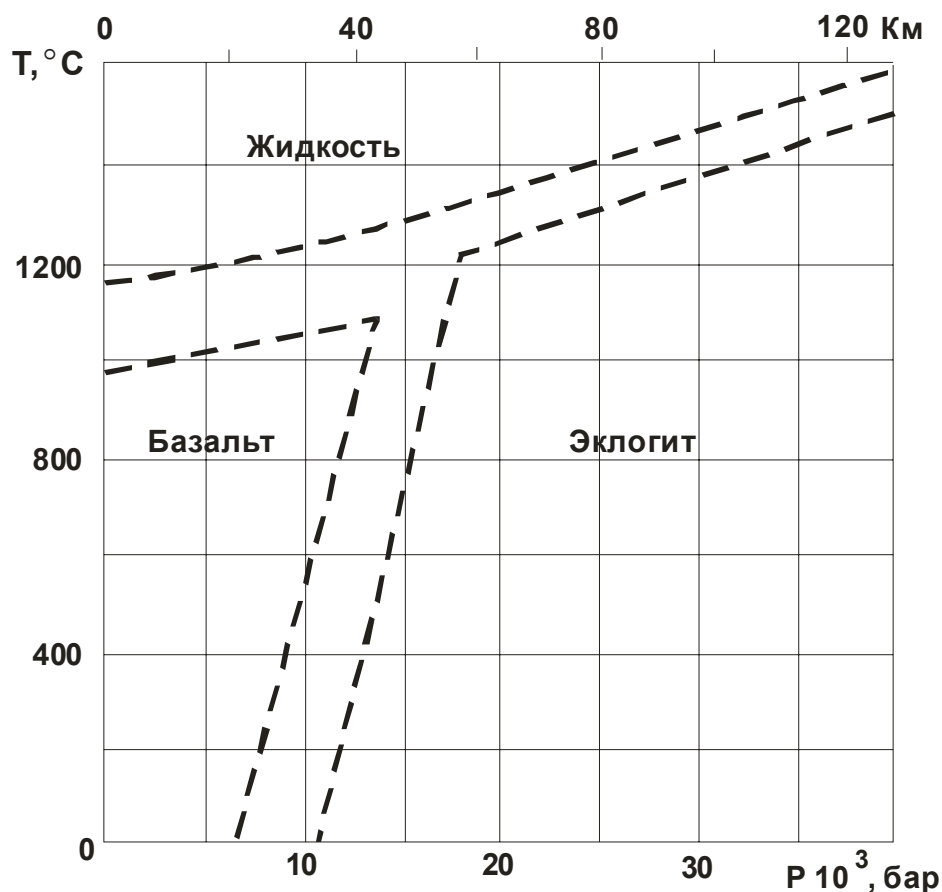


Рис. 9.1. Диаграмма плавления базальта.

Существуют два типа фазовых диаграмм: твердых растворов и эвтектический.

Примером диаграмм первого типа может служить диаграмма плавления оливина (Mg,Fe)₂SiO₄, приведенная на рис. 9.2, из которого видно, что даже в этом простейшем случае точка плавления существенно зависит от отношения числа атомов Fe к числу атомов Mg, причем выплавляемая жидкость будет обогащена Fe. Например, в начале плавления оливина с 20% Fe₂SiO₄ (точка A) соответствующая жидкость будет иметь уже 55% фаялита (точка B).

Примером диаграмм второго типа, когда участвующие компоненты не образуют твердых растворов, может служить диаграмма для смеси диопсид (CaMgSiO₆) – анортит (CaAl₂Si₂O₈), приводимая на рис. 9.3. В этом случае точка плавления первой жидкости E (эвтектическая точка) лежит ниже точки плавления каждого компонента в отдельности. Соответствующая жидкость называется эвтектической. Базальт по составу очень близок у соответствующей эвтектике, т.е. его точка плавления должна быть ниже точки плавления соответствующих минералов. Вопрос осложняется тем, что с увеличением давления точка эвтектики E не только повышается, но и смещается в сторону компонента с наименьшим

изменением объема, как показано на рис. 9.4 (E_1, E_2 – точки эвтектики; p_1, p_2 – давления; $p_2 > p_1$; $\Delta V_A > \Delta V_B$).

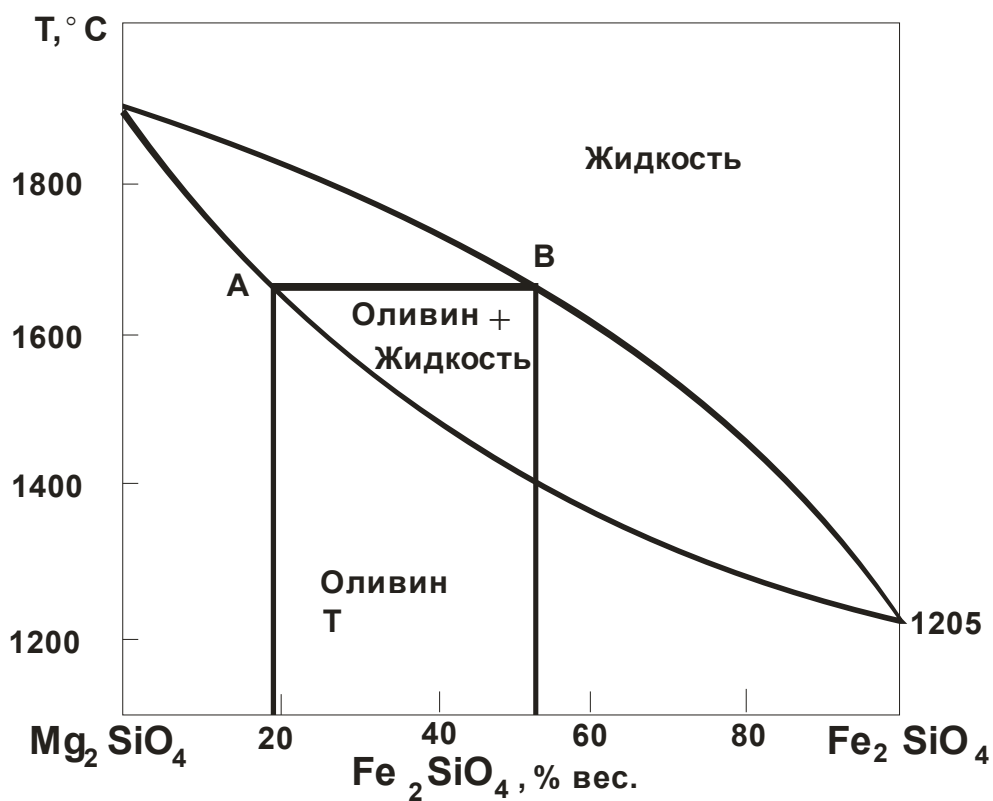


Рис. 9.2. Диаграмма плавления оливина.

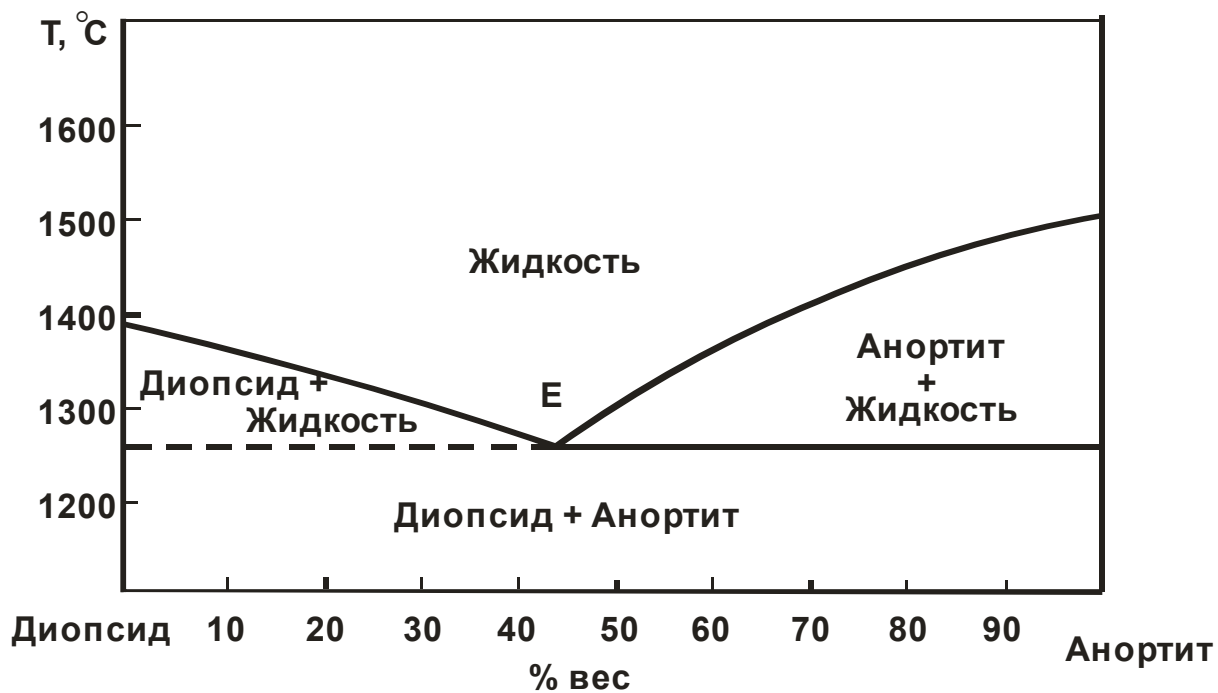


Рис. 9.3. Пример фазовой диаграммы для смеси диопсид – анортит.

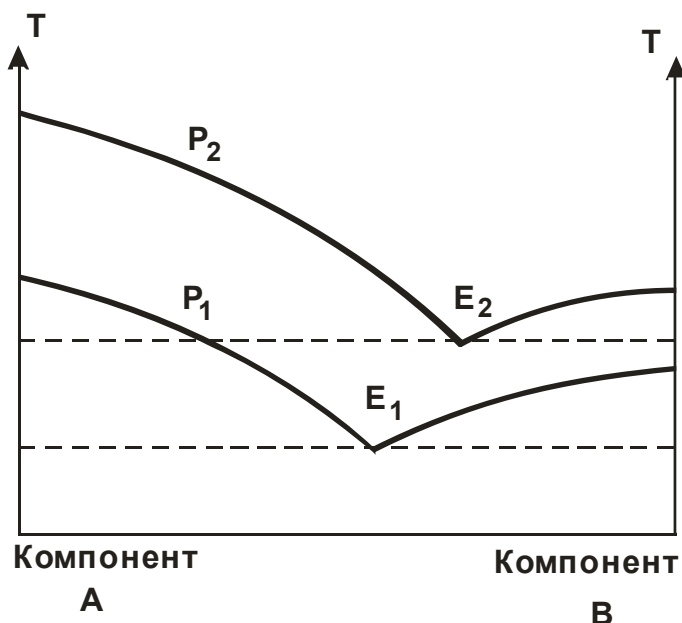


Рис. 9.3. Пояснения в тексте.

Природа и характер границы Мохоровичича между земной корой и мантией [Магницкий, 2006, с. 332-339]

Вся совокупность имеющихся данных свидетельствует о том, что земная кора континентов, по крайней мере, ее верхние части, сложена породами, или непосредственно изверженными из более глубоких зон планеты, или подвергшимися той или иной переработке после их поступления в зону коры. То же самое, хотя и с несколько меньшей достоверностью, относится и к земной коре океанического типа.

Таким образом, должна существовать разница между химическим составом коры (или, по крайней мере, ее верхних частей) и составом более глубоких зон. Следовательно, с одной стороны, в недрах Земли должны существовать химические границы или переходные области (слои). С другой стороны, широко известен факт возникновения фазовых переходов под воздействием высоких давлений и температур. Таким образом, в недрах Земли должны существовать также фазовые границы.

Поверхность (граница раздела) Мохоровичича, принимаемая за нижнюю границу земной коры, должна, естественно, относиться к одному из этих видов границ.

В настоящее время наряду с уже установившимся представлением о химической природе границы Мохо распространена и гипотеза о том, что эта граница является поверхностью фазового перехода. Последнее предположение не исключает наличия химических границ, которые должны лежать выше или ниже поверхности Мохо и могут или отождествляться с наблюдаемыми слабыми сейсмическими границами, или совсем могут не обнаруживаться сейсмологией в случае постепенного диффузного перехода.

Наконец, существует и компромиссная точка зрения о разной природе поверхности Мохо для различных районов.

Для решения этой проблемы первостепенное значение имеет состав верхних частей мантии Земли и основных слоев земной коры.

Было установлено, что данные о скоростях сейсмических волн под земной корой и составе ксенолитов, поступающих из мантии, совместимы с двумя предположениями о составе подкоровой среды: она или имеет основной состав из пород эклогитовой группы, или состоит из ультраосновных пород – групп перидотитов, вероятнее всего, гранатизированных перидотитов. Сопоставление этого состава с составом метеоритов позволяет отдать предпочтение второму предположению, так как он близок к хондритам –

наиболее распространенной группе метеоритов. Однако с эклогитовым составом можно сопоставить состав другой группы метеоритов – эвкритов, правда, гораздо более редкой. Так как в настоящее время можно считать установленным наличие в верхней мантии горизонтальных неоднородностей, то следует сделать вывод и о вариациях ее состава в возможных пределах от перидотитов до эклогитов.

Другим важным фактором является состав глубоких частей земной коры, прилегающих к границе Мохо. Было установлено, что, в сущности, единственное предположение, совместимое со всеми данными наблюдений, состоит в том, что нижние слои континентальной коры сложены основными породами, вероятнее всего, типа габбро (глубинный вариант базальта). Для океанической коры предполагается тот же состав, хотя некоторые исследователи указывают на возможность образования коры океанического дна из серпентинизированных перидотитов.

Если верхняя мантия имеет эклогитовый состав, то граница Мохо обусловлена фазовым переходом, так как базальт и эклогит химически одинаковы и отличаются лишь по минералогическому составу. Если верхняя мантия перидотитовая, то поверхность Мохо имеет химическую природу, как это следует из химического состава пород.

Анализ зависимости скорости продольных волн от плотности породы сопоставление результатов такого анализа с сейсмическими данными позволяет предположить, что на континентах граница Мохо преимущественно химическая по природе (габбро или эклогит – перидотит), однако в ряде областей молодой тектонической активности эта граница может быть фазовой (габбро – эклогит).

Для океанической коры этот анализ неприменим, так как там возможно еще сильное влияние пор.

Для более полного решения вопроса о природе границы Мохо необходимо рассмотреть конкретные кривые фазовых переходов в условиях глубоких частей земной коры. К сожалению, еще нет достаточно полного анализа этих переходов, однако эксперименты, выполненные многими авторами, позволяют все же сделать основные выводы.

Анализ всех известных кривых перехода позволяет сделать вывод о том, что поверхность Мохо не может быть под океанами фазовой границей. Даже если предположить какой-либо неизвестный нам переход, то все равно в гипотезе о фазовом характере границы имеются огромные затруднения.

Несколько иначе складывается обстановка под континентами.

Происхождение земной коры, гипотезы дифференциации, зонной плавки и океанизации [Магницкий, 2006, с. 339-346]

То, что земная кора выделилась из мантии Земли в процессе ее исторического развития, не вызывает сомнений. Однако способ выделения вещества коры, пути развития коры еще не изучены, механизм и причины этого процесса и других, ему сопутствующих, представляют особый предмет дискуссии. Дискуссионными также являются и причины возникновения разных типов земной коры и общая направленность ее развития.

В свете имеющихся в настоящее время данных трудно согласиться с гипотезой о происхождении Земли в прошлом через стадию общего расплавления и с процессом выделения коры путем дифференциации по плотности вещества мантии в эту стадию. При такой схеме земная кора выделилась бы по всей Земле примерно одинакового состава и мощности. Для объяснения различий между разными типами коры, в первую очередь континентального и океанического, приходится в этом случае прибегать к дополнительным, мало обоснованным гипотезам. Кроме того, при среднем составе мантии, близком к хондритам, при такой схеме развития образовалась бы кора гораздо большей мощности, чем это наблюдается. Даже при выделении вещества коры в

количестве 7-8% мощность коры была бы около 200 км. Наконец, эта гипотеза не согласуется с тепловым режимом Земли и с составом коры.

В настоящее время более обоснованной гипотезой формирования коры является гипотеза выделения ее вещества в процессе зонной плавки, что подтверждено экспериментально зонной плавкой хондритового вещества.

Сопоставление и анализ большого количества материала показывает, что вещество хондритов или очень близкое к нему, теряя около 10% своей массы, способно создать земную кору и в остатке дать перидотитовую оболочку.

С точки зрения рассмотренного процесса земную кору океанов, по-видимому, следует считать как еще недоразвившуюся. В этих частях Земли процесс зонной плавки оказался замедленным. Причиной такого отставания могло быть несколько пониженное содержание радиоактивных элементов, что привело к замедлению разогрева таких областей.

Постепенное разрастание континентальной коры от ряда наиболее древних центров можно теперь объяснить следующим образом. Первоначальное содержание радиоактивных элементов несколько варьировало от одного места к другому. Места с наибольшим содержанием источников тепла или со сравнительно более глубоким их расположением первыми достигли условий зонной плавки, в процессе которой выделились ядра будущих континентов. При этом источники тепла были перенесены, в основном, в кору, что вместе с выносом тепла магмами привело к относительному охлаждению таких областей. Зонная плавка переместилась в соседние участки. Таким образом, шел процесс как бы концентрического разрастания континентов. Не следует думать, что следующая область активизации всегда примыкала к предыдущей. Нужные условия могли возникнуть и в некотором удалении, так что в тылу могли остаться еще не переработанные области (например, Новая Зеландия выброшена значительно вперед от Австралии). Области, оставшиеся в тылу, охватывались переработкой позже, это вместе с захватом новым циклом старых областей и создавало сложную мозаичную структуру континентов (при все же заметной общей схеме разрастания). Именно период активной зонной плавки и соответствует геосинклинальному этапу развития коры, когда за счет недр осуществляется процесс прироста коры. Завершение геосинклинального процесса при этом объясняется исчерпанием первичного, глубинного процесса.

То обстоятельство, что в настоящее время температура под океанами выше, чем под континентами, не противоречит сказанному. В прежние эпохи картина была обратной, но вынос радиоактивных элементов в кору и потеря тепла при подъеме магм привели к охлаждению континентальных частей. В океанических же областях хотя и имеется меньшее количество источников тепла, но они рассредоточены на большую глубину. Благодаря этому к настоящему времени в рассматриваемых областях образовались условия, близкие в термическом отношении к континентальным и в ряде мест приближающиеся к условиям начала зонной плавки.

Однако наряду с объяснением процесса формирования континентальной коры возникает и проблема объяснения процесса океанизации этой коры. Такой обратный процесс, по мнению ряда исследователей, приводит к образованию океанов на месте ранее существовавших континентов.

Как отмечалось, слой *D* можно считать с большой степенью достоверности однородным. В слое *B* однородность если и нарушена, то незначительно. Слой *D* резко неоднороден.

Строение мантии [Гутенберг, 1963, с. 97; Магницкий, 2006, с. 359-372]

Мантия Земли включает три области – *B*, *C* и *D* – из тех, на которые разделяет Землю Буллен. Позднее Буллен подразделил область *D* на части *D'* и *D''*. Б. Гутенберг полагает, что не имеется никаких определенных указаний на существование в мантии

какого-либо разрыва непрерывности первого рода и что зависимость скорости упругих волн от глубины выражается непрерывными кривыми (рис. 4.11). Однако между C и D' на глубине в интервале от 900 км до 1000 км отношение возрастания скорости упругих волн с глубиной уменьшается или скачком, или по крайней мере достаточно быстро, так что там может существовать «разрыв непрерывности второго рода». Возможно, существуют еще слабые границы второго порядка в области D' .

На основе современных данных мы полагаем, что граница между B и C находится на глубине 200 км, тогда как по Буллену ее глубина 410 км. Детальное строение этой «границы» пока еще является спорным, и нет определенного мнения относительно того, соответствует ли она разрыву непрерывности или же переход от области B к области C происходит непрерывно, как полагает Б. Гутенберг. Граница между областями C и D находится приблизительно на глубине 950 км, а между D' и D'' , вероятно, на глубине 2700 км. Ни одна из этих границ, по-видимому, не является резкой (рис. 4.11), и переход от одной области к другой, вероятно, происходит постепенно.

Признавая для верхней мантии Земли перидотитовый состав, близкий к составу силикатной фракции хондритов, следует подчеркнуть, что уже непосредственно под корой континентов или на небольших глубинах под ней эта перидотитовая мантия должна находиться в условиях эклогитовой фации, т.е. это должны быть не обычные полевошпатовые перидотиты, а перидотиты с эклогитовыми минералами, в первую очередь - гранатовые перидотиты, что и подтверждается составом ксенолитов. Более того, анализ глубинных пород показывает, что при практически одинаковом химическом составе, близком к гранатизированным перидотитам, могут быть периоды различного минералогического состава, например, оливин + амфиболы; оливин + плагиоклаз + энстатит + клинопироксены; оливин + энстатит + диопсид + шпинель; оливин + пирон + пироксены.

Конечно, сейсмические границы, возникающие под корой при таких минералогических переходах, будут очень слабыми. Также слабыми будут и вариации скоростей в горизонтальном направлении, что и соответствует наблюдениям.

Вскоре после открытия изостазии было установлено, что ниже относительно прочной «литосферы» находится слой с относительно малым пределом текучести, который позволяет путем медленных движений постепенно приближаться к состоянию гидростатического равновесия. Баррел в 1914 г. назвал этот слой «астеносферой».

В 1958 г. Джеффрис подтвердил существование особенности годографа волн P на расстояниях около 20° . Однако по годографам продольных волн для Азорского землетрясения 1931 г. он заключил, что «переход должен представлять собой значительный разрыв градиента скорости». «Глубина перехода должна быть около 200 км». Это находится в хорошем соответствии с кривой зависимости скорости от глубины, построенной Б. Гутенбергом (рис. 9.1), за исключением того, что Б. Гутенберг считает изменение градиента скорости на этой границе быстрым, но постепенным, а не разрывным.

Ядро Земли [Магницкий, 2006, с. 372-378]

Переход от мантии к ядру Земли сопровождается сильным увеличением плотности (примерно на 70%), резким снижением скоростей продольных волн, появлением высокой электропроводности. Высокая плотность вещества ядра и его электропроводность убедительно говорят, что в ядре вещество находится в металлической фазе. Кроме того, сейчас уже можно считать установленным, что внешнее ядро (2900-5100 км) находится в жидком состоянии. Граница мантия – ядро резко выражена.

Из тяжелых металлов только железо встречается в природе в больших количествах, и только оно в металлической фазе составляет существенную часть метеоритов, чтобы

быть материалом, пригодным для образования ядра Земли. Поэтому уже на ранних стадиях развития геофизики высказывалась гипотеза о железном или железо-никелевом составе ядра Земли.

Таким образом, гипотеза железного ядра с примесью некоторых других элементов может быть согласована с основными геофизическими данными о свойствах ядра Земли.

Гораздо более серьезные трудности возникают перед гипотезой железного ядра при сопоставлении с данными о других планетах и при попытках объяснить способ образования ядра.

При сопоставлении плотности планет земной группы (включая Луну) выясняется интересная зависимость. Оказывается, что средняя плотность вещества планеты (с приведением к одному давлению) растет с увеличением размеров и массы планеты. Получается, что чем больше планета, тем больше в ней тяжелых элементов, т. е. преимущественно железа. Таким образом, Луна и Марс почти не содержат железа и не имеют ядра. Земля и очень близкая к ней по размеру Венера имеют большое плотное ядро. Исключением из этой закономерности является маленький, но очень плотный Меркурий.

Объяснить такое закономерное и очень значительное изменение содержания железа в планетах пока не удается.

Также не очень понятен путь образования железного ядра. В «термическом разделе» было показано, что при возникновении Земли температура в ее недрах была везде существенно ниже точки плавления. Таким образом, возникновение ядра путем плавления железных включений и их стекания к центру стало возможным на более позднем этапе. Но если в этих условиях еще можно как-то представить стекание железного расплава, то очень трудно понять, как силикатная или окисная масса, занимавшая место будущего ядра, поднялась вверх в мантию и как при этом возникла четкая граница ядро-мантия.

Все эти трудности снимаются, если предположить, что граница ядро – мантия не химическая, а фазовая, отделяющая мантию с веществом в неметаллическом состоянии от ядра того же состава, но с веществом в металлической фазе. Если это так, то плотность и давление в модели «А» Гутенберга – Буллена можно рассматривать как уравнение состояния для вещества планет.

Для решения проблемы необходимо показать возможность перехода в металлическую фазу пород и минералов, составляющих мантию Земли. Такой переход («резонансный») в металлическую фазу происходит у элементов IV группы (*C*, *Si*, *Ge*), имеющих четыре валентных электрона, что и приводит к резонансу, если число ближайших соседей больше четырех. Видимо, то же имеет место для соединений элементов III и V групп с тремя и пятью электронами.

Для приложения этого объяснения к гипотезе металлизации вещества Земли следует учесть, что основой всех силикатов служат сложные ионы SiO_4 , которые также имеют четыре валентных электрона. Таким образом, можно ожидать, что их поведение под давлением будет аналогично поведению элементов IV группы.

Другая трудность, встающая перед гипотезой фазовой природы границы мантия – ядро, состоит в том, что при переходе к ядру совершается переход не только в металлическую, но и в жидкую фазу. Термодинамические соображения подтверждают возможность существования такой границы. Такая граница может быть пропущена продольными волнами, однако крайне неправдоподобно, что ее не замечают поперечные волны, например, *SH*, для которых такая граница была бы сильной. Это, видимо, серьезный аргумент против рассматриваемой схемы.

Таким образом, приходится признать вероятными два варианта объяснения природы границы ядра Земли.

1. Граница является химической по природе, и ядро состоит из некоторого сплава железа.

2. Граница обусловлена фазовым переходом, и ядро состоит из вещества нижних частей мантии, но в металлической фазе. В этом случае вещество глубоких частей мантии должно обладать не совсем типичной фазовой диаграммой. Однако такая диаграмма возможна и в ряде случаев действительно существует, как показывают опыты. Таков переход в металлическую фазу *Sn*, *C* (алмаз), *InSb*, *InP* и ряд других соединений и элементов.

Полностью вопрос о физике и составе ядра и мантии Земли может быть решен только в результате проведения дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. Не последнюю роль в решении этого вопроса могут играть данные о строении других планет солнечной системы. Например, согласно представлениям модели «горячей» Земли [Кузнецов, 2008], ядро нашей планеты содержит значительное количество водорода.

Проблема же земной коры и верхней мантии в силу большой сложности только с трудом поддается теоретико-физическому анализу. В этой области главное слово, видимо, будет принадлежать эксперименту, как лабораторному, так и полевому, в виде целого комплекса геофизических, геологических и геохимических наблюдений вплоть до сверхглубинного бурения с проникновением в мантию Земли.

Литература

- Ботт М.* Внутренне строение Земли. М.: Мир, 1974. 376.
- Викулин А.В.* Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КГТУ, 2008. 230 с.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин, 2004. 297 с.
- Геологический словарь в двух томах. Т. 1. М.: Недра, 1978. 487 с.
- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С.* Введение в тектонофизику. М.: КДУ, 2005. 496 с.
- Гутенберг Б.* Физика земных недр. М.: ИЛ, 1963. 264 с.
- Джекобс Дж.* Земное ядро. М.: Мир, 1979. 306 с.
- Джеффрис Г.* Земля, ее происхождение, история и развитие. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1960. 485 с.
- Жарков В.Н.* Внутренне строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Жарков В.Н., Паньков В.Л., Калачников А.А. и др.* Введение в физику Луны. М.: Наука, 1969. 312 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
- Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В.* Физика Земли и планет. Фигуры и внутреннее строение. М.: Наука, 1971. 384 с.
- История механики. С древнейших времен до конца XVII века / Ред. А.Т. Григорьян, И.Б. Погребысский. М.: Наука, 1971. 298 с.
- Кольский Г.* Волны напряжений в твердых телах. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1955. 192 с.
- Кузнецов В.В.* Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2008. 367 с.
- Ламб Г.* Гидродинамика. В 2-х томах. М.-Ижевск: НИЦ «регулярная и хаотическая динамика», 2003.
- Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.
- Магницкий В.А.* Основы физики Земли. М.: Гостехиздат, 1953. 290 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Наука, 2006. 390 с.

- Милановский Е.Е.* (ред.) Ротационные процессы в геологии и физике. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.
- Николаев А.В.* (ред.) Проблемы геофизики XXI века. Сборник научных трудов в двух книгах. М.: Наука, 2003.
- Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1966. 447 с.
- Новая глобальная тектоника (тектоника плит). Сборник статей / Ред Л.П. Зоненшайн, А.А. Ковалев. М.: Мир, 1974. 472 с.
- Советский энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1985. 1600 с.
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Развитие Земли. Учебник. М.: МГУ, 2002. 560 с.
- Стейси Ф.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.
- Теркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. В двух частях. Т. 2. М.: Мир, 1985. 360 с.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 576 с.
- Физический энциклопедический словарь / Ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.
- Хайкин С.Э.* Физические основы механики. М.: Изд-во физмат литературы, 1963. 772 с.
- Хаин В.Е., Короновский Н.В.* Планета Земля от ядра до ионосферы. М.: КДУ, 2007. 244 с.
- Храмов Ю.А.* Физики. Биографический справочник. М.: Наука, 1983. 400 с.
- Шейдеггер А.* Основы геодинамики. М.: Недра, 1987. 384 с.

ЧАСТЬ II

ВВЕДЕНИЕ В «ВИХРЕВУЮ» ГЕОДИНАМИКУ

10. РОТАЦИИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

В наблюдаемой области Вселенной, в Метагалактике, сферическом объеме радиусом $3 \cdot 10^{25}$ м, содержится масса $\sim 10^{50}$ кг. В этой области имеется приблизительно миллион сверхскоплений и десять миллиардов галактик различных типов, среди которых преобладают спиральные, подобные нашей Галактике.

Вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной [Викулин, 2004, 2008]

Вращательное движение в геологии

В фундаментальной научной и учебной литературе по геологии, тектонике и тектонофизике, вышедшей в свет как у нас, в России, так и за рубежом (см., например, [Геологический..., 1978; Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005; Земля..., 1974; Короновский, 2006; Пушаровский, 2005; Сорохтин, Ушаков, 2002; Структурная..., 1990-1991; Хаин, Ломизе, 1995, 2005]), такие понятия как вихревые структуры (складки) и/или вихревые движения не определяются, хотя «созвучные» словосочетания в тексте встречаются. Так, на рис. 5 в третьем томе Структурной геологии и тектоники, на котором изображены центры диастрофизма, окруженные горными дугами Альпийской системы, показаны две вихревые складки, одна из которых (Генуя) закручена против часовой стрелки, вторая (Дунай) – по часовой стрелке [Структурная..., 1991, с. 206]. В основополагающем геотектоническом с основами геодинамики учебнике [Хаин, Ломизе, 2005, с. 217-224] обсуждаются кольцевые структуры, природа которых никаким образом не связана с тектоническими движениями; вращение же тектонических плит, по мнению авторов [Хаин, Ломизе, 2005, с. 48], является не результатом геодинамических явлений, а всего лишь следствием теоремы Эйлера.

«Очень близко» к сути проблемы вихревых движений в геологии подошли авторы одного из последних тектонофизических учебников [Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005]. Согласно данным этой работы, наличие «в деформируемом твердом теле вихревого механического поля» возможно [с. 218-219]. Использование таких представлений, «в рамках синергетического подхода», по мнению авторов, позволяет описывать «поле поворотных моментов» [с. 220]. При этом, «геодинамика иерархически соподчиненных геосфер», связанных «с поднятием Антарктиды и опусканием Арктики» определяется «по правилу буравчика» [386] и связано с «вынужденной» конвекцией [с. 390-391].

В специальной литературе, особенно литературе последних лет [Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007] примеров вихревых структур приводится достаточно много, однако природа их происхождения и процессы их развития во времени, как правило, не обсуждаются. Чрезвычайно редко в специальной геофизической литературе встречается и фамилия китайского ученого Ли Сы-гуана, который впервые описал такие структуры [Ли Сы-гуан, 1952, 1958; Lee, 1928]. Уже эти обстоятельства указывают на ту весьма незначительную роль, которую вихревые структуры «играют» в науках о Земле в настоящее время.

Вихревые движения в физике. История вопроса

Достаточно емкие и образные обзорные данные о вихревых движениях содержатся в работах сборника [Борисов, Мамаев, Соколовский, 2003], следовать которому будем при изложении материала этого раздела.

Ранние исследования по теории вихревого движения восходят к Декарту, Гюйгенсу, Иоганну и Даниилу Бернулли (XVII век). В этот период были установлены некоторые закономерности вихревых взаимодействий, но вихревая теория не достигла

такого совершенства и полноты, как ньютоновская теория гравитации. Несмотря на ожесточенную полемику картезианцев (приверженцев Декарта) и ньютонианцев, она вскоре была вытеснена ньютоновской картиной мира и почти совсем забыта. Исторически первые труды Эйлера и Лагранжа, создававших ньютоновскую гидродинамику (а также теорию сплошных сред), ограничивались описанием потенциальных (безвихревых) полей.

Возрождение интереса к вихревой динамике относится к середине XIX столетия. Это труды Гельмгольца, Кельвина и Кирхгофа, приведшие не только к существенно новым гидродинамическим результатам, но и к созданию наиболее общей *вихревой теории материи*. Необходимость создания такой теории в значительной степени возникла из потребности объяснить свойства атмосферных циклонов и антициклонов. Особое значение в вихревой теории имеет теорема Гельмгольца, которую А. Пуанкаре считал наиболее значительным вкладом в гидродинамику. Ее сутью является закон вмерзновенности вихревых линий, позволяющий рассматривать *вихревые образования как некоторые материальные объекты, подобные массам в классической механике*. Следуя общей идее XIX века, согласно которой объяснения различных физических феноменов следует искать в подходящих механических интерпретациях, лорд Кельвин (1867 г.) предложил *теорию вихревых атомов*. В этой теории мир понимается как некоторый эфир (аналог идеальной жидкости), в котором *взаимодействуют вихри* Гельмгольца, *подобные атомам, образующим молекулы*. Идеи Кельвина так и не были реализованы и вскоре были полностью вытеснены атомной и квантовой механикой.

В последние десятилетия, особенно в связи с интенсивным развитием возможностей вычислительной техники, теория вихревых движений получила интенсивное развитие и в глубь и в ширину. В рамках Геофизической гидродинамики – области гидромеханики, сложившейся за последние три десятилетия в качестве ее самостоятельного раздела, – стало возможным решение ряда актуальных гидродинамических проблем *планетарного характера*. Перспективные направления в теории связаны с исследованием *вихревых движений* с крупномасштабными течениями, топографией и береговым рельефом. Исследование топографических вихрей позволило выявить существование в пределах мирового океана определенных структур, связанных, в том числе, и с «захватом» шельфовых волн неоднородностями (см. также [Ефимов, Куликов, Рабинович, Файн, 1985]). Гидрологическое исследование района одной из подводных гор Гавайского хребта в Тихом океане, например, показало наличие столбчатой структуры в распределении гидрологических, гидрохимических и биологических параметров среды, при этом на картах динамической топографии четко выделялась замкнутая антициклоническая циркуляция. Показано, что существенную роль в процессе формирования *вихревых структур* в районах подводных гор играют также приливы и другие явления.

Как видим, успехи, достигнутые геофизической гидромеханикой, впечатляющие. Однако такого рода работы рассматривают явления, происходящие исключительно в гидросфере Земли и атмосферах планет, и совершенно не касаются проблемы вихревых структур в геологии. Нам не известна ни одна такая работа.

Следует отметить, что квантовая механика «ушла» от решения проблемы появления у частиц вихревых (вращательных) движений – спина, путем придания ему смысла квантового числа. Современное положение дел в квантовой механике наиболее точно, пожалуй, характеризует цитата из работы создателя кварковой модели строения материи М. Гелл-Манна [1984]: «Квантовая механика – это полная загадок и парадоксов дисциплина, которую мы не понимаем до конца, но умеем применять». Представляется, что если бы идеи лорда Кельвина были реализованы, то роль и значение вихревых (вращательных) движений в современном естествознании и науках о Земле, в том числе и вихревых структур в геологии, возможно, была бы совершенно иной (?). Время покажет.

Вращение материи Вселенной как ее характерное (внутреннее) свойство с очевидностью проявляется для двух крайних ее «предельных» состояний - галактик и элементарных частиц.

Галактики. Следуя [Гуревич, Чернин, 1983], можно констатировать, что вращение – очень распространенное свойство галактик. Фактически все они – спиралевидные, эллиптические и неправильные - так или иначе, вращаются. Среди всех известных нам галактик и по числу, и по сосредоточенной в них массе преобладают (более 70-80%) спиральные галактики, диски которых обладают быстрым, предельно сильным вращением (рис. 10.1).

Центральная часть галактики вращается с постоянной скоростью и периодом (твердотельное вращение), а звезды, расположенные в пределах ее «хвоста», вращаются с переменными периодами, что, фактически, означает их вращение, в соответствии с третьим законом Кеплера, в гравитационном поле, создаваемом, главным образом, массой центральной области галактики, как и планеты в поле тяготения Солнца. Линейная скорость вращения нашей Галактики в районе Солнца (рис. 1.1) составляет 220 – 250 км/с. Момент количества движения нашей Галактики примерно составляет $I \sim 10^{74}$ эрг·с. Вращение других спиральных галактик обычно составляет 100 – 300 км/с.



Рис. 10.1. Спиральная галактика в созвездии Гончих Псов.

Гипотезы, с помощью которых пытались объяснить вращательное движение вещества, возникали не однократно. Первым был И. Кеплер, который еще в 1609 г. рисовал Солнце в центре некоего мощного вихря, который разбрасывает планеты по их орбитам и заставляет вращаться вокруг Солнца. Р. Декарт, обобщая эту картину на всю Вселенную, писал в 1644 г., что в процессе формирования космических тел мировое пространство было заполнено огромным числом вихрей разнообразной формы и размеров.

Эти идеи не прошли мимо И. Ньютона, хотя он и отнесся к ним критически, высказав подозрение, что космогония Декарта не способна объяснить Кеплеровы законы движения планет. Критика Ньютона содержалась в его знаменитых «Началах» (1687 г.), где он писал, между прочим, что теория вихрей пренебрегает наблюдаемыми астрономическими явлениями, создает больше проблем, чем объясняет, делает вещи более трудными, а не более легкими и т.п. Для вихрей же самих по себе, как писал Ньютон, нет никаких доказательств существования и, следовательно, их нужно отвергнуть. В результате, как мы видели выше, ньютонианцы «победили» картезианцев, и идеи Декарта были на долго, более чем на столетие, забыты.

Глубокий анализ проблем вихревой космогонии дал позднее И. Кант, а П. Лаплас построил на этой основе свою небулярную гипотезу (1796 г.), которая, по существу, и до сих пор находится в центре космогонических дискуссий, развиваясь и обогащаясь новыми теоретическими идеями и наблюдательными данными. Как говорил А. Пуанкаре (в 1911 г.): «Несмотря на многочисленные возражения, выдвигавшиеся против нее, несмотря на все новые поразительные открытия в астрономии, способные удивить ее творцов, вихревая космогония остается все еще с нами».

В XX веке процесс выдвижения гипотез, объяснявших природу вращения галактик, был продолжен. Согласно гипотезе К. Вейцмана, выдвинутой в конце 40-х годов, вращение галактик имеет космологическое происхождение; оно обязано изначальным вращательным, вихревым движениям космической среды, порожденным в том же процессе, в каком родилась сама Вселенная, и возникло ее общее расширение. В те же годы Ф. Хойл предложил гипотезу приливного происхождения вращения. По его идее, никакого вращения во Вселенной не существовало вплоть до эпохи обособления протогалактических облаков, и вот тогда приливное гравитационное взаимодействие этих облаков друг с другом и заставило их вращаться.

В 1952 г. Г.А. Гамов, создатель теории горячей Вселенной, решительно и с энтузиазмом стал на точку зрения вихревой космогонии. Он говорил тогда, что в распределении и движении галактик определенно заметны следы догалактической турбулентности и что на этом пути он видит самые заманчивые перспективы. Что же касается происхождения догалактических вихрей, то Г.А. Гамов высказал предположение, что вихри существуют во Вселенной изначальны и имеют ту же природу, что и само космологическое расширение. Как видим, точки зрения Г.А. Гамова и К. Вейцмана во многом совпадают.

В 1970 г. А.Д. Чернин предложил новую гипотезу о природе вращения галактик, согласно которой вращение галактик обязано мощным вихревым движениям, возникавшим в разрывных сверхзвуковых движениях метагалактической среды.

Сказанное относительно вихревого движения галактик, по всей видимости, может быть отнесено и к более крупным структурам Вселенной. Действительно, согласно последним данным, галактики образуют скопления, сверхскопления, а возможно и наиболее крупные образования Вселенной – клетчатые или ячеистые структуры, которые напоминают пчелиные соты или, быть может, кружева. Размеры ячеек достигают ста мегапарсеков ($\sim 10^{24}$ м) при размере видимой части Вселенной около $\sim 10^{25} - 10^{26}$ м [Гуревич, Чернин, 1983].

Мы не ставим себе целью перечислить здесь все гипотезы, объясняющие природу вращения галактик. Однако из проведенного обзора уже просматривается вполне определенная «закономерность». А именно, и И. Кеплеру, и Р. Декарту, как механикам, было ясно, что вихревое вращательное движение не может взяться ниоткуда. Оно, в соответствии с законами сохранения, либо существует в природе, либо его нет. Ньютон – один из основателей механики, законы которой в то время, в принципе, объясняли практически все известные физические, механические и астрономические данные, действительно, *мог не видеть необходимости в вихревой гипотезе*, хотя прекрасно понимал, что вращательное движение, в отличие от поступательного равномерного движения,

абсолютно. К тому же, в рамках написанных им, по сути, *линейных* дифференциальных уравнений движения, такая гипотеза является не просто «более трудной», а, как теперь ясно, практически неразрешимой. Кроме того, вихревая структура галактик была во времена Ньютона в силу «слабости» телескопов неизвестна, да и само их понятие ученым было пока не ведомо. Нельзя сбрасывать со счетов и упоминавшуюся выше борьбу научных школ Ньютона и Декарта; такая борьба во все времена накладывала значительный отпечаток на развитие всех научных направлений.

Частицы. В первой половине XX века окончательно утверждает свое положение квантовая механика. Одним из основных ее положений является понятие спина элементарной частицы как собственного момента количества движения, квантовый характер которого в долях постоянной Планка $I \approx h \sim 10^{-27}$ эрг·с постулируется. К этому времени вихревая структура галактик становится общепринятой. И проблема вращательного движения теперь уже становится *и квантовой, и космологической*.

Как известно [Ландау, Лифшиц, 1974; с. 38], «волновое уравнение Шредингера играет в квантовой механике ту же роль, что уравнение Ньютона в классической механике». При этом, в квантовой механике связь момента количества движения со свойствами симметрии по отношению к вращениям «становится в особенности глубокой, делаясь по существу основным содержанием понятия о моменте... Момент приобретает смысл квантового числа... Становится несущественным вопрос о его происхождении, и мы приходим естественным образом к представлению о «собственном» моменте, который должен быть приписан частице вне зависимости от того, является ли она «сложной» или «элементарной»» [Левич, Вдовин, Мямлин, 1971; с. 234-235]. По-видимому, по этой причине, согласно обзору [Эстерле, 2003], во многих возникших независимо друг от друга теориях (Гельмгольц, Томсон, Ацюковский, Бауэр и др.) элементарные частицы, ядра атомов, атомы, молекулы и др. образования до галактик и силовых полей включительно рассматриваются как вихревые структуры среды, заполняющей Вселенную. Квантовый характер образований в таких теориях естественным образом вытекает из свойств этой среды, поскольку вихревые структуры могут иметь только такие параметры, которые допускают существование целого числа стоячих волн. Если принять, что пространство имеет свойства жидкости с очень малой вязкостью и плотностью (аналог квантовой жидкости гелия-II), то все структуры Вселенной от элементарных частиц до галактик, их скоплений и физических полей можно представить в виде вихрей (вихревых колец, вихревых нитей) этой жидкости [Madelung, 1926]. При таком подходе квантовая механика, фактически, становится разделом гидродинамики, вихревые структуры в такой среде легко образуются, долго существуют, что и приводит к их накоплению.

И в этой связи, на наш взгляд, вовсе не случайно появление гипотезы Гамова-Вейцмана, авторы которой, по сути, на новом качественном уровне наших знаний о Вселенной возвращаются к идее Декарта-Канта-Лапласа и связывают природу вихревого движения во Вселенной, фактически, с процессами, объясняющими ее рождение. Другие (тоже многочисленные) теории и гипотезы вихревых движений, как нам представляется, есть обычный, во многом традиционный результат исследования, проводимый, в основном, в рамках гидродинамики.

Приведенный материал показывает, что вращательные (вихревые) движения действительно являются характерным и неотъемлемым (внутренним) свойством материи галактик $R \sim 10^{20} - 10^{22}$ м, их скоплений $R \sim 10^{23} - 10^{24}$ м и всей видимой части Вселенной $R \sim 10^{26}$ м со временем жизни около $\tau \sim 10^{10}$ лет $\sim 10^{17}$ с и элементарных частиц $R \sim 10^{-15}$ м, наименьшее время жизни которых (так называемых резонансов) составляет $\tau_{min} \sim 10^{-23}$ с.

Солнечная система. Имеющиеся данные убедительно показывают, что вращательные (вихревые) движения характерны для вещества и на «промежуточных» пространственно-временных масштабах и не зависят от его состояния. Так, на звездном уровне, например, в нашей солнечной системе планеты вращаются вокруг Солнца, их

спутники – вокруг планет, а сами планеты – вокруг собственных осей вот уже в течение нескольких миллиардов лет. На планетарном уровне достаточно интенсивные вращательные движения проявляются в течение продолжительных отрезков времени в виде: 1) Циклонов ($R \sim 10^{6-7}$ м) в атмосферах Земли (рис. 10.2), Сатурна, Юпитера (Большое красное пятно Юпитера непрерывно наблюдается уже в течение более 300 лет [Незлин, 1986]) и, по-видимому, Нептуна [Орленок, 2000]; 2) Замкнутых течений в мировом океане Земли, а также 3) Кольцевых [Кац, Козлов, Полетаев и др., 1989; Кулаков, 1986], вихревых (рис. 10.3) [Ли Сы-гуан, 1958; Мелекесцев, 1979; Мясников, 1999; Слензак, 1972] и других более экзотичных (рис. 10.4) образований ($R \sim 10^2 - 10^6$ м), объединенных в пределах твердой части литосферы в орогенную планетарную систему [Шейдеггер, 1987]. Результатом движения блоков твердой среды является образование дислокаций и дисклинаций. Их размеры и характерные времена изменяются в широких пределах: от микротрещин $R \sim 10^{-8}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ с [Вопросы..., 2002] до очагов сильнейших



Рис. 10.2. Космический снимок циклона в Охотском море и вихревой структуры с центром в районе Ичинского вулкана на Камчатке.

землетрясений $R \sim 10^6$ м, $\tau \sim 100$ лет $\sim 10^9$ с [Викулин, 2003] и, возможно, сейсмических поясов $R \sim 10^8$ м, $\tau \sim 10^8$ лет $\sim 10^{15}$ с [Викулин, 2003; Викулин, Мелекесцев, 1997]. Эффекты поворота макрообъемов на углы 10^0 и более (эффекты вращения) установлены и в твердых телах в лабораторных условиях [Владимиров, Романов, 1970]. Как показали результаты, полученные в последние десятилетия, такие эффекты связаны с перестройкой структуры «лабораторного» твердого тела, происходящей на «мезоуровне» $R \sim 10^{-7} - 10^{-3}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ с [Рыбин, 2002].

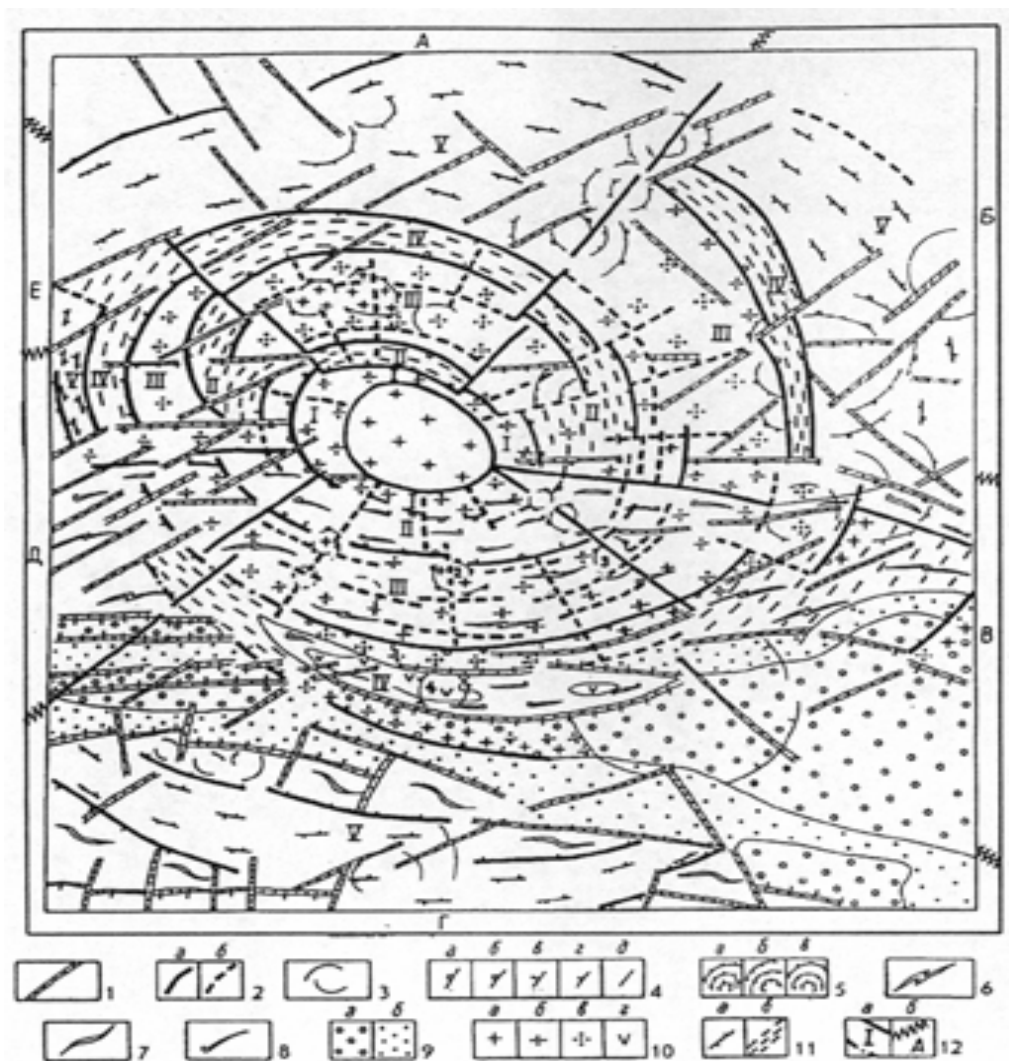


Рис. 10.3. Пример вихревой структуры центрального типа, имеющей размер около 80-100 км в диаметре; территория Соловьевского свода, Верхнее Приамурье [Мясников, 1999].

Одним из результатов семинара «Вихри в геологических процессах», прошедшего в марте 2003 г. в Петропавловске-Камчатском, является вывод [Викулин, 2004]: несмотря на большое количество накопленных данных о вихревых структурах как на Земле, так и в Солнечной системе на других планетах и их спутниках, проблема вихревых движений в геологических процессах по-прежнему находится на уровне 20^х - 50^х годов прошлого столетия, когда она впервые и была обозначена Ли Сы-гуаном [Ли Сы-гуан, 1952, 1958; Lee, 1928]. С тех пор появилось много данных, прямо или косвенно указывающих на существование вихревых (кольцевых) структур в литосфере, выделенных на геологическом материале всех геологических эпох на самых разных масштабных уровнях: от локального до планетарного [Вихри..., 2004; Волков, 2002; Кац, Козлов, Полетаев и др., 1989; Кулаков, 1986; Мелекесцев, 1979; Полетаев, 2002; Ротационные..., 2007; Слензак, 1972]. Существование вихревых движений в земной коре подтверждается данными прямых геодезических и геофизических наблюдений [Викулин, 2008; Геодезические..., 1970; Международный..., 2003; Мелекесцев, 1979; Сато, 1984].

Самой большой по размеру кольцевой «дислокационной» структурой Земли является Тихоокеанское кольцо. Анализ структурных, вещественных, морфологических, геофизических и геодинамических данных позволяет сделать вывод о круговой симметрии Тихоокеанского пояса [Маслов, 1996]. Вектор движения Тихоокеанской плиты испытывает периодические повороты по и против часовой стрелки при амплитуде угла

вращения около 10 *градусов* [Берсенов, 1964], что приводит к смещениям, достигающим нескольких сотен километров [Маслов, 1996]. При этом периодам 30-23, 16-13, 6-0 *млн лет* тому назад отвечает субширотное сжатие (вращение по часовой стрелке), периодам 22-17, 12-7 *млн лет* – субширотное растяжение (вращение против часовой стрелки) [Jackson, Shaw, Bargar, 1975; Takeuchi, 1986].



Рис. 10.4. Структура «Спираль» в районе о. Ольхон (оз. Байкал). Жесткие геологические тела (метагабброиды, ультрабазиты), а также ядра гранито-гнейсовых куполов испытывают вращение и возникают вихревые структуры. Светлое – мраморы, гранитные жилы (нитевидные белые линии), темное – гнейсы и кварциты. Аэрофото масштаба 1:5000 [Розен, Федоровский, 2000].

В результате получены данные, которые никак не укладываются в рамки существующих представлений о движении вещества. Например, согласно [Волков, 2002] «в океанских рифтовых системах Земли существуют вихревые зоны с размерами 2-3 *тыс км* каждая, поворот в которых выполняется трансформными разломами». При этом направление вращения вихрей (правое, если смотреть от центра Земли наружу) всюду одинаковое – и в Северной полярной области, и в Южной, и в четырех экваториальных областях. Удивление (по мнению Ю.В. Волкова [2002] и, на наш взгляд, вполне обоснованное) вызывает то обстоятельство, что такую ориентацию вихрей нельзя объяснить ни действием обычных сил Кориолиса - очевидно, ни с помощью уравнений гидродинамики Навье-Стокса (и Эйлера), так как эти уравнения не содержат выделенного направления.

Структура пространства-времени

В физике законы сохранения и, следовательно, уравнения движения тесно связаны с симметрией пространства-времени. Поэтому вихревые структуры необходимо рассматривать в их тесной взаимосвязи, в первую очередь, с проблемой организации структуры вещества в пространстве и во времени.

Интересный вывод содержится в работе [Бери, 1993]. «Основными источниками регулярных и периодических вариаций являются процессы обращения и вращения небесных тел и их систем вокруг центров тяжести. Во время этих движений системы проходят особые области орбит и космического пространства, которые оказывают прямо или косвенно энергетические и управляющие воздействия на земные процессы (см. так же [Леви и др., 2002; 2003]. Отклик на эти воздействия зависит от частотных и

энергетических характеристик земных оболочек и Земли в целом. Таким образом, при развитии литосферы в ее структуре и составе записывается не только собственная история Земли, но и история всей Вселенной. Литосфера хранит данные за последние 3,6 млрд лет, которые могут быть использованы для построения и проверки новых и известных ранее геолого-космологических теорий. Отсутствие крупного научного направления на стыке геологии и астрономии связано с неоправданной специализацией образования в области естественных наук».

Время. После Эйнштейна неоднократно предпринимались попытки понять суть времени. Например, И. Пригожин в своей неравновесной термодинамике [Пригожин, Стенгерс, 1986] сделал шаг в правильном направлении, предсказав, что необратимость не может возникать на химическом уровне материи, а должна существовать уже на самых глубинных уровнях микромира или, с учетом выше сказанного, на самых начальных стадиях жизни Вселенной. Однако наиболее глубокое представление о времени имеют именно геологи, так как они непосредственно работают с материалом, время жизни которого огромно – миллиарды лет. И они знают, что все в этом мире изменяется – независимо от того, покоится нечто или движется – и что время не обязательно течет равномерно, существуют как медленные изменения, так и скачки, бывает и ускоренное развитие [Эстерле, 2003]. Неслучайно проблеме времени в геологических процессах посвящены обстоятельные работы, наиболее полный список которых приведен в [Симаков, 1999]. Незавершенность концепции геологического времени вызвана, в первую очередь, отсутствием глубокого философского осмысления его специфической природы, с одной стороны, и кардинального отличия от обыденного (физического) времени – с другой [Симаков, 1999; с. 4]. Исследования в этом направлении только-только начинаются.

Пространство. В этом направлении сделано несколько больше. Внимательное изучение поверхности Земли открывает ряд удивительных закономерностей в ее строении [Маслов, 1996]. Это, например, антиподальность распределения территорий и акваторий [Каттерфельд, 1962]. Специальные исследования показывают, что симметрия в распределении форм рельефа может быть более сложной [Шолпо, 1986; Уфимцев, 1988, 1992]. Например, срединноокеанические хребты, островные дуги и другие крупные формы рельефа субмеридионального простирания распределены равномерно, примерно через 90 градусов [Милановский, Никишин, 1988; Шолпо, 1986; Hughes, 1973; Pan, 1985]. Такие закономерности форм рельефа являются следствием распределения напряжений земной коры, возникающих под влиянием ротационных сил Земли [Воронов, 1993; Гущенко, 1979]. Как частный случай этой закономерности можно рассматривать подобие контуров Срединно-Акеанического хребта и Западно-Тихоокеанской активной зоны, совпадающих при повороте на 180 градусов [Ильичев, Шевалдин, 1986]. Обращает на себя внимание характерное S-образное очертание субмеридиональных форм рельефа, причем концы S приходятся на полюса, а его средняя часть проходит примерно по Тетису, «который всегда был ослабленной зоной земной коры» [Фурманье, 1971; с. 86]. Об S-образном изгибе берегов Атлантического и Тихого океанов писали [Личков, 1931; Haveman, 1929], связывая с ним относительный левый сдвиг северного и южного полушарий. Относительный сдвиг полушарий вдоль субэкваториальной зоны разломов отмечался и еще раньше [Hochstetter, 1886]. Закономерности современного распределения крупных форм рельефа, видимо, не случайны. В работе [Берсенева, 1964] приводятся данные, согласно которым размещение континентов относительно оси вращения было иным в конце Протерозоя, но также отражало вполне определенный порядок. В работе [Kanasewich, Havskov, Evans, 1978] показана высокая степень пространственной организации лика планеты для всего Фанерозоя.

Согласно [Шолпо, 2001], в настоящее время проблема организации структуры вещества применительно к вихревым образованиям в геологических процессах, протекающих на Земле и других космических телах, привлекает внимание все большего

числа геологов, геофизиков и ученых других специальностей. Черты закономерной упорядоченности разного порядка и ранга обнаруживаются от глобальных масштабов до локального устройства сравнительно небольших регионов. Симметрии, антисимметрии, подобия обнаруживаются на разных масштабных уровнях. И, пожалуй, наиболее существенно то, что этот феномен глобальной упорядоченности установлен не только для поверхности твердой Земли – рельефа, но с достаточной надежностью прослежен в более глубокие оболочки планеты: литосферу, верхнюю мантию, и с меньшей уверенностью до границы с внешним ядром. Можно считать установленным, что структурная организация Земли наиболее полно отвечает симметрии куба. На сегодняшний день обобщено и сведено в целостную картину достаточно большое количество фактических данных, которые демонстрируют со всей очевидностью упорядоченную структурную организацию Земли. Не менее важно и то, что подобный феномен установлен на всех планетах земной группы. Это свидетельствует о том, что Земля, по крайней мере, по этому признаку – структурному устройству, не является уникальным объектом, а принадлежит к семейству околосолнечных твердотельных планет. Надо бы попытаться, как бы это ни было трудно, найти механизмы и физически обосновать их, чтобы понять, как из первичного, неоднородного и, скорее всего, хаотичного тела возникла сегодняшняя гармонично устроенная Земля и другие космические объекты.

Вихри – так что же это такое?

Как видим, проблема вихревых структур в геологических процессах, по сути, является составной и неотъемлемой частью более общей задачи о вихревых движениях материи вообще. При этом каждая из составляющих задачи – будь то проблемы возникновения галактических вихрей, существования спина у элементарных частиц или генезиса вихревых структур в геологических процессах, имеет свои отличительные стороны, которые «пронизаны» для них общим и единым типом движения – вихревым вращением. Отличительной особенностью вихревого движения по сравнению с поступательным, является его способность преобразовывать тепловую энергию непосредственно в кинетическую энергию движения потока в пространстве, что на практике реализуется в теплогенераторах [Потапов, Фоминский, Потапов, 2000]. Данные многочисленных наблюдений показывают, что при вихревом движении при определенных условиях происходят очень интересные и во многом пока непонятные явления: свечение потока, в том числе инфракрасное (Большое Красное Пятно Юпитера!) и микроволновое (белые пятна Сатурна?) излучения; превращение массы в энергию; движение со сверхсветовыми скоростями; изменение веса гироскопа в зависимости от скорости и направления его вращения; уменьшение трения при увеличении скорости потока в канале и отрицательное сопротивление (т.е. засасывание в канал) после превышения некой критической скорости; в некоторых случаях струя стремится прийти во вращение даже без помощи кариолисовых сил и др. [Потапов, Фоминский, Потапов, 2000].

Относительно природы вихревых движений материи в соответствии с приведенными выше данными и обзором можно высказать следующее суждение. Гипотез, пытающихся объяснить вихревые движения, появилось уже достаточно много. Однако обращает на себя внимание вполне определенная закономерность, согласно которой через то или иное время на качественно новом уровне наблюдается возврат к физически очевидной идее об абсолютности вращательного движения. Поэтому, продолжая цепочку гипотез Декарта – Канта-Лапласа, Г.А. Гамов, как нам представляется, с неизбежностью и пришел к выводу о существовании «догалактической турбулентности». Из самых общих соображений очевидно, что в любой области Вселенной должны иметь место вращения всех масштабов: галактических, звездных, планетарных и т. д. до элементарных частиц включительно, что, по-видимому, и позволяет принять гипотезу о «равномерной

завихренности» пространства. Такое фундаментальное свойство, как следует из гипотезы Г.А. Гамова, могло быть «придано» материи в момент Большого взрыва.

Резюме. Дать ответы на обозначенные вопросы и решить поставленные проблемы, как показывают приведенные выше данные и обзор, по-видимому, можно только рассматривая их во взаимосвязи и на качественно новом уровне. В рамках такого нового подхода необходимо будет учесть *все* особенности вихревых (вращательных) движений в пределах *всего* наблюдаемого масштаба: $\Delta R \sim 10^{40}$ м, $\Delta \tau \sim 10^{40}$ с, $\Delta I \sim 10^{100}$ эрг·с. Такой путь решения проблемы *с точки зрения физики*, очевидно, будет испытывать наибольшие трудности при описании именно той составляющей этого сложного и многогранного вихревого движения материи, которая должна будет объяснить существование и генезис *вихревых структур в геологических процессах*.

В рамках такого нового подхода обязательно надо будет учесть и «сложившийся» уже опыт борьбы научных школ, который во все времена, начиная с Декарта-Ньютона (см. выше) и до настоящего времени [Потапов, Фоминский, Потапов, 2000], в значительной степени влияет на решение проблемы вихревых движений материи - по сути, тормозит.

В этой связи как не вспомнить противоборство других научных школ.

В 1987 г. научный мир отметил 300-летие механики Ньютона. Трудно перечислить все те достижения, которые были достигнуты человечеством с помощью этой фундаментальной физической теории. Тем не менее, в конце XIX века основы механики Ньютона были Э. Махом совместно с другими исследователями подвергнуты серьезной критике. Э. Мах выдвинул принцип (впоследствии названный его именем), согласно которому силы инерции в механике появляются при ускоренном движении относительно центра масс Вселенной. Эта критика оказалась столь плодотворной, что именно под ее влиянием возникла сначала бессильная механика Герца, а затем релятивистская механика Лоренца-Эйнштейна и общерелятивистская механика Эйнштейна.

После того, как в начале XX века были сформулированы основные принципы и уравнения квантовой механики, физики-теоретики разделились на две группы: «детерминистскую - Бог не играет в кости!» группу А. Эйнштейна (М. Планк, А. Эйнштейн, Л. де Бройль, Э. Шредингер) и «вероятностную» - Н. Бора (Н. Бор, В. Гайзенберг, Н. Борн, П. Дирак). Сам факт возникновения этих групп характеризует глубокий кризис (не забвение – уже прогресс!) в понимании физической реальности, который длится вот уже более полувека. Согласно [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993], вероятностный характер описания квантовой теории связан с тем, что материя представляет собой имеющие конечные размеры сгустки поля инерции, которые, по сути, представляют собой *поля кручения*. И так, опять в очередной раз «круг замыкается» и опять возвращаемся к идее об абсолютности вращательного движения: «свободные» вихри Декарта, взаимодействующие вихри Гельмгольца, вихревые атомы Кельвина, квантовая механика – спин, инерционные поля кручения! Таким образом, теория инерционных полей кручения, по мнению [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993], «решает многолетний спор между А. Эйнштейном и Н. Бором в пользу Э. Эйнштейна, отказываясь от косвенного описания реальности и восстанавливая образное мышление в физике микромира» и, добавим – в вихревой геодинатике литосферы.

Вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли [Мелекесцев, 2004]

С разнообразными проявлениями вращательных движений и вихревых структур человек познакомился буквально с момента своего появления как вида. При употреблении в пищу морских и наземных моллюсков древний человек не мог не обратить внимание на спиральное (право- и левозакрученные раковины) внутреннее строение раковин многих из них, которые к тому же использовались им еще и в качестве одних из первых украшений. Столь же рано человек непосредственно испытал воздействие водяных вихрей -

водоворотов на реках, которые ему приходилось преодолевать, а позднее по ним и плавать. Сталкивался он и с мощными воздушными вихрями – смерчами, хотя вряд ли предполагал общую вихревую природу смерчей и водоворотов. Причем очень давно человек подсознательно видел в вихрях и нечто мистическое: недаром спиральные вихри часто присутствуют на древних наскальных рисунках и орнаментах.

С античных времен и позже с развитием механики, математики, астрономии вихри и вихревые движения уже использовались для различных технических целей, создания механизмов и приборов, построения космогонических гипотез. Регулярные метеорологические наблюдения позволили открыть, описать и объяснить происхождение гигантских спиральных воздушных вихрей – разнообразных типов циклонов и антициклонов. Как и все названные выше проявления вращательных движений и вихревых структур циклоны и антициклоны тоже обязаны своим возникновением именно ротационному эффекту, обусловленному быстрым вращением Земли. В свою очередь, через посредство глобальной циркуляции атмосферы и деятельность ее наиболее активных компонентов – циклонов и антициклонов – вращательные движения получили возможность влиять на весь комплекс физико-географических условий, динамику всех компонентов природной среды, рельефообразующие процессы и биосферу.

Что касается воздействия ротационного эффекта на собственно геологические процессы, имевшие место на Земле, то здесь существовало негласное табу, основанное на представлении о земной поверхности и верхней оболочке планеты как тверди. Твердь же, по определению, не должна была подвергаться воздействию от вращения Земли. В глобальном масштабе исключение допускалось лишь для работы текучей воды по известному закону Бэра-Бабинэ. Это правило, согласно которому реки, текущие на равнинах Северного полушария, подмывают преимущественно правые берега, а Южного – левые берега. В основе его лежит закон Кориолиса, утверждающий, что всякое тело, движущееся у поверхности Земли, независимо от направления движения, отклоняется в Северном полушарии вправо, в Южном – влево, вследствие вращения Земли с запада на восток.

Запрет о влиянии ротационного эффекта на другие геологические процессы был нарушен только в первой половине XX века. Этому способствовало несколько благоприятных факторов: 1) создание относительно точных и достоверных географических и геологических карт на обширные территории земного шара, 2) детальные геологические исследования и 3) высокоточные геодезические измерения.

Так, практически одновременно в конце двадцатых-начале тридцатых годов XX века появились две работы.

В первой из них молодой китайский геолог Ли Сы-гуан в своей публикации 1928 г. [Lee, 1928] впервые выделил и описал вихревые структуры в геологических разрезах в Китае. Это были преимущественно вихревые структуры с горизонтальной осью вращения. Изложенные там представления получили дальнейшее развитие в монографиях Ли Сы-гуана "Геология Китая" [1952] и "Вихревые структуры Северо-Западного Китая" [1958]. Однако в СССР работы Ли Сы-гуана были встречены неоднозначно, что хорошо видно из "Предисловия" и раздела "От редактора" ко второй из этих книг. В "Предисловии" его автор – Министр геологии и охраны недр СССР П.Антропов писал: "Мы хорошо сознаем, что далеко идущие теоретические выводы, которые делает Ли Сы-гуан, такие, например, как вращение крупных масс земной коры в связи с вращением Земли, не могут быть доказаны только экспериментальным путем. Для этого необходимо проделать еще очень большую исследовательскую работу..." [с.5]. Научный редактор монографии профессор В.Павлинов отметил, что: "Вопросам развития структур в геосинклинальных или платформенных условиях, как они понимаются советскими геологами, Ли Сы-гуан отводит ...скромное место..., так как автор...придерживается в основном идей А. Вегенера (в СССР они в то время, по идеологическим соображениям, отвергались, т.к. А. Вегенер симпатизировал фашистской идеологии) о горизонтальном дрефте материков..."

На современной стадии развития геотектонических знаний пока невозможно безапелляционно решить вопрос о справедливости всех заключений автора в отношении причин и механизма формирования складчатых и разрывных структур, возникших в результате вращательных движений отдельных масс земной коры" [с.7].

В 1933 г. была опубликована работа С. Фузыхара и др. [Fujiwhara, Tsujimura, Kusamitsu, 1933], подготовленная на основе данных результатов повторных геодезических работ в 1884-1889 гг. и 1924-1925 гг. в районе залива Сагами на Тихоокеанском побережье о. Хонсю (Япония). На помещенном там рисунке (рис. 10.5) впервые было показано вращение крупного блока земной коры вокруг залива Сагами. При этом весьма интересно, что вторая (1924-1925 гг.) серия измерений была проведена сразу после знаменитого мощнейшего ($M = 8.2$) землетрясения 1.09.1923 с эпицентром в заливе Сагами, откуда тогда подводным обвалом было удалено около 70 км^3 осадков, а дно самого залива углубилось до 400 м.

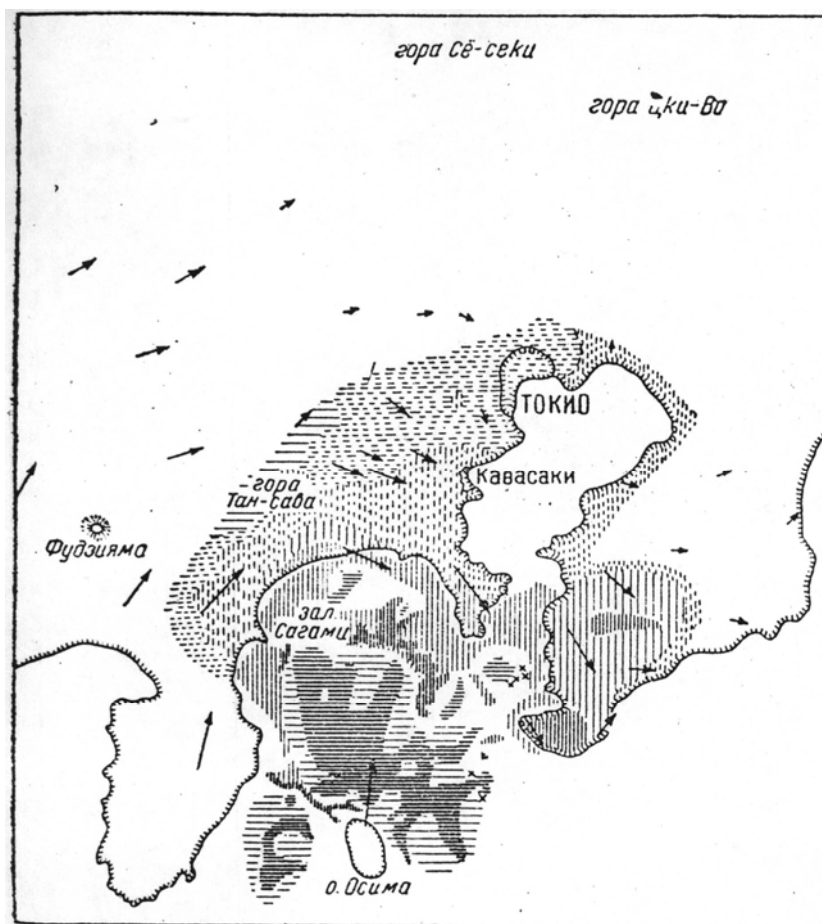


Рис. 10.5. Вращение земной поверхности вокруг залива Сагами (о. Хонсю, Япония) после катастрофического землетрясения Канто 1.09.1923, $M = 8.2$. Вертикальные штрихи обозначают районы поднятия, горизонтальные – районы опускания. Направление и величина стрелок в условном масштабе показывают направление и величину перемещения точек [Fujiwhara Tsujimura, Kusamitsu, 1933].

Следующий крупный вклад в проблему изучения вихревых структур земной коры был сделан в 60-70-х годах XX в. после составления уточненных батиметрических карт океанов и массового распространения космических изображений земной поверхности. Именно тогда исследователи самых разных специальностей смогли реально "увидеть" из космоса детальную структуру спиральных вихрей - циклонов, включая тропические циклоны – тайфуны, смотрящиеся наиболее эффектно. В то же время были открыты с

помощью спутников спиральные вихри в океанах – ринги. Их диаметр составлял 300-500 км, а длительность существования достигала 3-4 лет. По сравнению с воздушными вихрями (циклонами) эти водяные вихри (ринги) жили примерно на два порядка дольше, что хорошо коррелируется с разницей (тоже на 2 порядка) вязкости воздуха и воды.

Кроме того, ряд исследователей обратил внимание на большое сходство изображений облачных систем циклонов с рисунком наземных геологических структур [Назиров, 1975]. Распределение вулканических образований, созданных за последние 50-100 млн лет на дне океанов, позволило создать вихревую вулканическую гипотезу [Мелекесцев, 1979; 1980], так как многие вулканы там приурочены к спиральным вихревым структурам, очень напоминающим циклоны. Только вместо паровых облаков у них "облака" как бы выплавлены из камня.

С помощью космических аппаратов была выявлена гигантская вихревая структура на Марсе (рис. 10.6). Она охватывает большую часть северного полушария этой планеты. На Юпитере активной вихревой структурой является Большое Красное пятно диаметром ~ 40 тыс км. При этом необходимо отметить, что на медленно вращающихся планетах вихревые структуры отсутствуют. Их нет, например, на Меркурии (период вращения 59 земных суток), Венере (период вращения 243 земных суток). Наша Луна тоже лишена следов вихревых структур по аналогичной причине.

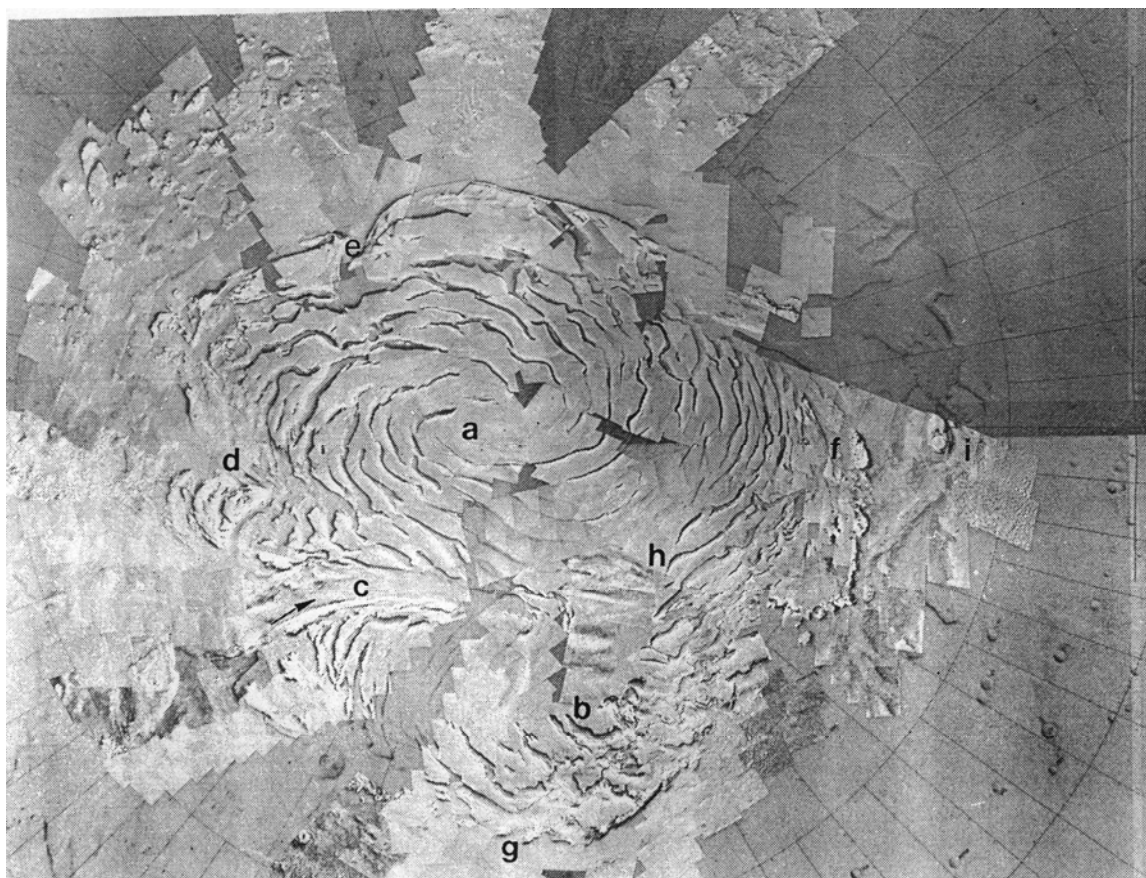


Рис. 10.6. Выраженные в рельефе следы планетарных вихревых структур в Северном полушарии Марса [Whitney, 1979].

Таким образом, полученные в XX в. данные уже сейчас позволяют сделать вывод о большом воздействии ротационного эффекта помимо физико-географической среды на формирование геологических структур, магматическую деятельность и распределение вулканов на быстро вращающихся планетах, включая Землю. Правда, показать с помощью точных расчетов, как и с помощью какого механизма все это происходило и происходит, пока еще не удалось.

Новый диалог с Природой

Единство природы прослеживается во всем пространственно-временном масштабе от микромира - элементарные частицы, ядра: $R \sim 10^{-15-18}$ м, $\tau_{min} \sim 10^{-23}$ с, до макромира - звездные системы, галактики, наблюдаемая часть Вселенной: $R \sim 10^{26}$ м, $\tau \sim 10^{10}$ лет. Действительно, во всем ряду физических объектов, имеющих характерные размеры R , времена τ , массы M , плотности ρ , температуры T и давления P , изменяющиеся в пределах многих десятков порядков по величине:

- элементарные частицы: $\tau_{min} \sim 10^{-23}$ с, $R \sim 10^{-15-18}$ м, $M_{электрон} \sim 10^{-31}$ кг
- ядра атомов: $\rho \sim 10^{17}$ кг/м³,
- атомы – молекулы,
- макротела, вещество (кристаллы, жидкость, газ, плазма),
- планеты: $R \sim 10^4 - 10^5$ м, $\tau \sim 10^9 - 10^{10}$ лет, $\rho_{средняя} \sim (0,7 - 5,5) \cdot 10^3$ кг/м³,
- звезды (Солнце): $R \sim 10^9$ м, $\tau \sim 10^{10}$ лет, $M \sim 10^{30}$ кг, $T \sim 10^7$ К, $P \sim 10^{11}$ атм, в том числе нейтронные: $\rho \sim 10^{17}$ кг/м³,
- галактики: число звезд $\sim 10^9 - 10^{12}$, $R \sim 10^4$ пс $\sim 10^{20}$ м, $M \sim 10^{41}$ кг,
- Вселенная: $R \sim 10^{26}$ м, $\tau \sim 10^{10}$ лет, число галактик $\sim 10^{11}$, $M \sim 10^{52}$ кг,

выделено только четыре (!) вида фундаментальных взаимодействия, все остальные сводятся к ним:

- сильное (ядра, $R \sim 10^{-15}$ м, $\tau \rightarrow \infty$) ~ 1 ,
- электромагнитное ($R \rightarrow \infty$) $\sim 10^{-3}$,
- слабое (превращение элементарных частиц, $R \sim 10^{-16}$ м, $\tau \sim 10^{-8}$ с) $\sim 10^{-14}$,
- гравитационное ($R \rightarrow \infty$) $\sim 10^{-40}$.

При этом если в ядрах действует только сильное взаимодействие, в мире элементарных частиц – только слабое и электромагнитное, в веществе – только электромагнитное и гравитационное, в масштабе видимой части Вселенной – только гравитационное, то внутри нейтронных Звезд – одновременно гравитационное и сильное и, по-видимому, в некоторых их частях слабое и электромагнитное.

Следует отметить, что согласно данным работ [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Шипов, 2002], все четыре фундаментальных взаимодействия сводятся к одному, свойства которого определяются полями кручения.

Как видим, мир, несмотря на его кажущееся многообразие, управляется небольшим числом физических законов, являющимися следствиями симметрии пространства-времени. Именно действием этих законов и следует объяснять образование и Солнца и Солнечной системы (закон Бодэ (1.1), данные в табл. 1.1 и на рис. 1.3). Закономерное распределение плотности вещества в системах Земля – Луна и ядро Юпитера – его спутники (рис. 1.5) указывает на то, что и образование планет солнечной системы происходило по вполне определенным закономерностям.

Изучение таких физических закономерностей на примере планеты Земля и является предметом «Физики Земли».

При этом не нашли пока своего научного объяснения следующие важные экспериментально установленные факты, имеющие непосредственное отношение к процессам образования как Солнечной системы, так и, возможно, Вселенной в целом:

- Масса Солнца составляет 99,9% всей массы солнечной системы, в то время как планеты обладают 98% ее общего момента количества движения, при этом большая часть момента «принадлежит» планетам-гигантам. Не ясно, каким образом момент передается (или передался в момент образования системы) от центрального тела к внешним частям системы.

- Во время формирования планет внутри солнечного облака слагающее его вещество должно было сильно дифференцироваться по химическому составу, в результате чего Нептун и Уран оказались состоящими из элементов II группы, Сатурн и Юпитер – из

элементов I группы, а планеты земной группы – из элементов III группы. Механизм такой химической дифференциации не ясен.

- Понимание природы вихревых движений во всем масштабе движений от галактик до элементарных частиц может привести к появлению новых физических представлений о свойствах пространства – времени.

Фактически, речь должна идти о формировании языка общения, на котором мы сможем вести *«Новый диалог с Природой»* (определение И. Пригожина и И. Стенгерс [1986]), задавая «рабочие» вопросы и получая адекватные ответы [Тимашев, 2003].

В этой связи весьма интересным представляется новый подход к Солнечно-Земным связям, развиваемый К.Г. Леви с соавторами [Леви и др., 2002; 2003].

Создан принципиально новый курс лекций, не имеющий аналогов, как в нашей стране, так и, по-видимому, за рубежом: «Современная геодинамика и гелиогеодинамика». Этот курс [Леви, Задонина, Бердникова и др., 2003, с. 3] «...призван ознакомить студентов с современными представлениями о геодинамике планеты, взаимосвязями различных природных и социальных процессов и причинами, порождающими экстремальные ситуации в природе и социуме с оценкой роли влияния Солнца на происходящие в окружающей среде изменения. Гелиогеодинамика – это самостоятельное естественнонаучное направление, изучающее взаимодействие геосфер Земли между собой и внешним миром. Основной целью гелиогеодинамики является, прежде всего, выявление периодичности возникновения экстремальных природных ситуаций и прогноз тех явлений, которые могут иметь место в случае неблагоприятного развития процессов не в одной, а одновременно в нескольких геосферах и в связи с проявлением солнечной активности. При этом авторы полагают, что в природе катастроф не бывает и что под термином «катастрофа» нужно понимать лишь социально-экономическую оценку потерь в результате возникновения той или иной экстремальной природной ситуации. Окружающий нас мир чрезвычайно сложен по своей внутренней структуре, а взаимосвязи между экстремальными событиями и явлениями, происходящими вокруг нас, организованы иерархично и системно».

В результате большой работы коллектива авторов был проведен широкомасштабный сбор хронологических данных об аномальных явлениях в природе и социуме на большой по площади территории Сибири и Монголии в течение времени, превышающем последние 500 лет нашей истории [Леви, Задонина, Бердникова и др., 2003, с. 374]. «Не все закономерности развития процессов выявлены, не все сопоставления осуществлены, но сделано главное – положено начало планомерному сбору сообщений о тех или иных аномальных явлениях. Эта работа продолжает оставаться необходимой, несмотря на развивающиеся исследования в области мониторинга различных природных процессов так же, как и наблюдения за солнечными пятнами и вычисление чисел Вольфа, отражающих вариации солнечной активности. Наверное, не везде нам удалось убедить читателя в справедливости нашего взгляда на всеобъемлющее влияние Солнца на все, что происходит на нашей матушке – Земле, но начатые исследования мы намерены продолжать в этом направлении. Важным во взаимоотношениях в системе «Солнце-Земля» является постоянное запаздывание реакции земных процессов на солнечное воздействие. Складывается впечатление, что природная среда накапливает в себе это воздействие или объем солнечной энергии до критических значений, после которых она не способна удерживать эту энергию в себе и реагирует возникновением аномальных природных явлений. Это проявление своеобразной «упругости» природной среды по отношению к солнечному воздействию».

Выявление физических механизмов, обеспечивающих такого рода комплексные взаимосвязи между геофизическими и социальными явлениями, по-видимому, дело будущего.

Однако существование взаимосвязей между этими явлениями и активностью Солнца, по-видимому, не вызывает сомнений и наводит на мысль о моментной, вихревой

природе таких физических механизмов. Действительно, с одной стороны, согласно (Сидоренков, 2002), все геофизические явления в той или иной степени взаимосвязаны с режимом вращения Земли и его нестабильностями. С другой - согласно [Тимашев, 2003; с. 115-117], «...11-летняя цикличность обусловлена не собственной внутренней динамикой Солнца как звезды (трудно на основе собственных параметров Солнца сконструировать соответствующее «характерное время»), а со сложной динамикой всей солнечной системы. Еще в 1965 г. путем компьютерных расчетов было показано, что центр Солнца движется относительно центра масс солнечной системы (барицентра) по сложной траектории и может удаляться от барицентра на расстояния, превышающие удвоенный солнечный радиус [Долгачев, Доможилова, Хлыстов, 1991]. Причина этого состоит в том, что на долю Солнца приходится только около 2% общего момента количества движения солнечной системы, хотя массовая доля составляет 99,9%. Однако такое сложное движение центра масс Солнца (его характерный период составляет 179 лет), обычно, не связывают с иницированием 11-летнего цикла, несмотря на то что период обращения Юпитера, наиболее критичной в данном рассмотрении планеты, составляет около 11 лет. (На долю Юпитера приходится более 60% орбитального углового момента (табл. 1.2) и около 80% собственного вращательного момента в солнечной системе (табл. 1.3) – А.В.). Согласно [Тимашев, 1991; 1993] соответствующие оценки необходимо проводить, учитывая, что Солнце – деформируемая система. При сложном движении центра масс солнечного шара относительно барицентра вещество Солнца должно проявлять себя как вязкая сжимаемая среда, подверженная приливным воздействиям. Следует ожидать некоторого деформирования формы Солнца с изменением плотности приповерхностных участков, а также генерации противоположно направленных вихревых движений. Интенсивность генерации вихрей зависит как от вектора ускорения центра масс Солнца относительно барицентра, так и от производной этого вектора по времени. Можно полагать, что именно такие вихри иницируют появление солнечных пятен».

Вихревые движения оказывают решающее влияние на жизнь Солнца, включая и его активность, и согласно данным работы [Потапов, Фоминский, Потапов, 2000].

Литература

Бери Б.Л. Периодичность геофизических процессов и ее влияние на развитие литосферы // Эволюция геологических процессов в истории Земли. М.: Наука, 1993. С. 53–62.

Берсенева И.И. Осевое вращение Земли как одна из причин геотектогенеза // Строение и развитие земной коры. М.: Наука, 1964. С. 194–200.

Борисов А.В., Мамаев И.С., Соколовский М.А. (ред.) Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. Москва-Ижевск: ИКИ, 2003. 704 с.

Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса // Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН – КГПУ, 2003. 151 с.

Викулин А.В. (ред.) Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. 297 с.

Викулин А.В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.

Викулин А.В., Мелекесцев И.В. Сейсмичность, вулканизм Тихого океана и вращение планеты // Българско геофизично списание. 1997. Т. XXIII. № 1. С. 62-68.

Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. 297 с.

Владимиров В.И., Романов А.Е. Дискликации в кристаллах. Л.: Наука, 1970. 224 с.

- Волков Ю.В.* Вихревые структуры рифтовых зон Земли // Система планета Земля. М. 2002. С. 257.
- Вопросы материаловедения № 1 (29). СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей». 2002. 480 с.
- Воронов П.С.* Роль ротационных сил Земли в истории становления структуры ее литосферы. // Эволюция геологических процессов в истории Земли. М.: Наука, 1993. С. 104–114.
- Гелл-Манн М.* Вопросы на будущее // Фундаментальная структура материи. М.: Мир, 1984. С. 266.
- Геодезические и геологические данные о японской островной дуге и ее обрамлении // Окраины континентов и островные дуги. М.: Мир, 1970. С. 216 – 236.
- Геологический словарь. Т. 1, 2. М.: Недра, 1978. 942 с.
- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С.* Введение в тектонофизику. Учебное пособие. М.: «КДУ», 2005. 496 с.
- Гуревич Л.Э., Чернин А.Д.* Происхождение галактик и звезд. М.: Наука, 1983. 192 с.
- Гущенко О.И.* Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 26–51.
- Дмитриевский А.Н., Володин, И.А., Шипов Г.И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Нака, 1993. 156 с.
- Долгачев В.А., Доможилова Л.М., Хлястов А.И.* Особенности движения центра масс Солнца относительно барицентра // Тр. Гос. астроном. Ин-та им. П.К. Штернберга. 1991. Т. 62. С. 111-115.
- Ефимов И.И., Куликов У.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.* Волны в пограничных областях. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.
- Земля. Введение в общую геологию. Т. 1, 2. М.: Мир, 1974. 847 с.
- Ильичев В.И., Шевалдин Ю.В.* О природе Западно-Тихоокеанской переходной зоны // Докл. АН СССР. 1986. Т.290. № 3. С. 570–573.
- Каттерфельд Г.Н.* Лик Земли. М.: ГИГЛ, 1962. 152 с.
- Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д.* Кольцевые структуры Земли: миф или реальность. М.: Наука, 1989. 190 с.
- Короновский В.Н.* Общая геология: учебник. М.: КДУ, 2006. 528 с.
- Кулаков А.П.* Морфоструктуры Востока Азии. М.: Наука, 1986. 176 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974. 752 с.
- Леви К.Г., Язев С.А., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Куснер Ю.С.* Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2002. 182 с.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Язев С.А., Баасанджан Б., Нинжбадгар С., Балжиян Б., Буддо В.Ю.* Современная геодинамика и гелиогеодинамика. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. 383 с.
- Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А.* Курс теоретической физики. Том II . М.: Наука, 1971. 936 с.
- Ли Сы-гуан.* Геология Китая. М.: Изд. иностр. литературы, 1952. 146 с.
- Ли Сы-гуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.-Л.: Госгеолтехиздат, 1958. 130 с.
- Личков Б.Л.* Движение материков и климаты прошлого Земли Л.: АН СССР, 1931. 133 с.
- Маслов Л.А.* Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса // Хабаровск-Владивосток: Дальнаука, 1996. 200 с.
- Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана. М.-СПб.: Межправительственная океанографическая комиссия, 2003. 192 с.

- Мелекесцев И.В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука, 1979. С. 125-155.
- Мелекесцев И.В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
- Мелекесцев И.В.* Взгляд геолога: вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. С. 20-23.
- Милановский Е.Е., Никишин А.Л.* Западно-Тихоокеанский рифтовый пояс // Бюлл. Моск. общества испытателей природы. Отд. Геол. 1988. Т. 63. Вып. 4. С. 3-15.
- Мясников Е.А.* Магматические и рудоконтролирующие морфоструктуры центрального типа. На примере Верхнего Приамурья. Владивосток: Дальнаука, 1999. 84 с.
- Назирова М.* Исследование закономерностей формирования крупномасштабных геолого-геоморфологических структур по космическим фотоизображениям // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1975. № 4. С. 67-75.
- Незлин М.В.* Солитоны Россби (экспериментальные исследования и лабораторная модель природных вихрей типа Большого Красного Пятна Юпитера) // УФН. 1986. 150. Вып. 1. С. 3-60.
- Орленок В.В.* Основы геофизики. Калининград: Калининградский гос. Университет, 2000. 448 с.
- Полетаев А.И.* Сдвигово-ротационная мотивация структурной эволюции Земли // Тектоника и геофизика литосферы. Материалы совещания. Т. II. М.: 2002. С. 104-107.
- Потапов Ю.С., Фоминский Л.П., Потапов С.Ю.* Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиции теории движения. Кишинев-Черкассы: Око-Плюс. 2000.
- Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М.: Прогресс. 1986. 432 с.
- Пуцаровский Ю.М.* Избранные труды. Этюды. Т. 1. Тектоника и геодинамика. Т. 2. Тектоника океанов. М.: Наука, 2005.
- Розен О.М., Федоровский В.С.* Граниты и гранитошнейсовые ареалы в коллизионных системах. 2000. http://geo.web.ru/~sgt/articles/1/page_3_4.htm
- Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский.* М.: ДомКнига, 2007. 528 с.
- Рыбин В.В.* Закономерности формирования мезоструктур в ходе развитой пластической деформации // Вопросы материаловедения №1 (29). СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей». 2002. С. 11-33.
- Сато Х.* Повторные геодезические съемки // Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 1984. С. 108-120.
- Сидоренков Н.С.* Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 384 с.
- Симаков К.В.* Введение в теорию геологического времени. Становление. Эволюция. Перспективы. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1999. 557 с.
- Слензак О.И.* Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова Думка, 1972. 181 с.
- Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Развитие Земли: Учебник. М.: МГУ, 2002. 560 с.
- Структурная геология и тектоника плит. Т. 1-3.* М.: Мир, 1990-1991. 1046 с.
- Тимашев С.Ф.* Роль химических факторов в эволюции природных систем. (Химия и экология) // Успехи химии. 1991. Т. 60. С. 2292-2331.
- Тимашев С.Ф.* Физикохимия глобальных изменений в биосфере // Журнал физической химии. 1993. Т. 67. С. 16-165.
- Тимашев С.Ф.* О базовых принципах «Нового диалога с Природой» // Проблемы геофизики XXI века. Книга первая. М.: Наука, 2003. С. 104-141.
- Шейдеггер А.* Основы геодинамики. М.: Недра, 1987. 384 с.

- Шипов Г.И.* Теория физического вакуума. М.: Изд-во ООО «Кириллица-1», 2002. 128 с.
- Шолто В.Н.* Структура Земли: упорядоченность или беспорядок? М.: Наука, 1986. 160 с.
- Шолто В.Н.* Феномен упорядоченности структуры Земли и проблемы самоорганизации // Система планета Земля. М. 2001. С. 6–9.
- Уфимцев Г.Ф.* Черты порядка в глобальном рельефе Земли. Тихоокеанская геология. 1988. № 4. С. 105–113.
- Уфимцев Г.Ф.* Мегарельеф Земли: общая симметрия, Западно-Тихоокеанская диссимметрия и планетарные процессы // Закономерности строения и динамики планет земной группы. Хабаровск. 1992. С.41–42.
- Фурмарье П.* Проблемы дрейфа континентов. М.: Мир, 1971. 256 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. Учебник. М.: МГУ, 1995. 480 с.
- Хаин В.Е., Ломизе М.Г.* Геотектоника с основами геодинамики. Учебник. М.: «КДУ», 2005. 560 с.
- Эстерле О.В.* Новое представление о пространстве и времени в рамках целостной парадигмы // Система планета Земля. М. 2003. С. 185–192.
- Fujiwhara S., Tsujimura T., Kusamitsu S.* On the Earth-vortex, Echelon Faults and allied Phenomena // Gerlands Beiträge zur Geophysik, zweite Supplementband. 1933. P. 303-360.
- Haveman H.* Neues Erklärungsmoment zum Mechanismus der Kontinentsverschiebungen // Die Naturwissenschaften. 1929. B.17. H. 38. S. 748.
- Hochstetter.* Unser Wissen von der Erde // Geologie Th. 11. Kirchhoff. 1886.
- Hughes T.* Coriolis perturbation of mantle convection related to a two phase convection model // Tectonophysics. 1973. V. 18. P. 215–230.
- Kanasewich E.R., Havskov J., Evans M.E.* Plate tectonics in the Phanerozoic // Canadian J. of the Earth Sciences. 1978. V. 15. N 6. P. 919–955.
- Lee J.S.* Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // Geol. Mag. LXVI. 1928. P. 422-430.
- Madelung E.* Quantentheorie in hydrodynamischer Form. Z. für Phys. 40. 3. 4. 1926. 327 p.
- Jackson E.D., Shaw H.R., Bargar K.E.* Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain // Earth Planet Sci.Lett. 1975. V. 26. P. 145–155.
- Pan Ch.* Polar instability, plate motion, and geodynamics of the mantle // J. Phys. Earth. 1985. V. 33. N 5. P. 411–434.
- Takeuchi A.* Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan // Memoir of the Geological Society of China. 1986. N 7. P. 233–248.
- Whitney M.I.* Aerodynamic and vorticity erosion of Mars: Part II. Vortex features, related systems, and some possible global patterns of erosion // Geol. Soc. America Bull. Part I. V. 90. 1979. P. 1128-1143.

11. ЭЛЕМЕНТЫ ВИХРЕВОЙ ГЕОДИНАМИКИ

О терминологии

Термин «геодинамика» не имеет общепризнанного толкования [Шейдеггер, 1987]. В нашей стране на рубеже 80-х годов появились и быстро прижились понятия «геодинамический анализ» и «геодинамические реконструкции», подразумевающие интерпретацию строения и истории развития континентальных территорий с позиций одной конкретной концепции – тектоники литосферных плит. На практике это вылилось в массовое использование метода аналогий. При этом, по сути, постулируется механизм ячеистой мантийной конвекции, восходящие ветви которой порождают срединно-океанические хребты, а нисходящие (субдуцирующие) – сложные островодужные ансамбли. Суть подобной методологии мог бы отражать, например, термин «химическая геодинамика» [Жуланова, 2003].

Если смотреть шире, включение в теоретический фундамент современной геологии термодинамики вырисовывает первоочередную методологическую задачу, особенно если вести речь о синтезе геофизики, тектоники и петрологии (геохимии), в целостную науку о движущих силах эволюции планеты – «глобальную геодинамику» [Хаин, 1995]. Акцентировать внимание на этом, по мнению автора работы [Жуланова, 2003], «заставляет не столько логика внутреннего развития самой геологии..., сколько общие достижения термодинамики необратимых процессов и родственного ей нового междисциплинарного направления – синергетики – в познании универсальных закономерностей и возникновения развития (самоорганизации) больших неравновесных (диссипативных) систем любой природы. Философия уже назвала синергетику парадигмой современного естествознания. Ведущим фактором самоорганизации она называет мощные энергопотоки, действующие на протяжении длительного времени и с определенной периодичностью порождающие скачкообразные эффекты структурирования систем за счет согласованного действия всех их элементов. Очевидная специфичность этого направления позволила предложить для него термин «геосинергетика»». Синергетический подход в нелинейной геологии и проблема научного прогнозирования подробно обсуждается в фундаментальной работе Н.В. Короновского [2006, с. 493-513].

Нет сомнений, что за синергетикой большое будущее. Однако не будем увлекаться «философской» стороной дела, за которой часто стоят полукачественные или в лучшем случае качественные, не подкрепленные достаточно надежными количественными оценками, рассуждения. Примером тому – последняя геологическая парадигма – глобальная тектоника плит, которая «на пальцах» действительно объясняет все или почти все, но при количественных оценках сталкивается с трудностями принципиального характера (см. далее в этой главе раздел «Новые данные и нестыковки»).

Под Геодинамикой, вслед за [Геологический..., 1978, с. 143], будем понимать раздел наук о Земле достаточно общего плана: «о процессах, протекающих в системе «Земля», и о силовых (энергетических) полях, проявляющихся в этих процессах». Термин «геодинамика» в такой формулировке близок определению В.Е. Хаина [1995] и, несомненно, несет синергетические черты. Построенные в последующем количественные модели позволят исследователям в дальнейшем уточнять и конкретизировать как саму дисциплину «Геодинамика», так и, возможно, ее разделы.

Геология и время

Прежде чем говорить о движениях в геологии, т.е., прежде чем начинать строить геодинамические модели, необходимо остановиться на сути концепции времени в геологии, которая, как известно [Симаков, 1999], имеет свою специфику.

Геология начинается в поле с наблюдения материала, образующего Землю и определяющего его геометрическое и «структурное» расположение. Затем следует изучение временных взаимосвязей, которые могут быть логически выведены из этих наблюдений. Такие взаимосвязи, устанавливающие последовательность событий во времени и дающие схематическую модель процесса, затем объясняются на основе экспериментально подтвержденных физических законов.

Большая часть Земли скрыта от взгляда. Следовательно, значительная часть геологии является плодом воображения.

Имеющиеся в нашем распоряжении геологические данные свидетельствуют, что многие геологические процессы невозможно было бы ни наблюдать, ни понять, если бы они не были очень длительными. «Медленность» же многих земных процессов «компенсируется» большей протяженностью геологического времени их протекания. С точки зрения обычных человеческих стандартов Земля по своим размерам и возрасту – объект необычный. Действительно, состояние вещества внутри Земли характеризуется большими диапазонами P (давление) – T (температура) – ρ (плотность) условий, а также химической и физической по пространству и во времени «неоднородностями» протекания геологических процессов. Все это вынуждает геологов при объяснении геологических процессов прибегать и к многочисленным предположениям и к существенным физическим и химическим упрощениям реальных геологических условий.

Время в геологии играет важнейшую роль. Другие естественные науки, например, химия или физика, изучают мир, главным образом, в современном его состоянии. В отличие от них геология имеет дело преимущественно с прошлым. Наши познания о геологических процессах обычно основываются на наблюдениях последовательности различных событий во времени, а, значит, почти полностью определяются хронологией. В большинстве случаев геолог, пытаясь реконструировать некоторые события, осуществившиеся в прошлом, задается вопросами: «Что случилось вначале? Что произошло потом? Были ли эти события одновременными?». Огромная продолжительность геологического времени помогает понять процессы, которые были бы совершенно необъяснимыми в рамках очень кратких по продолжительности отрезков времени лабораторных экспериментов или даже с точки зрения продолжительности человеческой жизни. Другими словами, геологи вынуждены допускать, что все физические законы проявлялись в прошлом так же, как они проявляются и в настоящее время, хотя заранее не ясно и это ниоткуда не следует, оставались ли численные значения констант, входящих в эти законы, неизменными в течение всех геологических эонов или эр.

В соответствии с современными представлениями термодинамики течение геологического времени сопровождается и, фактически, определяется необратимым рассеянием энергии или увеличением энтропии. Земля никогда не будет такой же, как в настоящий момент, как она никогда не была точно такой же и в прошлом. Земля совершенно неизбежно должна изменяться и эволюционировать. Это обстоятельство кардинальным образом ставит геологию в разряд исторических наук. Геология изучает преимущественно специфические случаи и уникальные проявления эволюции, отделенные друг от друга разными отрезками времени. Об их продолжительности мы можем судить только на основании современных представлений. Никакими геологическими данными о том, как в действительности протекало время в ту или иную геологическую эру или эон мы не располагаем. Эти обстоятельства в корне отличают геологию от физики и химии, которые изучают воспроизводимые явления в системах, существующих в настоящее время.

Геологам приходится иметь дело с весьма разнородными объектами: нет двух океанов, нет пары континентов или даже вулканов и очагов землетрясений, вполне

похожих один на другой. Эта разнородность объектов обусловлена уникальным характером и невоспроизводимостью геологических событий. Отсюда и принципиальная неоднозначность интерпретации всех геологических теорий.

Хронология фанерозоя [Земля, 1974, с. 25-27, 266-267]

Кристаллический фундамент континентальной коры на громадных площадях перекрыт чехлом осадочных пород. Во многих случаях можно изучить и провести измерения последовательности осадочных отложений, мощность которых может достигать сотен и даже нескольких тысяч метров. Общеизвестно, что в любой вертикальной последовательности осадочных пород пласты, залегающие выше по разрезу, несомненно, являются более молодыми. Этот принцип, известный под названием *закона напластования Стено*, явился тем основополагающим камнем, на котором позднее выросло здание науки стратиграфии – науки о напластованиях пород и той информации, которая в них записана происходящими событиями. Стратиграфия в свою очередь лежит в основе геологической хронологии.

Каждый раздел геологического времени устанавливается на основе местной стратиграфической последовательности. При этом корреляция событий, соответствующих этому времени в других районах Земли, проводится геологами на основе изучения ископаемых остатков.

Особый интерес радиометрического определения абсолютного возраста событий, совершавшихся в кембрии и позднее, заключается в возможности взаимного совмещения классической стратиграфии с радиологической хронологией. Каждая из этих двух систем датирования является достаточно строгой проверкой правильности другой системы. В результате многолетних исследований выяснилась хорошая сходимость радиометрических и стратиграфических данных. Серьезные противоречия между ними единичны.

Таким образом, к настоящему времени можно сформулировать следующие фундаментальные выводы. А именно, продолжительность фанерозойского эона составляет около 600 млн лет, т.е. несколько меньше одной седьмой установленной истории земной коры (около 4200 млн лет). При этом продолжительности всех основных периодов фанерозоя оказались примерно одинаковыми, так как четыре фанеройские шкалы времени, откалиброванные разными авторами по радиометрическим определениям абсолютного возраста, достаточно хорошо совпали между собой. Действительно, продолжительности следующих друг за другом фанерозойских периодов оказались примерно равными (в млн лет): Третичный (*T*) – 68, Мел (*C*) – 66, Юра (*J*) – 54-59, Триас (*T*) – 30-35, Пермь (*P*) – 55, Карбон (*C*) – 65, Девон (*D*) – 50, Силур (*S*) – 35-45, Ордовик (*O*) – 60-70 и Кембрий (*C*) – 70, в среднем, $T = 60 \pm 10$ млн лет, $\sigma = 10$ млн лет – величина среднеквадратичного разброса значений. Как видим, разброс средних продолжительностей σ невелик и, в среднем, не превышает 15-20%, что в первом приближении позволяет считать продолжительности всех основных периодов в фанерозое равными друг другу.

Резюме

Примерное равенство друг другу продолжительностей основных фанерозойских периодов, определенных с помощью абсолютных радиоактивных методов, во времени «привязанных» к современному периоду, позволяет считать их проявлением некоего общего колебательного геологического процесса, протекавшего на Земле в течение последних 600 млн лет. Этот вывод подтверждается данными работы [Милановский, 1995], в которой показано, что для фанерозоя характерно наличие «многоуровневой иерархической системы циклов разных рангов и длительностей». Все эти данные, в

принципе, позволяют для фанерозойской эры строить Геодинамику, время в которой является категорией, близкой к категории времени, используемой в современной физике.

Еще раз о вихрях в геологии

Приведенные в предыдущем разделе «Ротации во Вселенной» данные убедительно показывают большую распространенность вихревых движений во Вселенной на различных пространственных и временных масштабных уровнях. В работе [Викулин, Мелекесцев, 2007] показана важнейшая роль вихревых движений и для процесса возникновения жизни, ее генезиса, формирования *Homo Sapiens* и в последующем социума. Ниже кратко остановимся на узловых моментах, определяющих становление основополагающих представлений о вихревых движениях в геологических и геофизических процессах.

Ли Сы-гуан [Ли Сы-гуан, 1958; Lee, 1928] при изучении *геологии* Китая вводит термин «*вихревые структуры*». Он же на моделях демонстрирует возможность их образования. Это стало возможным благодаря важным «технологическим» изменениям, имевшим место в начале 20 в. в геологии: создание достаточно точных геологических карт, проведение детальных геологических исследований и выполнение высокоточных геодезических инструментальных наблюдений на больших базах.

Геодезические инструментальные измерения [Рикитаке, 1970; Сато, 1984], проведенные в конце 19 – первой половине XX вв. на японских островах (рис. 11.1), широкий комплекс геофизических исследований, выполненных в конце XX – начале XXI вв. на островах Пасха и Хуан-Фернандес в Тихом океане [Международный..., 2003], подтвердили существование вихревых структур в земной коре и литосфере [Мелекесцев, 1979; Слензак, 1971] и навели на мысль о преобладании вихревых (вращательных) движений тектонических плит над их поступательным движением [Викулин, Тверитинова, 2004].



Рис. 11.1. Векторное изображение смещений триангуляционных пунктов I класса за период приблизительно 60 лет [Рикитаке, 1970].

Теоретические *физические* исследования трещины Гриффитса и моделирование *тектонических* разломов в лабораторных условиях в начале 50-х гг. прошлого века

приводят к выводу о *вращении* образующихся в материале трещин [Магницкий, 1965; Yoffe, 1951]. *Тектонофизические* исследования 1960-1970 гг. устанавливают *пространственную волнистость крупных тектонических разрывов* и формулируют вывод, что представления об их прямолинейности часто не соответствуют наблюдаемым фактам [Гзовский, 1975].

В конце 50 – 60 гг. XX в. устанавливается *блоковый* характер *геологической* среды, делается вывод о том, что каждый блок обладает *самостоятельной движущей силой, связанной с вращением Земли* [Пейве, 1961].

1965 г. Д. Кюхеманн [Kuchemann, 1965] приходит к важному, в том числе и для геодинамики, выводу, согласно которому «вихри – это мышцы и жилы гидродинамики» [Сэффмэн, 2000, с. 7].

В начале 1970-х гг. обращается внимание на важность *механических* задач с *собственным моментом количества движения макроскопических по размерам объемов вещества* [Седов, 1973].

В 1960 – 1980 гг. разрабатываются *механические блоковые* модели геофизической среды [Садовский, Писаренко, 1991], включая и модели с поворачивающимися блоками [Николаевский, 1996], в рамках которых находит свое теоретическое объяснение *волновая природа тектонического процесса* [Викулин, 2003].

В 2004 и 2007 гг. выходят в свет первые специализированные сборники научных работ [Вихри, 2004; Ротационные, 2007], посвященные развитию представлений о вихревых движениях в геологии.

Моментная природа геодинамического процесса

Становление ротационных вихревых представлений в тектонике подробно было описано на примере геофизической блоковой (в смысле А.В. Пейве – Л.И. Седова - М.А. Садовского) среды. Основным результатом такого рассмотрения явилось доказательство возможности аналитического описания сейсмотектонического процесса в пределах переходных зон окраины Тихого океана в рамках волновой модели с характерной скоростью, определяемой угловой скоростью вращения Земли вокруг своей оси [Викулин, 1990; 2003; 2008а, б, с. 114-168; Викулин, Иванчин, 1998; Vikulin, Tveritina, 2008]. Суть сводится к следующим узловым положениям, излагаемым в этом и следующем разделах.

Взаимодействие землетрясений. Анализ показал, что каждое из распределений северо-западно-тихоокеанских землетрясений XX века – пространственное (*sp*), временное (*t*), магнитудное (энергетическое, *m*) - имеет особенности в окрестностях двух точек:

$$M_{1:sp,t,m} = 7,7 \pm 0,2, \quad M_{2:sp,t,m} = 5,3 \pm 0,1, \quad (11.1)$$

что физически определяет два типа взаимодействия между их очагами. Первый тип взаимодействия соответствует «отталкиванию» очагов сильнейших ($M \geq M_{1,sp}$) землетрясений (сейсмических брешей первого типа) друг от друга, что выражается в их непересечении в течение сейсмического цикла [Федотов, 1965, 1968], продолжительность которого для северо-западной окраины Тихого океана составляет:

$$T_{sp} = 190 \pm 40 \text{ лет}. \quad (11.2)$$

Второй тип взаимодействия, наоборот, соответствует взаимному «притяжению» сейсмических брешей второго типа (сейсмических дыр, зон молчания, зон затишья и др.) друг к другу, их «втягиванию» внутрь очага сильнейшего землетрясения [Викулин, Журавлев, 1987].

При этом распределение значений доверительной вероятности на фазовой плоскости (с осями магнитуда - временной интервал между совокупностями северо-западно-тихоокеанских землетрясений XX века) образуют замкнутые линии, соответствующие характерному периоду сейсмического процесса продолжительностью:

$$T_t = 230 \pm 60 \text{ лет.} \quad (11.3)$$

Близость особых «пространственных» и «временных» значений магнитуд (11.1) $M_{1,sp} \approx M_{1,t}$ и продолжительностей характерных «пространственных» (11.2) и «временных» (11.3) периодов $T_{sp} \approx T_t$ позволяет предположить существование пространственно-временных закономерностей в распределении очагов землетрясений их миграции со скоростью, равной коэффициенту пропорциональности между координатами следующих друг за другом эпицентров землетрясений определенной магнитуды с одной стороны и временами в их очагах – с другой.

Все данные о скоростях миграции для тихоокеанской окраины собраны в [Викулин, 2001, 2003; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007; Осипова, 2008] и представлены на рис. 11.2.

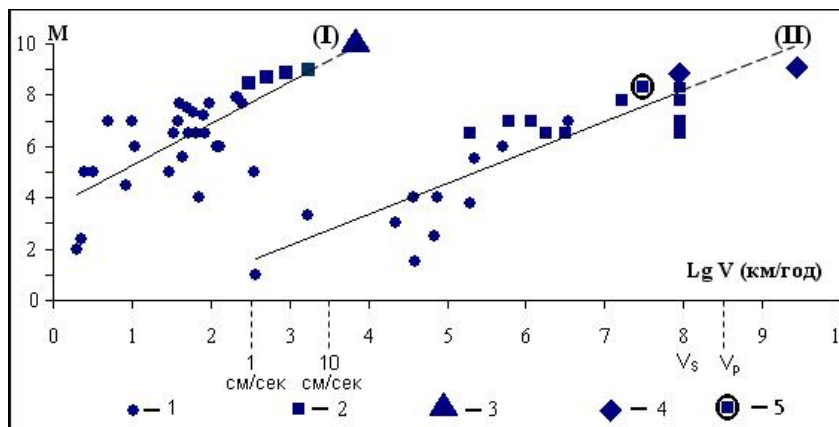


Рис. 11.2. Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений и определенные по ним зависимости $M(LgV)$. 1 – данные, полученные ранее [Викулин, 2001, 2003; Викулин, Иванчин, 1998]; 2-5 – более поздние данные, полученные в [Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007; Осипова, 2008], 3 – скорость миграции сильнейших землетрясений-дуплетов с $M_W = 8,1-8,7$ в 1897-1901 гг. вдоль окраины Тихого океана; 4 – скорости миграции толчков в дуплетах 4.11.1952, Камчатка, $M_W = 9,0$ и 13.11.1963 Курилы, $M_W = 8,7$ [Викулин, 2003; Викулин, Чернобай, 1986а, б]; 5 – скорость миграции, соответствующая максимальному значению магнитуды форшока $M = 8,3$, которым за 40 с предвещался основной толчок Чилийского землетрясения 1960, $M = 8,3$, $M_W = 9,5$ [Duda, 1963]; $V_p \approx 8 \text{ км/сек}$ и $V_s \approx 4 \text{ км/сек}$ – продольная и поперечная сейсмические скорости соответственно. (I) и (II) – зависимости магнитуды от скорости «глобальной миграции» вдоль окраины Тихого океана $M_1(LgV_1)$ и скорости «локальной» миграции форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений $M_{21}(LgV_2)$ соответственно. Рисунок построен Н.А. Осиповой.

Из данных, представленных на рис. 11.2, видно, что все данные по скоростям миграции землетрясений разбиваются на два поля точек. Одно из них связывает магнитуды землетрясений M_1 с их скоростями миграции V_1 вдоль всей окраины Тихого океана – глобальная миграция:

$$M_1 \approx \alpha_1 LgV_1 = 2LgV_1, \quad (11.4)$$

при максимальных значениях скоростей $V_{1,\max}$ в области предельных магнитуд:

$$V_{1,\max} = 1-10 \text{ см/с}, \quad M_{1,\max} \geq 8. \quad (11.5)$$

Второе – связывает магнитуды афтершоков и форшоков с их скоростями миграции в пределах очагов сильных и сильнейших землетрясений – локальная миграция:

$$M_2 \approx \alpha_2 LgV_2 = LgV_2, \quad (11.6)$$

при максимальных значениях скоростей $V_{2,\max}$ в области предельных значений магнитуд форшоков и афтершоков и сильнейших толчков-дуплетов:

$$V_{2,\max} = V_S \approx 4 \text{ км/с}, \quad M_{2,\max} \approx 8,0-8,5. \quad (11.7)$$

При соотношении между магнитудой землетрясения M и размером его очага L $\lg L = 0,4M - 1$ [Ризниченко, 1985] и сброшенной в его очаге упругой энергии E $M \approx 1,8 \lg E$ (соотношение Гутенберга-Рихтера) равенства (11.4) и (11.6) могут быть переписаны в виде:

$$E_1 \approx V_1^{3,6} \approx V_1^4, \quad (11.4.1)$$

$$\lg L_1 \approx 0,8 \cdot \lg V_1, \quad (11.4.2)$$

$$E_2 \approx V_2^{1,8} \approx V_2^2, \quad (11.6.1)$$

$$\lg L_2 \approx 0,4 \cdot \lg V_2. \quad (11.6.2)$$

Как видим, данные по миграции подтверждают сделанный выше на основании совместного статистического анализа пространственного, временного и энергетического распределений вывод о существовании двух типов взаимодействия между очагами тихоокеанских землетрясений – регионального, в пределах всей зоны, и локального, в пределах очага землетрясения – и дополняют его: механизмы существенно, в два раза, различаются значениями наклонов характеризующих их зависимостей:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 2. \quad (11.8)$$

Эффект Доплера. Близость «пространственного» (11.2) и «временного» (11.3) характерных квазипериодических интервалов времени позволяет предположить, что миграция землетрясений является волновым процессом. Тогда вследствие вращения Земли миграция форшоков и афтершоков в очагах широтных и долготных (вытянутых вдоль широты и долготы соответственно) землетрясений должна происходить с разными скоростями. А именно, вследствие связанного с вращением Земли эффекта Доплера значение «широтной» скорости волновой миграции форшоков и афтершоков должно «расщепляться» на два, в то время как значение «долготной» такой же скорости - нет. При этом вследствие увеличения скорости миграции с ростом магнитуд афтершоков и

форшоков (рис. 11.2, II) эффект расщепления должен быть все более значимым. При $M = 7$ и соответствующей такой магнитуде скорости миграции $V_{M=7} \approx 1$ км/с теоретическая (th) оценка величины ее расщепления на широте, скажем, алеутской островной дуги $\varphi = 50^\circ \div 60^\circ$ с.ш. составляет:

$$\delta_{th} = \frac{2V_{\Omega}}{V_{M=7}} = \frac{2R_{Earth}\Omega}{V_{M=7}} \sin(90^\circ - \varphi) = 0,54 \pm 0,08, \quad (11.9)$$

где R_{Earth} – радиус Земли, Ω – ее угловая скорость вращения вокруг своей оси.

Исследовался афтершоковый процесс пяти наиболее сильных ($M_w \approx 9$) в последнее столетие землетрясений планеты, очаги которых были вытянуты в «широтном» (latitude) и «долготном» (longitude) направлениях и имели протяженность около 1000 км и более [Викулин, 2006]. Такие землетрясения будем называть большими. Очаги трех землетрясений имели «широтное» (la) простирание и располагались вдоль Алеутских островов: 09.03.1957, $M = 8,8$, $N_{l,2} = 421, 9$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 18^\circ$ (179° в.д. – 163° з.д.); 28.03.1964, $M = 9,0$, $N_{l,2} = 213, (8)$, $\varphi = 58^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 15^\circ$ (142° – 157° з.д.) и 04.02.1965, $M = 8,7$, $N_{l,2} = 284, 3$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 10^\circ$ (170° в.д. – 180°). Двух «долготных» (lo)- вдоль Тихоокеанского побережья Южной Америки: Чилийское землетрясение 20.05.1960, $M = 9,5$, $N_{l,2} = 63, 5$, $\lambda = 70^\circ \pm 5^\circ$ з.д., $\Delta\varphi = 40^\circ$ (10° – 50° ю.ш.) и в Индийском океане: землетрясение Суматра 26.12.2004, $M = 9,0$, $N_{l,2} = 675, 4$, $\lambda = 98^\circ \pm 5^\circ$ в.д., $\Delta\varphi = 22^\circ$ (7° ю.ш. – 15° с.ш.). Здесь $N_{l,2}$ – числа афтершоков с $M \geq 5$ и с $M \geq 7,0$ ($M \geq 6,5$) соответственно. После этих землетрясений интенсивные собственные колебания планеты регистрировались в течение месяца.

Данные о временах и координатах эпицентров главных толчков и их афтершоков использовались из следующих источников. Для землетрясения 1957 г. – из каталога NEIC [Earthquake...]. Для землетрясений 1960 – 2004 гг. – из каталога ISC [International...]. Данные об афтершоках с магнитудами $5 \leq M < 6$ землетрясений 1964 и 1965 гг. дополнялись данными из каталога [Викулин, 1984].

Развитие форшокового и афтершокового процессов в очагах широтного Аляскинского 1964 г. и долготного Чилийского 1960 г. землетрясений представлено на рис. 11.3, 11.4 и 11.5 соответственно.

Из данных, приведенных на рис. 11.3 – 11.5, видно, что распределения сильных форшоков и афтершоков в очагах сильнейших землетрясений в пространстве и во времени не случайны. Такие распределения, рассматриваемые совместно с эпицентрами главных толчков, с одной стороны, определяют формирование очага на стадии форшоков и его последующее развитие на стадии афтершоков. С другой – они характеризуют сейсмичность брешей, являющихся составными частями («элементарными» кирпичиками) сейсмического процесса в пределах всего сейсмического пояса. Видно, что характерной особенностью таких распределений является колебательный процесс с амплитудой, близкой протяженностям очагов сильнейших землетрясений – сейсмических брешей или элементарных сейсмофокальных блоков.

Достаточно сильные форшоки не отмечены в очагах Суматринского 2004 землетрясения и землетрясения 1965 на Алеутских островах.

Методом наименьших квадратов для совокупностей афтершоков $M \geq 5$; $M \geq 5,5$; ...; $M \geq 7,0$ в каждом из исследуемых очагов землетрясений определялись зависимости частот ν (обратных временных интервалов между последовательными во времени афтершоками) и скоростей V от времени t [Викулин, Викулина, 2007]:

$$\text{Lg } \nu [\text{час}^{-1}] = a \cdot \log t [\text{час}] + b, \quad (11.10)$$

$$\text{Lg } V [\text{км/час}] = A \cdot \log t [\text{час}] + B. \quad (11.11)$$

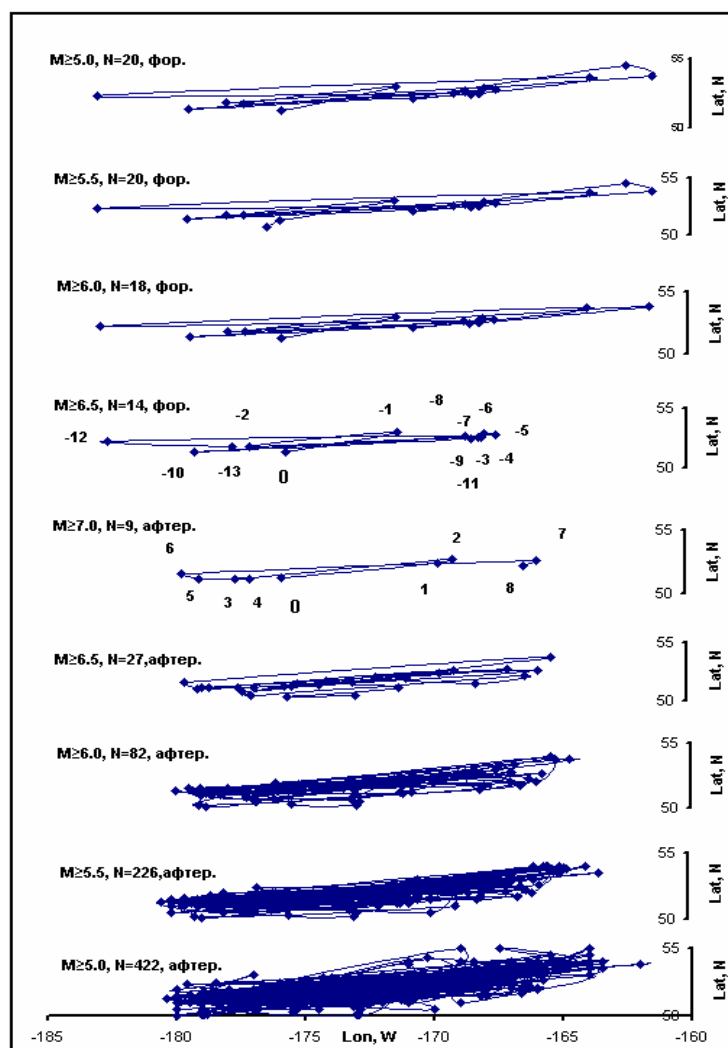


Рис. 11.3. Развитие афтершокового (афтер) и форшокового (фор) процессов в очаге Аляскинского 1964 и Чилийского 1960 землетрясений на различных магнитудных уровнях. Цифрами обозначены последовательные во времени афтершоки (положительные числа) и форшоки (отрицательные числа). 0 – положение главного толчка [Викулин, Викулина, 2007].

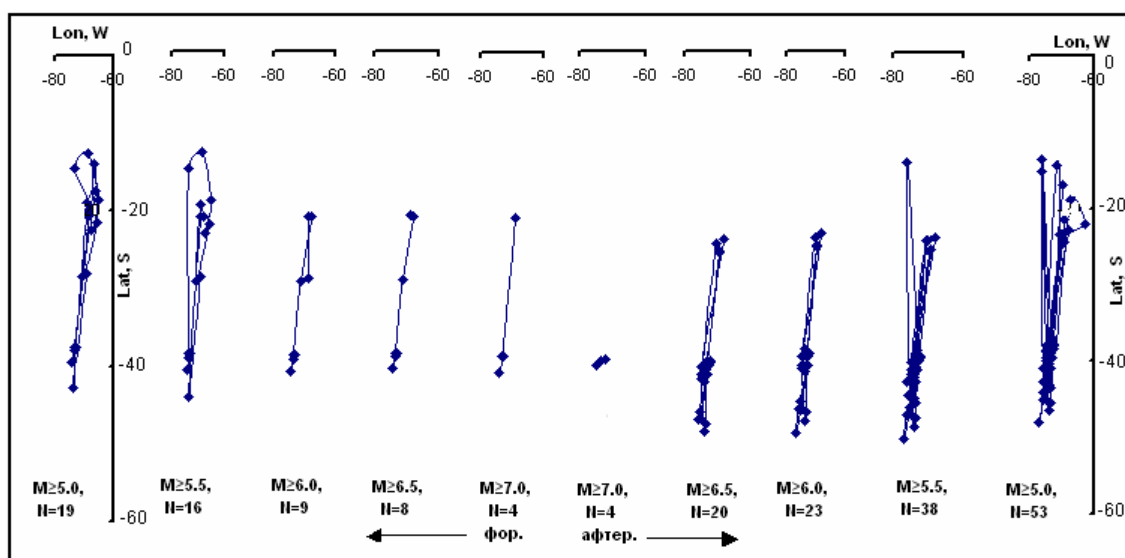


Рис. 11.4. Условные обозначения смотри к рис. 11.3.

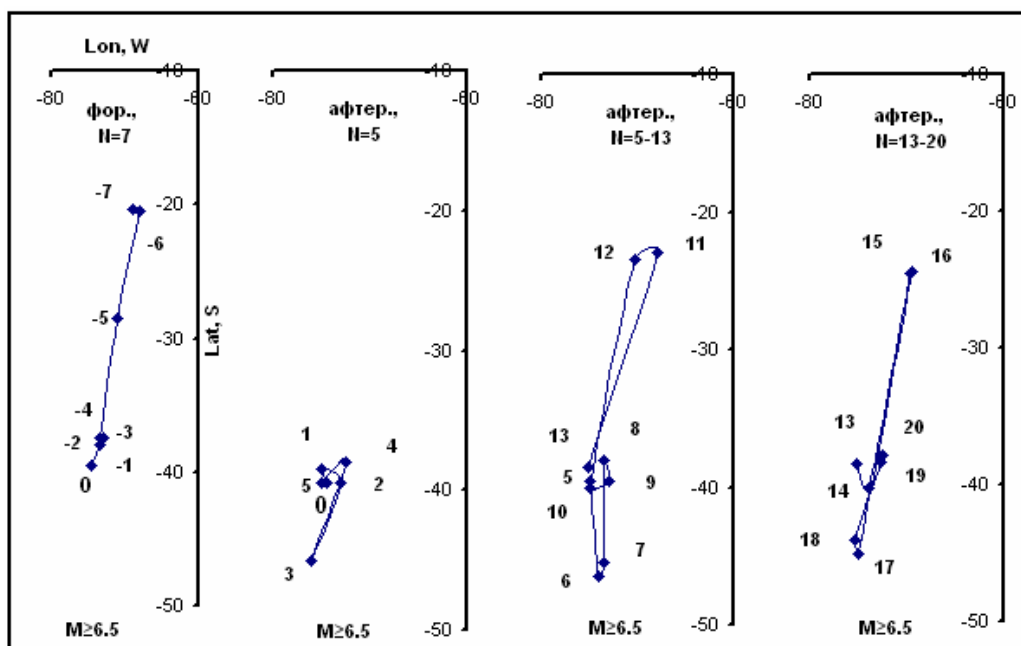


Рис. 11.5. Условные обозначения смотри к рис. 11.3.

Примеры зависимостей (11.10) и (11.11), построенных для афтершоков в очагах Алеутского 1957, Чилийского 1960, Аляскинского 1964 и Суматринского 2004 землетрясений, приведены на рис. 11.6.

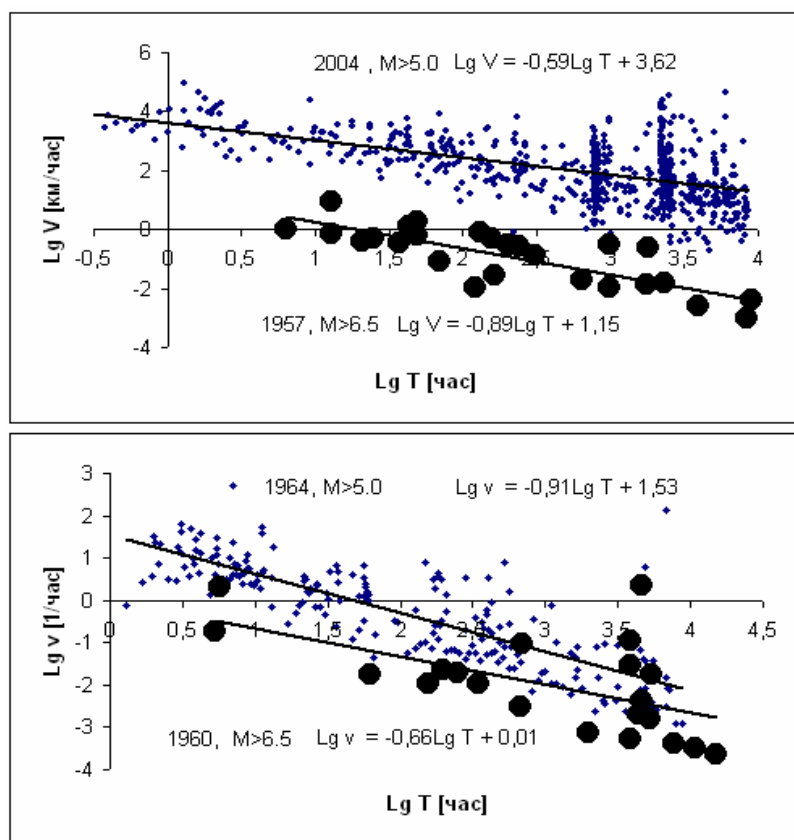


Рис. 11.6. Примеры зависимостей для частот ν (повторяемостей) и скоростей V афтершоков от времени, полученные на разных магнитудных уровнях $M \geq 5$ и $M \geq 6,5$ для Алеутского 1957, Чилийского 1960, Аляскинского 1964 и Суматринского 2004 землетрясений [Викулин, Викулина, 2007].

Значения коэффициентов A , a и разностей $B-b$ для частот и скоростей афтершоков во всех анализируемых очагах сильнейших землетрясений представлены табл. 11.1.

Таблица 11.1. Параметры (a , A ; $B - b$) корреляционных зависимостей, определяющих частоты и скорости миграции (осцилляций) афтершоков в пределах «долготных» и «широтных» очагов землетрясений планеты с $M_W \approx 9$ в 1957 – 2004 гг. [Викулин, Викулина, 2007].

Магнит- уда, M_S , афтер.	«Долготные» (lot , lo) очаги землетрясений						
	Чили, 1960, $M_W=9,5$		Суматра, 2004, $M_W=9,0$		Средние $a^{lo} / A^{lo} / (B - b)^{lo}$		
	N	$a^{lo} / A^{lo} / (B - b)^{lo}$	N	$a^{lo} / A^{lo} / (B - b)^{lo}$			
$\geq 5,0$	63	-0,62 / -0,34 / 1,82	674	-0,49 / -0,61 / 2,36	-0.56±0,06 / -0.48± 0,13 / 2.09±0,27		
$\geq 5,5$	44	-0,71 / -0,44 / 1,88	195	-0,69 / -0,82 / 2,45	-0.70±0,01 / -0.63±0,19 / 2.17±0,28		
$\geq 6,0$	28	-0,62 / -0,38 / 1,88	49	-0,77 / -0,78 / 2,21	-0.70±0,07 / -0.58±0,20 / 2.05±0,17		
$\geq 6,5$	21	-0,66 / -0,46 / 1,97	12	-0,66 / -0,77 / 2,57	-0.66±0,00 / -0.62±0,15 / 2.27±0,30		
$\geq 7,0$	4	-0,68 / (0,28) / (0,64)	4	-0,95 / -0,89/ 2,56	-0.81±0,06 / -0.89 / 2.56		
Средние a/A/B-b		-0,66±0,03 / -0,41±0,04 / 1,89±0,04		-0,71±0,12 / -0,77±0,07 / 2,43±0,08	-0,69±0,08 / -0,64±0,10 / 2,33±0,19		
Магнит- уда, M_S , афтер- шоков	«Широтные» (lat , la)очаги землетрясений Алеутских островов						
	Андреяновские, 1957, $M_W=8,8$		Аляска, 1964, $M_W=9,0$		Амчитка, 1965, $M_W=8,7$		Средние $a^{la} / A^{la} /$ $(B - b)^{la}$
	N	$a^{la} / A^{la} /$ $(B - b)^{la}$	N	$a^{la} / A^{la} /$ $(B - b)^{la}$	N	$a^{la} / A^{la} /$ $(B - b)^{la}$	
$\geq 5,0$	422	-0,69 / -0,67 / 2,2	12	-0,91 / -0,91 / 2,01	283	-0,85 / -0,84 / 2,00	-0,82±0,08 / -0,88±0,08 / 2,07±0,09
$\geq 5,5$	226	-0,84 / -0,80 / 2,12	75	-0,94 / -0,87 / 1,94	83	-0,88 / -0,87 / 2,02	-0,89±0,04 / -0,85±0,03 / 2,03±0,06
$\geq 6,0$	81	-0,85 / -0,82 / 2,10	23	-0,92 / -1,02 / 2,13	20	-0,93 / -0,91 / 2,19	-0,90±0,03 / -0,92±0,04 / 2,14±0,03
$\geq 6,5$	26	-1,01 / -0,88 / 2,12	8	-0,92 / -1,02 / 2,48	7	-1,01 / -1,23 / 2,48	-0,98±0,04 / -1,04±0,14 / 2,36±0,16
$\geq 7,0$	8	-0,82 / -1,10 / 2,66	-	- - -	3	-1,00 / -0,92 / 1,81	-0,91±0,09 / -1,01±0,09 / 2,24±0,43
Средние a/A/B-b		-0,84±0,07 / -0,86±0,11 / 2.24±0.19		-0,92±0,01 / -0,96±0,07 / 2.14±0.17		-0,93±0,07 / -0,89±0,03 / 2.10±0.19	-0,90±0,06 / -0,93±0,08 / 2.19±0.11

Примечание: значения в скобках не учитывались ввиду их больших отличий от средних значений, превышающих утроенное среднеквадратичное отклонение.

Из данных, представленных в табл. 11.1, видно, что справедливы следующие равенства:

$$A^{lo} \approx a^{lo} \approx 0,62 \pm 0,09, A^{la} \approx a^{la} \approx 0,92 \pm 0,07, (B-b)^{lo} \approx (B-b)^{la} \approx 2,26 \pm 0,15. \quad (11.12)$$

Из соотношений (11.12) видно, что имеют место следующие равенства коэффициентов: «наклонов» (первые два равенства в (11.12)) и «свободных членов»

(третье равенство в (11.12)). Это для широтно и долготно ориентированных очагов больших землетрясений определяет постоянную:

$$\left(\frac{V}{v}\right)_{lo,la} = const = 10^{B-b} = L_{lo} = L_{la} = 180(130 \div 260) \text{ км.} \quad (11.13)$$

«Элементарный» сейсмофокальный блок. В работе [Викулин, Сеньюков, 1998] в результате анализа распределения афтершоков с $M \geq 5$ для очага Кроноцкого, Камчатка 5.12.1997, $M = 7,8$ землетрясения аналогичным образом была получена оценка такой же величины, которая оказалась равной:

$$\left(\frac{V}{v}\right)_{45^0} = L_{45^0} = 150 \pm 50 \text{ км,} \quad (11.14)$$

которая, как видим, оказалась близкой L_{lo} и L_{la} . Очаг Кроноцкого землетрясения расположен в северо-восточной части Курило-Камчатской дуги, простирающейся примерно под углом 45^0 (что и отражено нижним индексом в (11.14)) к широте. Как видим, на основании (11.13) и (11.14) имеет место равенство:

$$L_{lo} = L_{la} = L_{45^0} \approx L_0, \quad (11.15)$$

которое, фактически, определяет константу, инвариантную к поворотам, и, следовательно, определяет природу сейсмического процесса как моментную.

Очаги больших землетрясений состоят из совокупностей субочагов, размеры каждого из которых, в среднем, составляют 200 (100 – 300) км [Геологическая..., 1989; Ребецкий, Маринин, 2006; Daly, 1989; Geist, Childs, Scholl, 1988; Mogi, 1969]. Очаг Кроноцкого землетрясения имеет «простое» строение – он представлен одним сейсмофокальным блоком с протяженностью L_{45^0} . Поэтому «элементарный» сейсмофокальный блок L_0 представляет собой инвариантную к поворотам относительно оси вращения Земли константу, по своей механической сути определяющей природу сейсмического процесса – моментный механизм процессов «накачки» напряжений в литосферу и их «сброса» в виде упругих сейсмических волн в тектонически активных поясах планеты.

По сути, гипотеза такого содержания была предложена А.В. Пейве в 1961 г. [Пейве, 1961]. Действительно, на основании анализа большого материала им было сформулировано положение о «самостоятельной движущей силе» геологических структур. И сделано это было на основании *геологического* материала за семь лет до *механика* Л.И. Седова, в 1968 г. сформулировавшего концепцию о собственном моменте количества движения конечного объема сплошной среды [Седов, 1973, с. 504-530], и за восемнадцать лет до *геофизика* М.А. Садовского, в 1979 г. предложившего концепцию блоковой геофизической среды [Садовский, 2004]. Поэтому сформулированный нами вывод о моментной природе геодинамического процесса следует рассматривать как подтверждение геомеханической концепции блоковой среды А.В. Пейве – Л.И. Седова – М.А. Садовского.

В соответствии с гипотезой М.А. Садовского элементарный сейсмофокальный блок L_0 имеет структуру [Садовский, 2004], ячейки которой (сейсмические дыры, сейсмические затишья, зоны молчания и т.п.) в гипоцентральных областях форшоков и афтершоков магнитудного диапазона $5 \leq M \leq 7$ имеют размеры $10 \leq L_i [\text{км}] \leq 50$. Именно в особенностях взаимодействия сейсмических дыр L_i в очагах сильных фор-афтершоков и

следует искать физическое объяснение зависимости II: $M_2(LgV_2)$, представленной на рис. 11.2.

Колебания Чандлера. Значения скоростей и частот «широтных» афтершоков $A^{lo} = a^{lo}$ (первые равенства в (11.12)) с высокой (не менее двух-трехкратного среднеквадратичного отклонения: 95-98%) статистической значимостью отличаются от таких же «долготных» значений $A^{la} = a^{la}$ (вторые равенства в (11.12)). Это позволяет предположить, что интенсивность сейсмического процесса, протекающего в очаге сильнейшего землетрясения (форшоки + главный толчок + афтершоки), *взаимосвязан* с его ориентацией относительно географической широты или относительно оси вращения планеты. Новизна этого вывода определяется сформулированным нами положением о «собственной» моментной природе геодинамического процесса, существенно дополняющем и даже во многом «переворачивающем» наши представления о той «ведущей» роли, которую ротация планеты оказывает на тектонические процессы.

В рамках существующих в настоящее время представлений принято считать, что «триггерами» геодинамических процессов часто являются резкие изменения угловой скорости вращения Земли. Сформулированный выше вывод о «собственной» моментной природе геодинамического процесса позволяет предположить существование и обратного процесса, а именно: изменение скорости вращения Земли может быть вызвано тем или иным геодинамическим явлением. Доказательство этого было приведено нами ранее в работе [Викулин, Кролевец, 2001]. В этой работе в рамках волновой ротационной модели тектонического процесса, опирающейся на представления о движении блоков и плит под действием «собственных моментов», колебания Чандлера напрямую удалось связать с разной интенсивностью сейсмотектонического процесса, протекающего в пределах «долготного» Тихоокеанского и «широтного», экваториального Альпийско-Гималайского поясов, как целых. Другими словами, разность между «долготными» и «широтными» коэффициентами в (11.12), по сути, определяет величину вызывающего колебания Чандлера момента, «прикладываемого» к планете разными по интенсивности Тихоокеанским и Альпийско-Гималайским сейсмотектоническими процессами.

Расщепление скорости «широтной» миграции фор-афтершоков. Для проверки влияния эффекта Доплера на процесс миграции землетрясений продолжим анализ представленных выше последовательностей сильных афтершоков в очагах последних сильнейших землетрясений планеты, очаги которых имели «широтную» и «долготную» протяженности (табл. 11.1). Для этого каждая из совокупностей афтершоков разбивалась на две совокупности. В одну включались данные об афтершоках, эпицентры которых располагались к востоку (East-West, *ew*) [к югу, South-North, *sn*] от предыдущих по времени эпицентров для широтных [долготных] очагов, а в другую – к западу (West-East, *we*) [к северу, North-South, *ns*] для широтных [долготных] соответственно. Для каждой из совокупностей описанным выше способом определялись зависимости скоростей и частот от времени. Данные, характеризующие параметры этих зависимостей представлены табл. 11.2 и 11.3.

Из данных табл. 11.2 видно, что значения $a_{sn,ns}^{lo}$ для «долготных» очагов не зависят от направления «движения» афтершоков $a_{ns}^{lo} = a_{ew}^{lo} = -0,67 \pm 0,07$ и равны $a^{lo} = A^{lo} = -0,67 \pm 0,09$.

Из данных табл. 11.3 видно, что значения $A_{we,ew}^{la}$, определенные во всем анализируемом диапазоне магнитуд, в среднем, также не зависят от направления движения афтершоков $A_{we}^{la} = -0,91 \pm 0,16 \approx A_{ew}^{la} = -0,88 \pm 0,09$, в среднем, $A_{we}^{la} \approx A_{ew}^{la} \approx -0,90 \pm 0,12$ и равны, согласно данным табл. 11.1, $(a^{la})_0 = -0,90 \pm 0,06 \approx (A^{la})_0 = -0,93 \pm 0,08$, в среднем, $(a^{la})_0 \approx (A^{la})_0 \approx -0,91 \pm 0,07$. В то же время, как видно из данных табл. 3, для всех трех «широтных» очагов значения коэффициентов A_{we}^{la} монотонно уменьшаются с ростом магнитуд и при $M \geq 6,5, 7,0$ достигают значений $A_{we}^{la} = -1,11 \pm 0,03$ и менее. Тем самым,

«расщепление» значений коэффициентов при $M \geq 6,5-7,0$ достигает значений: $\Delta_1 = (A^{la})_0 - A_{we}^{la} \approx 0,21 \pm 0,03$.

Таблица 11.2. Значения параметров $a_{sn,ns}^{lo}$ корреляционной зависимости, определяющих частоты миграции афтершоков в пределах «долготных» очагов землетрясений планеты с $M_W \approx 9$ [Викулин, Викулина, 2007].

Магнитуда афтершоков	«Долготные» очаги землетрясений: север – юг (n-s)				
	Чили, 1960, $M_W=9,5$		Суматра, 2004, $M_W=9,0$		Среднее
	N	a_{ns}^{lo}	N	a_{ns}^{lo}	
$\geq 5,0$	32	-0,67	343	-0,50	-0,59 $\pm$ 0,09
$\geq 5,5$	19	-0,80	100	-0,69	-0,75 $\pm$ 0,05
$\geq 6,0$	14	-0,83	26	-0,84	-0,84 $\pm$ 0,01
$\geq 6,5$	13	-0,43	7	-0,46	-0,45 $\pm$ 0,02
$\geq 7,0$	-	-	-	-	-
Среднее		-0,68		-0,62	-0,66 $\pm$ 0,04
Магнитуда афтершоков	«Долготные» очаги землетрясений: юг – север (s-n)				
	Чили, 1960, $M_W=9,5$		Суматра, 2004, $M_W=9,0$		Среднее
	N	a_{sn}^{lo}	N	a_{sn}^{lo}	
$\geq 5,0$	31	-0,57	331	-0,48	-0,53
$\geq 5,5$	25	-0,62	95	-0,68	-0,65
$\geq 6,0$	14	-0,40	23	-0,65	-0,53
$\geq 6,5$	8	-0,92	5	-0,67	-0,79
$\geq 7,0$	-	-	3	-0,92	-0,92
Среднее		-0,63 $\pm$ 0,12		-0,68 $\pm$ 0,10	-0,68 $\pm$ 0,11

Таблица 11.3. Значения параметров $A_{we,ew}^{la}$ корреляционной зависимости, определяющих скорости миграции афтершоков в пределах «широтных» очагов землетрясений планеты с $M_W \approx 9$ [Викулин, Викулина, 2007].

Магнитуда, M_S , афтершоков	«Широтные» (lat, la) очаги землетрясений: с востока на запад (w-e)					
	Андреяновские, 1957, $M_W=8,8$		Аляска, 1964, $M_W=9,0$		Амчитка, 1965, $M_W=8,7$	
	N	A_{we}^{la}	N	A_{we}^{la}	N	A_{we}^{la}
$\geq 5,0$	208	-0,61	110	-0,90	144	-0,88
$\geq 5,5$	115	-0,72	40	-0,94	43	-0,89
$\geq 6,0$	42	-0,83	15	-1,03	11	-0,97
$\geq 6,5$	13	-1,08	4	-1,13	-	-
$\geq 7,0$	4	-2,27	-	-	-	-
Среднее		-0,81 $\pm$ 0,41		-1,00 $\pm$ 0,11		-0,91 $\pm$ 0,04
Магнитуда, M_S , афтершоков	«Широтные» (lat, la) очаги землетрясений: с запада на восток (e-w)					
	Андреяновские, 1957, $M_W=8,8$		Аляска, 1964, $M_W=9,0$		Амчитка, 1965, $M_W=8,7$	
	N	A_{ew}^{la}	N	A_{ew}^{la}	N	A_{ew}^{la}
$\geq 5,0$	212	-0,72	102	-0,92	139	-0,81
$\geq 5,5$	111	-0,88	35	-0,73	40	-0,87
$\geq 6,0$	39	-0,81	8	-1,11	8	-0,88
$\geq 6,5$	13	-0,69	3	-1,17	5	-1,10
$\geq 7,0$	4	-0,72	-	-	-	-
Среднее		-0,76 $\pm$ 0,06		-0,98 $\pm$ 0,16		-0,89 $\pm$ 0,08

Уменьшение значений A_{ew}^{la} с ростом магнитуды, как видно из данных табл. 11.3, в среднем, статистически не значимо. При этом в диапазоне магнитуд $5,5 \leq M \leq 6,5-7,0$ с ростом магнитуды имеет место достаточно устойчивое увеличение значений этого коэффициента для очага землетрясения 1957 г. Тенденция к увеличению значения коэффициента A_{ew}^{la} имеет место и для Аляскинского землетрясения 1964 г. в области магнитуд $5,0 \leq M \leq 5,5$. Как видим, «синтезированные» на основании двух наиболее сильных широтных Андреяновского 1957 и Аляскинского 1964 землетрясений данные определяют достаточно устойчивое и статистически значимое уменьшение значений коэффициента A_{ew}^{la} во всем магнитудном диапазоне $5,0 \leq M \leq 7,0$. При этом для магнитудного диапазона $M \geq 6,5, 7,0$ справедливо равенство $\Delta_2 = (A^{la})_0 - A_{ew}^{la} \approx -0,21 \pm 0,07$.

Таким образом, полученные данные показывают, что для двух (из трех рассмотренных) наиболее сильных и протяженных широтно ориентированных очагов больших землетрясений экспериментально (experimental, ex) определенная величина расщепления составляет:

$$\delta_{ex} \approx \left| \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{A_{we,ew}^{la}} \right| = \frac{0,42 \pm 0,10}{0,90 \pm 0,12} = 0,5 \pm 0,1. \quad (11.16)$$

Полученное соотношение (11.16) показывает, что имеет место равенство между теоретической (11.9) и реально наблюдаемой (11.16) величинами:

$$\delta_{th} \approx 0,54 \pm 0,08 = \delta_{ex} \approx 0,5 \pm 0,1,$$

что подтверждает наблюдаемое расщепление скоростей (частот) миграции афтершоков вдоль географической широты и позволяет объяснить его с помощью эффекта Доплера, связанного с вращением Земли.

Полученные для афтершоков данные подтверждаются имеющимися данными для форшоков. Действительно, «расщепление» форшокового коэффициента a^{lo} для очага долготного Чилийского 1960 землетрясения статистически не значимо: $a_{sn}^{lo} = 0,73 \pm 0,12 \approx a^{lo} = 0,88 \pm 0,12$. В то время как «расщепление» форшокового коэффициента в очаге широтного 1957 землетрясения: $a_{ew}^{la} = 0,92 \pm 0,04 < a^{la} = 1,27 \pm 0,10 < a_{we}^{la} = 2,20 \pm 0,34$ еще более отчетливое, чем афтершокового.

Землетрясения и их очаги как квазичастицы. Выше были приведены данные, показывающие возможность существования эффекта «расщепления» значений скорости миграции и повторяемости афтершоков и форшоков в очагах широтных больших землетрясений и дано его объяснение в рамках эффекта Доплера, связанного с вращением планеты.

Следует отметить, что близкие, по сути, эффекты обнаруживают движущиеся атомы и молекулы и в «обычных» с общепринятой физической точки зрения телах. Действительно, при высокой температуре и низкой плотности основной причиной расширения спектральных линий движущихся атомов газа является эффект Доплера [Цань, 1965, с. 522-524]. Тепловое движение приводит к тому, что у части атомов возникает составляющая скорости, направленная к наблюдателю, а у другой части атомов составляющая имеет противоположное направление. В результате спектральная линия, являющаяся суперпозицией линий, испускаемых многими атомами, вследствие эффекта Доплера расширяется [Вихман, 1974, с. 134-136].

«... допуская, что излучение можно рассматривать как газ из квантов, мы обязаны признать, что аналогия между газом из квантов и газом из молекул должна быть полной» [Эйнштейн, 1966, с. 489].

Как видим, аналогия между потоком атомов и сейсмическим процессом, на которую более 40 лет тому назад обратил внимание Ю.В. Ризниченко [1985, с. 127-130], и на «спектральном» уровне может быть продолжена. В контексте настоящей работы аналогом теплового движения атомов могут являться «самосогласованные» волновые [Викулин, 2003; Vikulin, 2006] движения «элементарных» сейсмофокальных блоков L_0 и слагающих их иерархических ячеек L_i , расщепление спектральных линий движения которых и происходит вследствие эффекта Доплера, связанного с вращением планеты.

Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений – закономерность сейсмического процесса

Сейсмичность Средних Курильских островов. 15.11.2006 и 13.01.2007 с интервалом два месяца на Средних Курилах произошло два сильнейших землетрясения с $M = 8,2 - 8,3$, афтершоки которых неперекрываясь заполнили собой сейсмическую брешь, протягивающуюся от северо-восточной оконечности очага 7.09.1918, $M = 8,2$ (о. Симушир) до юго-западной оконечности очага 1.05.1915, $M = 8,3$ (о. Шиашкотан). Очаги обоих землетрясений, соприкасаясь, были вытянуты вдоль дуги. Очаг первого из этих землетрясений располагался вблизи островов, второго - в районе оси глубоководного желоба. В течение всей истории инструментальных (конец XIX - начало XX в.) и макросейсмических (середина XVIII в.) сейсмологических наблюдений для района Средних Курил пара землетрясений с такими высокими значениями магнитуд не отмечалась [Бюллетень; Новый..., 1977; Earthquake...]. Более того, была достаточно распространенной точка зрения, согласно которой считалось, что в области Средних Курил землетрясения с $M > 7,5$ происходить не могут [Тараканов, Ким, Сухомлинова, 1977].

Противоположная точка зрения последовательно отстаивалась С.А. Федотовым [2005] и А.В. Викулиным [1989, 1990, 1992, 1996, 2003]. Они полагали, что район Средних Курил является «обычной» сейсмической брешью, в пределах которой могут и должны происходить землетрясения с магнитудами $M = 8$ и более. Согласно схемы долгосрочного прогноза, основанного на принципах миграции и повторяемости землетрясений, сильнейшее землетрясение с магнитудой $M \geq 7,6$ и очагом в районе Средних Курил ожидалось в 2004 – 2013 гг. [Викулин, 1989, 1990, 1996]. И для таких прогнозов были достаточно веские основания. Действительно, согласно данным ряда авторов, землетрясение 29.06.1780 с очагом в районе Средних Курил было катастрофическим [Балакина, 1994; Кузин, Лобковский, Соловьева, 2001; Лаверов, Лаппо, Лобковский и др., 2006; Utsu, 1968], оно сопровождалось на о. Уруп сильными сотрясениями и цунами с высотой волны до 10-12 м [Саваренский, Тищенко, Святловский и др., 1958; Соловьев, 1978] и имело магнитуду $M = 8,25$ [Соловьев, 1978]. Этим данным не противоречит и значение магнитуды землетрясения 29.06.1780, приводимое в наиболее представительном для тех времен каталоге [Новый..., 1977]: $M = 7,5 \pm 1,0$.

Существует (существовала?) и промежуточная точка зрения. Согласно ней район Средних Курил представляет собой «псевдо брешь, для которой период подготовки катастрофического землетрясения с $M \geq 7,75$ на глубинах до 100 км не может уложиться в рамки сейсмического цикла (140 ± 60 лет по [Федотов, 2005])» [Кузин, Лобковский, Соловьева, 2001], и изучение свойств этой бреши требует проведения дальнейших специальных исследований [Лаверов, Лаппо, Лобковский и др., 2006]. В работе [Викулин, 2003, с. 65] показано, как в рамках ротационной волновой модели сейсмического процесса, в которой сейсмофокальная зона представляет собой однородный сейсмический

пояс, в результате моментного взаимодействия блоков (очагов сильнейших землетрясений) могут быть сняты предположения о «псевдо бреши».

Обращает на себя внимание тот факт, согласно которому в 1780 г. в районе Средних Курил, возможно, произошло два сильнейших землетрясения, магнитуды которых могли достигать и даже превышать значение $M = 8$. Отмеченное выше землетрясение 29.06.1780 г. предварялось толчком 19 января, который, согласно [Новый..., 1977], имел $M = 7,0 \pm 1,0$. Землетрясение 19.01.1780 как сильный толчок ощущалось на Северных Курилах и Южной Камчатке и интенсивное цунами после него выбросило на берег судно, стоявшее в гавани на Камчатке [Саваренский, Тищенко, Святловский и др., 1958]. Эти данные позволяют предположить, что два сильнейших события, произошедшие в ноябре 2006 и январе 2007 гг., представляли собой характерную для района Средних Курил пару событий – два толчка через малое время τ при небольшом расстоянии L между их очагами.

Землетрясения – дуплеты. Землетрясения-дуплеты происходят не часто. Согласно опубликованным данным только в пределах Японии, Курил и Камчатки по данным за 1605 – 2007 гг. достаточно уверенно выделяется 12 таких дуплетов (см. №№ 1-12 табл. 11.4). Пример расположения очагов-дуплетов на примере Большого Камчатского землетрясения 4.11.1952, $M = 8,5$, $M_W = 9,0$ (табл. 11.4, № 10) представлен на рис. 3.4б. Такие землетрясения-дуплеты, очевидно, являются неслучайными событиями.

Таблица 11.4. Список японских ($N = 1, 2, 6, 9$), курильских ($N = 7, 11 - 14$) и камчатских ($N = 3 - 5, 8, 10$), $M \geq 8$ толчков-дуплетов, очаги которых располагались в непосредственной близости друг от друга.

N	Дата	τ	$\Delta^{1,2}$, км	Δ^0 , км	L , км	M	Регион	Источник
1	31.01.1605	~ 0	150	700	400	7,9	Нанкай	[17, 34, 123, 156, 163]
2	28.10.1707	~ 0	150-200	500	100-200	8,4	Нанкай	[17, 29, 34, 123, 156]
3	17.10.1737	(~ 0)	200-250	700	100-200	8,5-9,2	Камчатка	[17, 34, 54, 94]
4	4.11.1737- 17.12.1737	1,5 мес	100-150 100-200	1100	800	7,8 8,0	Камчатка	[17, 54, 94]
5	22.08.1792	~ 0	200	800	400	8,4-8,8	Камчатка	[17, 54, 94]
6	23.12.1854- 24.12.1854	1 день	100-200 250	600	100-150	8,4 8,4	Нанкай	[17, 29, 123, 156, 163]
7	7.09.1918- 8.11.1918	2 мес	250-300 100-150	400	~ 0	7,9-8,3 7,8-8,0	Южные Курилы	[94, 123, 136, 156, 163]
8	3.02.1923- 24.02.1923	21 день	200 130	400	100	8,5-8,7 7,7	Камчатка	[13, 54, 136]
9	7.12.1944- 21.12.1946	2 года	150 250	500	50-100	8,0 8,0	Нанкай	[17, 29, 123, 156, 163]
10	4.11.1952	5 с	200-250	600	150	8,5-9,0	Камчатка	[33, 34, 45, 54, 94, 103]
11	13.10.1963	5 с	150	300	0	8,1	Ю.Курил	[44, 45, 94, 168]
12	15.11.2006- 13.01.2007	2 мес	200-250 200-250	300	парал- лельны	8,3 8,2	Средние Курилы	[9, 152]
13	19.01.1780- 29.06.1780	5 мес	100? 200?	300?	парал- лельны?	7,0 $\pm$ 1,0 7,5-8,5	Средние Курилы	[4, 70, 94, 112, 123, 164]
14	21.06.1847- 11.1853	4,5 года	? ?	?	парал- лельны?	7,5 $\pm$ 1,0 7,0 $\pm$ 1,0	Средние Курилы	[94]

Примечание: τ - время между толчками-дуплетами, $\Delta^{1,2}$ - размеры очагов в дуплете, Δ^0 - общая протяженность макросейсмической области, затронутой толчками-дуплетами, L - расстояние между очагами в дуплете.

Действительно, времена между толчками в дуплете невелики. Они, согласно табл. 11.4 (№№ 1-12), в среднем, составляют $\bar{\tau} = 3$ мес ($\tau_{\min} = 0$, $\tau_{\max} = 2$ года), что на три

порядка по величине меньше характерного периода повторяемости землетрясений такой магнитуды в одном месте $T_0 = 100 \pm 50 \text{ лет}$ [Викулин, 1992, 2003] или продолжительности сейсмического цикла $140 \pm 60 \text{ лет}$ по [Федотов, 2005] или $T_{l,sp} \approx 200 \text{ лет}$ (см. соотношения 11.2 и 11.3). Малы и расстояния между их очагами, которые, согласно табл. 11.4 (№№ 1-12), в среднем, равны:

$$L_{0,1} \approx 200 \text{ км}, \quad (11.17)$$

величине, равной размеру одного очага землетрясения с $M \approx 8$ (см. рис. 3.4б, на котором представлены данные о расположении очагов толчка-дуплета 1952 г. на Камчатке, табл. 11.4, $N = 10$). Данные, представленные в табл. 11.4, показывают, что такие дуплеты, как и «обычные» землетрясения, имеют тенденцию повторяться в одном месте. Например, события-дуплеты 1605, 1707, 1854 и 1944-1946 гг. - в районе желоба Нанкай (Япония), 17.10.1737 и 1952 гг. - на Южной Камчатке и 4.11-17.12.1737 и 1792 гг. - на юге и севере Камчатки.

Приведенные выше макросейсмические и цунами данные о землетрясениях 1780 г. (табл. 11.4, № 13) показывают, что они вполне могли бы быть парой событий, по сути, близкой землетрясениям-дуплетам 2006-2007 гг. (табл. 11.4, № 12). Согласно данным Нового каталога [Новый..., 1977] к такому же ряду характерных для района Средних Курил землетрясений-дуплетов можно было бы отнести и землетрясения 1847 и 1853 гг. (табл. 11.4, № 14).

Пары землетрясений. Список землетрясений-дуплетов без труда можно расширить в сторону увеличения расстояний между очагами землетрясений при такой же малой разности времен в паре. К такого рода очевидным парам событий, на которые много раз обращали внимание исследователи, могут быть отнесены следующие японо-курило-камчатские землетрясения, данные о которых представлены табл. 11.5.

Таблица 11.5. Список пар японских, курильских и камчатских землетрясений, произошедших через малые отрезки времени на больших эпицентральных расстояниях друг от друга.

	Дата	τ_1	Регион	L , км	M	Источник
1	4.11.1737- 17.12.1737	1,5 мес.	Камчатка Северные Курилы	1000	7,8 7,5-8,0	[17, 54, 94]
2	1.05.1915- 31.07.1915	3 мес.	Северные Курилы Камчатка	700	8,1 7,8	[17, 19, 54, 94, 136]
3	3.02.1923- 1.09.1923	7 мес.	Камчатка Япония	2500	8,5 8,2	[13, 17, 29, 54, 136]
4	4.03.1952- 4.11.1952	8 мес.	о. Хоккайдо Камчатка	1400	8,3 8,5	[17, 19, 54, 136, 156, 163]
5	6.11.1958- 4.05.1959	6 мес.	Южные Курилы Камчатка	1300	8,2 7,6-8,0	[13, 17, 19, 54, 136, 156, 163]
6	11.08.1969- 22.11.1969	3,5 мес.	Южные Курилы Камчатка	1900	8,2 7,8	[17, 19, 94, 136]

Примечание: τ_1 - время между землетрясениями в паре, L – расстояние между очагами в паре.

Возникает вполне естественный вопрос: «А не являются ли пары землетрясений и землетрясения – дуплеты проявлением некоего общего свойства сейсмического процесса?»

Один из возможных путей ответа на этот вопрос был обозначен в работах [Викулин, 1996, 2003, с. 64-65]. В работе [Викулин, 1996] были рассмотрены все ($N = 39$) происшедшие в 1899 – 1994 гг. сильнейшие ($M \geq 7,5$ - 7,9, очаги которых имеют тенденцию не перекрывать друг друга в течение сейсмического цикла [Викулин, 1990, 1996, 2003]) землетрясения северо-западной окраины Тихого океана, включающей

Японскую, Курило-Камчатскую и Алеутскую островные дуги. Каждому такому землетрясению в пределах всей окраины Тихого океана поставлено в соответствие так же сильнейшее землетрясение, которое произошло через небольшой (близкий $\bar{\tau}$) интервал времени $\bar{\tau}_1 = 3 \text{ мес}$, $\tau_{1,\min} = 0$, $\tau_{1,\max} = 8,3 \text{ мес}$, при среднем интервале между землетрясениями в выборке $\overline{\Delta T} = \frac{1994 - 1899}{N} \approx 3 \text{ года}$.

Числа пар, как функция расстояния L между очагами в паре, оказались распределенными вполне закономерным образом (рис. 11.7). При малых L выделяется первый (нулевой) максимум, $n_0 = 5$, определяющий характерный размер:

$$L_{0,2} \approx 200 \text{ км}, \quad (11.18)$$

значение которого равно расстоянию между очагами в дуплете (11.17). Для землетрясений-пар $N_1 = N - n_0 = 34$, на долю которых приходится

$\frac{\sum n_i}{N_1} 100 = 80(74 - 85) \%$ всех данных, выделяется достаточно четкая последовательность

максимумов чисел $n_i = 11 (5+6)$, 4 (5), 3 (5), 3 (4), 2, 1. Эти максимумы чисел n_i соответствуют парам землетрясений, очаги которых располагались друг от друга на расстояниях $L_i = 5000 \pm 1000$, $8000 \div 9000$, $12000 \div 13000$, $16000 \div 17000$, $19000 \div 20000$, $22000 \div 23000 \text{ км}$ соответственно (рис. 11.7).

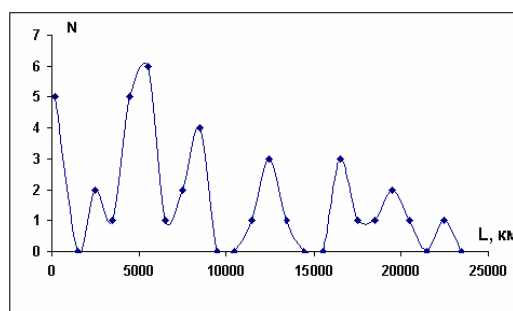


Рис.11.7. Числа N землетрясений-дуплетов и пар землетрясений как функция расстояния L между очагами [Vikulun, Tveritnova, 2008].

Структура тихоокеанского сейсмического пояса. Был составлен (с участием Н.А. Осиповой) каталог сильнейших тихоокеанских землетрясений 1570 – 2006 гг. с $M \geq 7,6$, из которого были выбраны пары событий ($n = 223$) с временами в очагах $\tau \leq 0,5 \text{ года}$. Расстояния между землетрясениями в паре определялись в соответствии с методикой [Викулин, Водинчар, 2005]. Оказалось, что плотность распределения чисел расстояний между землетрясениями в паре на уровне значимости 0,01 отличается от равномерного. При этом, спектр числа пар, как функции расстояния, имеет значимые максимумы, соответствующие длинам волн $L_j = 19000\text{-}20000$, $4000\text{-}5000$, $2500\text{-}3000$ и $1000\text{-}1200 \text{ км}$ (рис. 11.8).

Полученные данные показывают, что группирование землетрясений в дуплеты и пары является неслучайным и отражает вполне определенные пространственно-временные закономерности сейсмотектонического процесса. Между дуплетами и парами, как можно видеть из данных табл. 11.4 и 11.5 и [Викулин, 1996], нет существенной разницы. Данные, представленные в табл. 11.4 и 11.5, могут быть распространены на любые расстояния между очагами землетрясений в паре, включая и предельно большие, достигающие размеров, равных половине протяженности всего тихоокеанского

сейсмического пояса [Викулин, 1996]. На основании этих данных числа дуплетов и пар, по сути, определяют «мгновенный» «портрет» тихоокеанского сейсмотектонического пояса. Структура такого портрета определяется набором значений $L_{i,j}$, который, очевидно, может быть проинтерпретирован как совокупность стоячих волн с длинами, в соответствии с соотношениями (11.6) и (11.7) равным значению

$$L_{0,1} \approx L_{0,2} \approx L_0^0 = 200 \text{ км} \quad (11.19)$$

и кратными значениям L_l , заключенным в пределах $L_l = 2500 \div 5000 \text{ км}$ (рис. 11.7, 11.8).

Представляется, что пара сильных землетрясений 19.01 и 29.06.1780, скорее всего, является сильнейшими землетрясениями-дуплетами, очаги которых, как и очаги землетрясений 2006-2007, заполнили собой сейсмофокальный объем Средних Курил. Как видим, землетрясения-дуплеты 1780 и 2006-2007 гг., по сути, являются близкими южнокамчатским сильнейшим дуплетам 17.10.1737 и 1952 гг. (табл. 11.4).

Таким образом, значение L_0^0 в (11.19) является характерным пространственным масштабом, который одновременно определяет особенности выделения упругой энергии и на «микроуровне» - в очагах землетрясений-дуплетов (11.17), и на «макроуровне» - в пределах всего тихоокеанского пояса (11.18). С другой стороны, значение L_0^0 (11.19) оказалось близким значению L_0 (11.15):

$$L_0 \approx L_0^0. \quad (11.20)$$

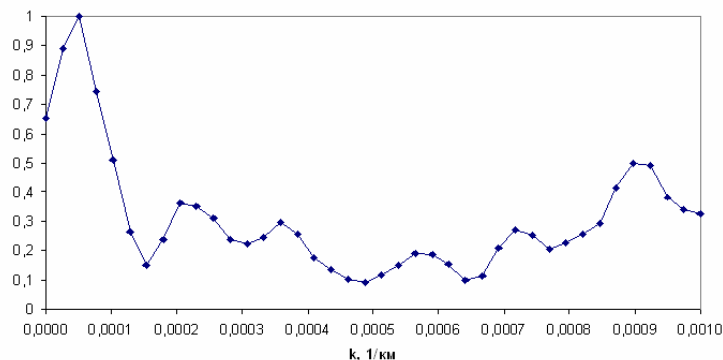


Рис. 11.8. Нормированная интенсивность Фурье-гармоник чисел пар землетрясений как функция волнового числа $k = 1/L$. Данные на рисунке получены Г.М. Водинчаром.

Полученное соотношение (11.20) представляется таким равенством, которое, фактически, определяет пространственный масштаб «моментной» константы L_0 и, следовательно, постоянной L_0^0 - их зависимость от угловой скорости вращения Земли. Ниже покажем, что это действительно так.

Согласно данным [Викулин, 1992] 29.07.1854 в районе Северных Курил между дуплетами 17.10.1737 и 1952 гг. произошло сильнейшее землетрясение, которое сопровождалось ощутимыми сотрясениями и сильным цунами [Новый..., 1997]. В этой связи, вполне возможно, что и землетрясение 21.06.1847 г. с $M = 7,5 \pm 1,0$, а, возможно, и пара землетрясений 21.06.1847 и 11.1853 с $M = 7,5 \pm 1,0$ (табл. 11.4, № 14) с очагами в районе Средних Курил, также являлись сильнейшими, своими очагами заполнившими сейсмофокальный объем Средних Курил. В таком случае значение повторяемости сильнейших дуплетов и пар землетрясений для района Средних Курил, равное $110 \pm 30 \text{ лет}$, было бы близким повторяемости сильнейших землетрясений T_0 для всей окраины Тихого океана [Викулин, 2003].

Ротационно-упругие волны

Физическая модель геологической среды. Геофизическая и геологическая среды являются блоковыми и/или блоково-плитовыми [Пейве, 1961; Садовский, 2004]. Физически это означает, что часть Земли, включающую земную кору, литосферу (и всю мантию), в принципе, нельзя рассматривать как сплошное твердое тело. В основном, по двум причинам. Во-первых, даже в отсутствие внешних сил нормальные и/или касательные напряжения в блоковой среде на границах блоков изменяются скачками и, тем самым, создают условия для «самопроизвольного» движения блоков относительно друг друга. Другими словами, блоковое тело способно деформироваться «само собой» без приложения внешних сил и потому, по определению, не может считаться твердым. Во-вторых, блоковая среда не может быть разделена на достаточно малые части с тем, чтобы принятыми в механике твердого тела методами задачу движения всего тела можно было бы свести к задаче движения большого количества материальных точек.

Геофизическая (геологическая) среда, по определению, является вращающейся. Значение и направление угловой скорости не зависят от выбора положения начала координат, к которому может быть отнесено вращение «эффективно твердого» тела. Поэтому можно говорить об угловой скорости вращения такого тела без указания на это начало, что позволяет макроскопические по размерам геофизические блоки и плиты считать объемами с собственными моментами, а их совокупность, по сути - средой в смысле А.В. Пейве – Л.И. Седова – М.А. Садовского. Величины моментов блоков и плит в такой (блоковой вращающейся) среде, очевидно, не должны зависеть от их размеров.

Предпосылками для включения инерционных эффектов, связанных с вращением Земли, в перечень основных параметров, определяющих сейсмический (сейсмотектонический) процесс, являются следующие данные [Викулин, 2003, 2004; Викулин, Иванчин, 1998].

1. *Физическая составляющая.* Во-первых, при тектоническом движении плиты друг относительно друга смещаются как упругие. Пропорциональная экспоненте от сдвигового напряжения, скорость пластического течения, как показывают данные экспериментов в физике твердого тела, в зонах столкновения плит при небольшом увеличении напряжения может изменяться на многие порядки по величине.

Во-вторых, зона локализации пластической деформации может не быть однородной. Экспериментальные данные показывают, что при пластической деформации образца некоторые его объемы без пластической деформации внутри могут поворачиваться как целые на многие десятки градусов. При этом «ротации для кристаллической решетки являются столь же типичными, как и турбулентное течение для жидкости» [Панин, Гиряев, Лихачев, 1984], сплошность образца не нарушается, средняя величина пластической деформации составляет несколько процентов, и повороты макрообъемов становятся энергетически более выгодными, чем равномерное деформирование всего образца.

В-третьих. Инерционные силы, приводящие к повороту (вращению) макрообъемов относятся к объемным силам, в отличие от упругих сил, которые являются поверхностными. Это означает, что при вращении блокового твердого тела напряжения, созданные внутри него в результате поворота его некоторых макрообъемов, не могут быть сброшены за счет пластической («температурной») деформации. Для релаксации таких напряжений весь образец необходимо соответствующим образом поворачивать как целое.

2. *Геофизическая составляющая.* Во-первых, сейсмофокальные зоны, в пределах которых осуществляется межплитовое пластическое течение, представляют собою тонкий слой, который имеет блоковое строение с размерами блоков до сотен километров. При таких размерах блоков - очагов сильнейших землетрясений инерционные эффекты в результате их поворотов, вызванных вращением Земли, могут быть значительными.

Во-вторых, геологическое строение островных дуг и континентальных окраин

Тихого океана указывает на то, что блоки, составляющие верхнюю часть сейсмофокальной зоны Алеутской дуги (и сейсмофокального объема вблизи Эквадора), с конца плиоцена – плиоцена до настоящего времени, повернулись на углы, значения которых лежат в пределах $0 \leq \gamma \leq 23^\circ$ [Геологическая..., 1989; Daly, 1988; Geist, Childs, Scholl, 1988]. Поворот сейсмофокального блока ($L \approx 200$ км) в результате происшедшего в его пределах катастрофического землетрясения 1.9.1923, $M = 8,2$ Канто (Япония), определен на основании данных инструментальных геодезических измерений. Поворот по часовой стрелке на $\approx 7^\circ$ с ССВ 25-27⁰ в верхнем плейстоцене на ССВ 18-20⁰ в позднеледниковую эпоху Исландии ($L \approx 200$ км), расположенной в рифтовой зоне Срединного Атлантического хребта, определен по изменению простираия линий трещинных извержений [Мелекесцев, 1979]. Микроплита Пасха ($L \approx 300$ км), расположенная на стыке трех плит в центральной части Тихого океана «вращается между Восточным и Западным рифтами с довольно большой скоростью (примерно $15^\circ/\text{млн лет}$) и уже повернулась почти на 90° со времени своего образования около 5 млн лет назад» [Международный, 2003, с. 56-57].

Суммируя все данные, приведенные выше и опубликованные в работах [Викулин, 2008а, б; Вихри..., 2004; Ротационные..., 2007], можно сделать вывод, что углы, на которые отдельно взятые блоки повернулись в течение последних миллионов лет, лежат в пределах:

$$0 \leq \gamma \leq 90^\circ, \quad (11.21)$$

при угловых скоростях их поворота, порядка:

$$\omega \approx 10^{-(6 \pm 1)} \text{ град/год}. \quad (11.22)$$

В-третьих. Температура слагающей земную кору и литосферу среды, в пределах которой располагаются очаги землетрясений, в том числе очаги глубоких $H = 600-700$ км южноамериканских $M \approx 8$ землетрясений, достигает многих сотен градусов. При повторяемости сильнейших землетрясений одно событие в 100-200 лет (см. соотношения 11.2 и 11.3) накопление напряжений в очаге землетрясения «обычным» способом может быть затруднено. Инерционные же напряжения, которые могут возникнуть в блоковой среде вследствие вращения Земли, как отмечалось выше, не могут быть срелаксированы за счет пластической деформации.

В-четвертых, исследование механизмов очагов некоторых сильнейших землетрясений показало их плохое соответствие «обычной» модели - модели плоской бесконечной дислокации. Например, механизмы очагов Калифорнийского 1906, $M = 8$ и Аляскинского 1964, $M = 8,3$ землетрясений наилучшим образом согласуются с сейсмологическими и геодезическими данными в рамках модели винтовой дислокации [Shamsi, Stacy, 1969].

Как видим, данные из физики твердого тела и геофизические данные о зонах локализации очагов землетрясений показывают, что в сейсмических поясах Земли созданы условия, при которых слагающие их блоки поворачиваются.

Большое количество имеющегося геологического и геофизического материала прямо указывает на вращательный, крутильный и вихревой характер движения блоков, плит и других геологических структур планеты [Кац, Козлов, Полетаев и др., 1990, Вихри..., 2004; Тверитинова, Викулин, 2005; Викулин, Тверитинова, 2007; Ротационные..., 2007; Vikulin, Tveritinova, 2008]. Для сравнения, в гидродинамике, как отмечалось выше, вихри – это «мышцы и жилы» [Сэффмэн, 2000, с. 7]. Важно, что многие геологи и геофизики сами отмечают «самостоятельный» [Слензак, 1972], «собственный» [Пейве, 1961], «с ненулевыми дивергенциями и вихрями» [Лукьянов, 1999] и «упругий» [Устинова, Вылцан, Устинов, 2005] характер таких движений, прямо связанных с вращением планеты [Стовас, 1975; Chao, Gross,

1995; Полетаев, 2004; Викулин, Тверитинова, 2007; Ротационные..., 2007]. Более того, именно наличие сильно выраженных нелинейных «неклассических» [Гольдин, 2003; Николаев, 2003; Островский, 2005; Садовский, 2004] свойств позволяет горные породы рассматривать как среду с собственными источниками упругой энергии [Пономарев, 1987].

Таким образом, геологические и геофизические данные и данные физики твердого тела приводят нас к специфической задаче о поле упругих напряжений во вращающейся блоковой среде [Викулин, 1990, 2003; Vikulin, 2006].

Задача об упругом поле блоковой геофизической среды. 1. Постановка задачи. Для блоковых геофизических нелинейных сред [Садовский, 1985, 2004; Гольдин, 2003; Геофизический..., 2008; Островский, 2005] в рамках классической теории упругости с симметричным тензором напряжений [Ландау, Лифшиц, 2003] была поставлена и аналитически решена задача о поле напряжений во вращающемся с угловой скоростью Ω твердом теле вокруг упругосвязанного с ним небольшого, поворачивающегося под действием внутренних источников макрообъема V [Викулин, 1990; Викулин, Иванчин, 1997, 1998; Vikulin, 2006]. Основная идея решения такой задачи заключается в том, что когда блок упруго сцеплен с окружающей его средой (матрицей), изменение за счет внутренних источников направления момента импульса макрообъема приводит к появлению вокруг него упругих напряжений, которые в силу законов сохранения имеют момент силы. Эта идея соответствует известному положению в теории вихрей [Сэффмэн, 2000, с. 17]: «завихренность пропорциональна моменту количества движения частиц».

Геологический блок находится под действием многочисленных геофизических полей, что, например, может привести к упорядочению движения как различных макрообъемов блока, так и вещества (флюидов, зарядов и др.) вдоль его границы. Поэтому смысл, который мы вкладываем в понятие «собственный момент блока» наиболее близок «собственному моменту количества движения конечного объема сплошной среды», по мнению Л.И. Седова [1973, с. 146-148, 504-530]. Такой наш подход к сейсмотектоническим задачам, когда упругое поле вокруг макрообъема (блока) вращающейся среды наследует его собственный момент (циркуляцию), в принципе отличается от подходов других авторов (они либо не учитывают вращения Земли [Садовский, 1985; Курленя, Опарин, 2000; Гольдин, 2003], либо учитывают формально, в рамках моментной теории упругости [Николаевский, 1995; Курленя, Опарин, 2000; Xie Xin-Sheng, 2004; Быков, 2005]). Отличие нашей ротационной модели от континуума Коссера, наиболее часто применяющегося для объяснения влияния ротации планеты на геофизические процессы, заключается в том, что блоки геофизической среды не просто имеют ротационные степени свободы, они имеют собственный момент, который в случае вращения среды и приводит к целому ряду интересных специфических следствий.

2. Упругое поле вокруг одного блока шаровой формы. Определялось поле упругих напряжений U , возникающее в бесконечной вращающейся с угловой скоростью Ω среде вокруг блока шаровой формы радиуса R_0 , как решение уравнения упругого равновесия в области $r \geq R_0$ с нулевыми граничными условиями на бесконечности, с действующей на блок силой, равной нулю, и моментом силы, не зависым от размера блока R_0 . Решение для момента силы упругого поля K , направленного перпендикулярно плоскости его поворота, величины упругой энергии поля W , поля смещений U и напряжений σ в сферической системе координат (r, θ, φ) получено в виде [Викулин 2008а, б]:

$$K = -6\pi^2 \Omega R_0^4 \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \beta / 2, \quad (11.23.1)$$

$$W = \frac{16}{15} \pi \rho \Omega^2 R_0^5 \sin^2 \beta / 2, \quad (11.23.2)$$

$$U_r = U_\theta = 0, \quad U_\varphi = \Omega R_0^4 r^{-2} \sqrt{\frac{\rho}{15G}} \sin \theta \sin \beta / 2, \quad (11.23.3)$$

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi r} = \frac{3}{2} \Omega R_0^4 r^{-3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \theta \sin \beta / 2. \quad (11.23.4)$$

Остальные компоненты напряжений равны нулю.

Второе с верху выражение в (11.23) можно переписать в виде:

$$W = 2I\Omega^2 \sin^2 \beta / 2 = 4W_0 \sin^2 \beta / 2, \quad (11.24)$$

где $I = \frac{8}{15} \pi \rho R_0^5$ - момент инерции однородного с плотностью ρ шара радиуса R_0 , $W_0 = \frac{1}{2} I \Omega^2$ - кинетическая энергия блока. Для «среднестатистического» ($\beta \approx 10^{-4}$ рад) очага землетрясения с $M \approx 8$ величина ротационной упругой энергии, созданной вокруг него, составит:

$$W \approx 10^{-8} W_0, \quad (11.24 \text{ а})$$

где полная величина кинетической энергии блока W_0 равна:

$$W_0 = \frac{1}{2} I \Omega^2 \approx 10^{25} \text{ Дж}. \quad (11.25)$$

Отметим, что значение «сейсмического к.п.д.» по разным оценкам, в среднем, составляет величину, близкую 10^{-4} .

При параметрах модели: плотности $\rho = 3 \text{ г/см}^3$, модуле сдвига среды $G = 10^{11} \text{ Н/м}^2$, угловой скорости вращения Земли вокруг своей оси $\Omega = 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ и размере блока $R_0 = 100 \text{ км}$, соответствующем очагу землетрясения с магнитудой $M \approx 8$, из соотношений (11.23.1-4) получаем: $U \approx 10 \text{ м}$, $\sigma \approx 100 \text{ бар}$, $W \approx 10^{16+18} \text{ Дж}$, $K \approx 10^{28+30} \text{ дин·см}$, которые по порядку величины близки реально регистрируемым при землетрясениях с $M \approx 8$ смещениям, сброшенным напряжениям, выделившейся упругой энергии и сейсмическому моменту соответственно. Все эти значения достигаются при угле поворота блока (очага землетрясения) $\beta \approx U / R_0 \approx 10^{-4} \text{ рад}$. При продолжительности сейсмического цикла (повторяемости сильнейших землетрясений в одном месте) 100-1000 лет для скорости поворота блока получаем механическую (модельную) оценку:

$$\dot{\beta} \approx 10^{-(4 \div 6)} \text{ град/год}, \quad (11.26)$$

которая близка определенным инструментально скоростям поворота блоков и микроплит, приведенным выше (11.22).

Таким образом, предложенная модель накопления упругих напряжений вокруг одного поворачивающегося блока являются энергетически достаточно обоснованной.

3. Модель двух поворачивающихся шаровых блоков. Упругая энергия двух блоков равна:

$$W = G \int (a + b)^2 dV = G \left(\int a^2 dV + \int b^2 dV + 2 \int ab dV \right),$$

где a и b – тензоры упругой деформации, создаваемые в результате поворота первого и второго блока соответственно, интегрирование проводится по всему объему тела. Первые два слагаемые в правой части в выражении для упругой энергии есть собственные упругие энергии, каждая из них вычисляется на основании (11.23.2). Третье слагаемое определяет выражение для энергии взаимодействия первого и второго блоков друг с другом:

$$W_{\text{int}} = 2G \int abdV.$$

Выражение для энергии взаимодействия W_{int} получаем в виде [Викулин 2008а, б; Викулин, Иванчин, 1998]:

$$W_{\text{int}} = \frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \cos \phi, \quad (11.27)$$

или

$$W_{\text{int}} = \frac{45}{8} W_{01} \frac{R_{02}^4}{R_{01} l^3} \cos \phi = \frac{45}{8} W_{02} \frac{R_{01}^4}{R_{02} l^3} \cos \phi, \quad (11.27.1)$$

где R_{01} и R_{02} характерные размеры первого и второго блоков, l – расстояние между их центрами, ϕ – угол между их моментами сил, $W_{01(02)} = \frac{1}{2} I_{01(02)} \Omega^2$ – «собственные» энергии первого (01) и второго (02) блоков, $I_{01(02)}$ – соответственно их моменты инерции.

Момент силы K_{int} , обусловленный энергией взаимодействия, определяется путем дифференцирования выражения для W_{int} (11.27) по углу ϕ :

$$K_{\text{int}} = -\frac{3}{2} \pi \rho \Omega^2 R_{01}^4 R_{02}^4 l^{-3} \sin \phi. \quad (11.28)$$

Момент K_{int} для обоих блоков имеет одно и то же значение, но для разных блоков направлен в противоположные стороны. Момент силы (11.28) приложен со стороны упругого поля к поверхности каждого из блоков и направлен таким образом, чтобы уменьшить величину энергии взаимодействия W_{int} до минимума. Такой процесс минимизации энергии взаимодействия W_{int} в соответствии с соотношениями (11.27.1) равносильна минимизации «собственных» энергий и W_{01} и W_{02} , что может произойти только в результате землетрясения-дуплета или пары землетрясений с очагами, расположенными в пределах обоих взаимодействующих блоков. Другими словами, в рамках предложенной модели двух блоков землетрясение – процесс выделения упругой энергии, является результатом моментного взаимодействия блоков между собой.

Выше приведены данные о землетрясениях-дуплетах и парах землетрясений, которые показывают, что такие события являются не исключением, а, скорее, закономерностью сейсмического процесса. Другими словами, землетрясения-дуплеты и пары землетрясений можно считать доказательством возможности существования моментного взаимодействия.

Представляется, что только в рамках таких моментных представлений окажется возможным дать разумное объяснение тем многочисленным фактам вихревого и ротационного движения, которые приведены выше и о которых будет говориться в следующих главах настоящей книги.

Дальнейшее. Будем полагать блоки равновеликими. Тогда из (11.23.2) и (11.27) получаем:

$$\frac{K_{\text{int}}}{K} = \frac{\Omega R_0}{V_s} \left(\frac{R_0}{l} \right)^3 \frac{\sin \phi}{\sin \beta / 2} \approx \frac{V_R}{V_s}, \quad (11.29)$$

где $V_s = \sqrt{G/\rho}$ и $V_R = \Omega R_0$ - скорость поперечной упругой волны и центробежная скорость соответственно. Из соотношения (11.29) видно, что инерционные моментные эффекты взаимодействия, связанные с поворотом блоков внутри вращающегося тела, становятся тем более существенными, чем с большей скоростью вращается тело и чем больше размер блока R_0 или магнитуда землетрясения.

Отношение энергии взаимодействия W_{int} (11.27) к собственной энергии блока W (11.23.2) в случае равновеликих блоков определяется равенством:

$$\frac{W_{\text{int}}}{W} = \frac{45}{32} \left(\frac{R_0}{l} \right)^3 \frac{\cos \phi}{\sin^2 \beta/2} = \delta. \quad (11.30)$$

Откуда видно, что максимальное ($\cos \phi = 1$) расстояние Λ , на котором энергия взаимодействия W_{int} будет по порядку величины близка собственной энергии W блока ($\delta = 1$), определится из выражения:

$$\Lambda \approx 2\beta^{-2/3} R_0 \approx (10^2 \div 10^3) R_0, \quad (11.31)$$

в котором значение угла поворота блока было принято $\beta \approx 10^{-4}$ рад.

Из полученного соотношения (11.31) видно, что упругие поля, создаваемые вокруг поворачивающихся внутри вращающегося тела блоков, распространяются на расстояния, протяженность которых на два – три порядка превышает размеры блоков, то есть такие ротационные упругие поля являются дальнodelствующими. Другими словами, сейсмофокальный объем протягивающийся вдоль всей окраины Тихого океана можно считать совокупностью взаимодействующих между собой «элементарных» блоков с размерами $R_0 \approx 100$ км, представляющих собой очаги сильнейших землетрясений с $M \approx 8$, в которых периодически происходит выделение упругой энергии.

Физически ясно, что только такое свойство сейсмического процесса, как его дальнodelствие, может лежать в основе статистически обоснованных эффектов удаленных форшоков и афтершоков.

Уравнение движения однородной цепочки взаимодействующих блоков (на примере окраины Тихого океана). Рассмотрим одномерную (длина цепочки много больше ее ширины) цепочку поворачивающихся взаимодействующих блоков, расположенную внутри твердого тела, вращающегося с угловой скоростью Ω - аналог сеймотектонического пояса планеты, например, сейсмофокальной зоны, протягивающейся вдоль окраины Тихого океана. Будем полагать, что все блоки равновелики и имеют форму шара радиуса R_0 .

Рассмотрим случай, когда все блоки в цепочке движутся равномерно. Тогда, в соответствии с полученными выше результатами, уравнение для движения блока в цепочке можно записать в виде:

$$I \frac{d^2 \beta}{dt^2} = K_1 + K_2, \quad (11.32)$$

где β - как и прежде, угол, на который повернулся блок в результате подготовки землетрясения, I - его момент инерции, K_1 - «собственный» момент силы поля упругих напряжений вокруг блока в результате его поворота, значение которого определяется из соотношения (11.23.1), K_2 - момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с остальными блоками цепочки.

Из самых общих соображений ясно, что величина момента K_2 должна быть пропорциональна как упругой энергии рассматриваемого блока, равной $Vd^2\beta/dx^2$, так и упругой энергии, соответствующей всем остальным блокам цепочки. В качестве последней выбираем величину, равную средней линейной плотности упругой энергии цепочки блоков w . Здесь $V = 4/3\pi R_0^3$ - объем блока, x - координата вдоль цепочки. Таким образом, момент силы, отвечающий за взаимодействие рассматриваемого блока с другими блоками цепочки, можно записать в виде:

$$K_2 = \zeta w V d^2 \beta / dx^2, \quad (11.33)$$

где ζ - безразмерный коэффициент, характеризующий однородность цепочки. Для тихоокеанского пояса, являющегося достаточно однородным, примем $\zeta = 1$.

Окончательно уравнение движения (11.32) для блока с координатой x в момент времени t с учетом (11.23.1) и (11.33) в безразмерных координатах $\xi = k_0 x$, $\eta = c_0 k_0 t$ можно записать в виде:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta, \quad (11.34)$$

где $\theta = \beta/2$. Волновое число k_0 и скорость c_0 , характеризующие цепочку блоков - сейсмический процесс, протекающий в цепочке, соответственно определяются из следующих соотношений:

$$k_0^2 = \frac{3\pi\Omega}{wV} \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{4/3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}}, \quad (11.35)$$

$$c_0^2 = wV / I. \quad (11.36)$$

Уравнение (11.34) известно как уравнение синус-Гордона (СГ).

Сильно нелинейные уравнения, в том числе СГ уравнение, в настоящее время достаточно широко используются при решении разного рода задач [Быков, 2000, 2005; Скотт, Чжу, Маклафлин, 1973; Проблемы..., 2003]. Отличительной особенностью полученного нами СГ уравнения является то обстоятельство, что определяемые нелинейными свойствами твердой геофизической среды постоянные k_0 (11.35) и c_0 (11.36) оказались зависимыми от угловой скорости вращения тела (Земли).

Свойства решений. Полученное СГ уравнение (11.34), как и любое другое синус-Гордона уравнение, имеет много решений. Среди них в технических, физических и геофизических приложениях часто встречаются решения в виде локализованных (уединенных) волн – солитонов (soliton) [Быков, 2000, 2005]. В длинной цепочке блоков, когда можно не учитывать влияние ее концов (какими являются и сейсмические пояса планеты, в том числе и тихоокеанское кольцо), возможны решения, получившие название экситонов (exiton) [Давыдов, 1982].

Качественная зависимость энергии возбуждения E от скорости распространения V для солитонной (sol, I) и экситонов (ex, II) приведена на рис. 11.9.

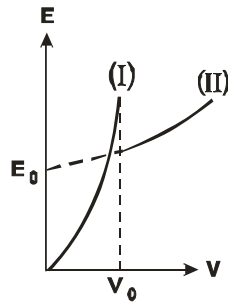


Рис. 11.9. Волновые решения уравнения СГ: I - солитоны, II - экситоны, V_0 – характерная скорость процесса как предельная скорость солитонного решения, $E_0 > 0$ - минимальная энергия солитонноно возбуждения [Давыдов, 1982].

Зависимости для энергий возбуждения солитонов и экситонов, в соответствии с [Давыдов, 1982], удовлетворяют следующим условиям:

$$E_{sol} \approx V_{sol}^n, E_{sol} \geq 0, V_{sol} \leq V_0; E_{ex} \approx V_{ex}^p, V_{ex} > V_0; n > p, \quad (11.37)$$

где V_0 - характерная скорость процесса, протекающего в цепочке взаимодействующих блоков.

В квазилинейном приближении, когда процесс можно отобразить с помощью линеаризованного уравнения СГ, закон дисперсии для экситонных решений оказывается возможным аналитически записать в виде:

$$\omega^2 = \omega_0^2 (1 + \lambda_0^2 / \lambda^2), \quad \lambda_0 = 2\pi c_0 / \omega_0, \quad (11.38)$$

где ω и λ - частота и длина волны экситона соответственно, ω_0 - собственная частота поворотного движения блока, λ_0 - соответствующая ей длина волны.

Первой характерной особенностью закона дисперсии (11.38) является его связь с нелинейными свойствами цепочки блоков (геофизической среды, заполняющей сейсмофакальный объем и примыкающую к нему часть земной коры), а не с ее дискретной структурой.

Второй отличительной особенностью закона дисперсии (11.38) является то, что частота распространяющихся по цепочке блоков волн всегда выше ω_0 . Физически очевидно, что частота ω_0 достигается при большой длине волны (в пределе $\lambda \rightarrow \infty$), когда все блоки цепочки движутся как единое целое, без ее деформации. Этот случай нулевого экситонного состояния соответствует экстраполяции экситонной зависимости $E_{ex}(V)$ в (11.37) в область значений скорости $V_{ex} < V_0$:

$$V_{ex} = 0, E_{ex} = E_{min} = E_0 > 0. \quad (11.39)$$

Характерная скорость процесса. По аналогии с обычными упругими волнами (случай тектонического приближения [Николаевский, 1996]), считая длину волны экситона λ_0 равной размеру сейсмофакального блока:

$$\lambda_0 \approx R_0, k_0 \approx 2\pi / R_0, \quad (11.40)$$

для значения характерной скорости волнового процесса в цепочки взаимодействующих блоков c_0 получаем следующее теоретическое модельное выражение:

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx V_R V_S \quad (11.41)$$

или при принятых выше параметрах модели:

$$c_0 \approx (1 \div 10) \text{ см/с}. \quad (11.42)$$

Здесь $V_S = \sqrt{G/\rho}$ - поперечная скорость упругих волн, $V_R = \Omega R_0$ - центробежная скорость.

Соотношение численных значений «наклонов» глобальной (11.4) и локальной (11.6) зависимостей (рис. 3.4, I и II соответственно), описывающих миграцию очагов землетрясений (11.8), не противоречит такому же соотношению для теоретических «наклонов» (11.38) солитонной и экситонной зависимостей (рис. 11.8, I и II соответственно). Теоретическое модельное значение скорости c_0 (11.42) равно «экспериментально» определенной (рис. 11.1, зависимость I) предельной скорости глобальной миграции очагов тихоокеанских землетрясений $V_{1,\max}$ (11.5) и, тем самым, по смыслу, является характерной скоростью процесса V_0 (рис. 11.8):

$$c_0 \approx V_{1,\max} \approx V_0. \quad (11.43)$$

Все эти данные в совокупности позволяют экспериментально установленные и глобальную и локальную зависимости магнитуд землетрясений от скоростей миграции их очагов считать солитонным и экситонным решениями уравнения СГ, описывающего движение цепочки поворачивающихся геоблоков (11.32), (11.34) в смысле А.С. Давыдова [1982].

В качестве дополнительного подтверждения сформулированного вывода приведем следующие данные. В рамках предложенной модели удалось собственную частоту ω_0 (11.38) поворотного движения блока отождествить с частотой нутации полюса планеты, по сути, являющейся экситонной энергией E_0 , определяющей «нулевое» состояние (11.39). В рамках той же задачи было предсказано расщепление частоты нутации (Чандлера) на две частоты [Викулин, Кролевец, 2001; Vikulin, Krolevets, 2002]. И этому эффекту в рамках модели взаимодействующих блоков так же дано объяснение [Викулин, Викулина, 2008]: скорость миграции вдоль широты расщепляется на величину скорости Доплера, обусловленную вращением Земли вокруг своей оси, скорость миграции вдоль долготы – не расщепляется (см. выше раздел, посвященный эффекту Доплера).

Характерную скорость процесса согласно соотношения (11.41) с точностью до численного множителя, можно представить в виде среднегеометрического произведения двух скоростей: центробежной V_R и упругой V_S . Отсюда и название модели, данное ей авторами [Викулин, Иванчин, 1997, 1998] – ротационно-упругая волновая модель.

Энергия сейсмического процесса. Итак, энергетические оценки подтвердили модель одного блока и, тем самым, доказали возможность единственного физического допущения модели – существования собственного момента у блока среды (геофизической среды). В рамках модели двух блоков нашло свое естественное объяснение свойство дальнего действия и такие связанные с ним явления, как землетрясения-дуплеты и пары землетрясений, удаленные форшоки и афтершоки, расщепление скорости миграции форшоков и афтершоков вдоль географической широты и нутации полюса Земли. И, как следствие такого последовательного подхода, в рамках модели цепочки блоков получено волновое описание сейсмического процесса. При этом для вращающихся блоковых сред было показано существование принципиально нового типа волн – ротационно-упругих волн, характерная скорость которых

определяется ротационными свойствами слагающих ее блоков и упругостью среды (точнее - упругими параметрами, определяющими сцепление блоков с матрицей).

Видим, что последовательное «усложнение» модели без ее внутреннего рассогласования приводит к «расширению ее возможностей». Это позволяет полученные аналитические решения для модели двух блоков применить к феноменологическому описанию цепочки блоков.

Энергию волнового движения в цепочке блоков можно оценить с помощью аналитически полученного выражения для энергии взаимодействия блоков W_{int} (11.27). Полагаем, что землетрясения-дуплеты и/или пары землетрясений являются результатом предельного ($\cos\phi=1$) взаимодействия, при котором моменты соответствующих таким событиям блоков параллельны ($\phi=0$). Тогда для равновеликих соприкасающихся ($l=2R_0, (R_0/l)^3=1/8$) пар блоков (как в случае пары землетрясений на Средних Курилах 15.11.2006 и 13.01.2007, табл. 11.4, № 10) и/или блоков-дуплетов (как в случае Большого Камчатского землетрясения-дуплета 4.11.1952, табл. 11.4, № 12, рис. 3.4б), расположенных «через один» ($l=4R_0, (R_0/l)^3=1/64$), для энергии волнового движения в цепочке блоков на основании (11.25) и (11.27) получаем следующую оценку:

$$W_{\text{int}} \approx (0,02 \div 0,7)W_0 \approx 10^{24\pm1} \text{ Дж.} \quad (11.44)$$

Полученная оценка (11.44), по сути, определяет энергию волнового сейсмотектонического процесса, протекающего в пределах геодинамически активных поясов (тихоокеанского кольца) планеты. Взаимодействие вследствие вращения Земли сейсмофокальных блоков друг с другом с энергией (11.44) приводит к их поворотам, что и сопровождается сильнейшими землетрясениями, при которых излучается упругая энергия примерно на восемь порядков по величине меньшая (11.24а) энергии сейсмотектонической волны (11.44).

Волновая природа вулканизма окраины Тихого океана

Исходные данные. Сейсмичность и вулканизм, рассматриваемые как процессы планетарного масштаба, вне всякого сомнения, не просто взаимосвязаны. Действительно, подавляющая часть всех землетрясений планеты, в том числе все самые сильные из них, происходят в пределах тектонически активных поясов. Вблизи таких поясов расположены и самые активные вулканы планеты. Эти данные указывают на то, что причины, приводящие к землетрясениям и к извержениям вулканов, имеют общие генетические корни.

Поиску взаимосвязи между сейсмичностью и вулканизмом в пределах окраины Тихого океана и анализу такой взаимосвязи посвящено достаточно большое количество исследований. Их обзор представлен в работах [Акманова, 2008; Викулин, 2003; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007; Мелекесцев и др., 2005]. Согласно этих обзоров, отсутствуют данные, которые бы однозначно указывали на существование взаимосвязи между сейсмическим и вулканическим процессами. Тем не менее, большинство исследователей склоняются к мысли о существовании такой взаимосвязи. Имеющиеся данные позволили сформулировать гипотезу о том, что сейсмичность и вулканизм в пределах окраины Тихого океана взаимосвязаны и такая взаимосвязь имеет не локальный, а региональный характер в том смысле, что взаимосвязаны не конкретные землетрясения и извержения вулканов, а их совокупности, рассматриваемые в пределах региона. Опубликовано большое количество исследований, в которых содержатся сведения о миграции вулканической активности. Согласно [Акманова, 2008], скорости миграции вулканической активности в пределах разных и вулканических отдельно взятых центров и целых регионов протяженностью до 10^4 км, рассматриваемых в пределах различных по продолжительности интервалов времени от 100 лет до 80 млн лет, по данным разных исследователей изменяются в достаточно широких пределах:

$$10^{-5} \leq V_{volc} \leq 10^3 \text{ [км/год]}. \quad (11.45)$$

С целью изучения закономерностей вулканической активности и ее взаимосвязи с сейсмическим процессом была создана электронная база, включающая данные о землетрясениях и извержениях вулканов мира [Акманова, 2008; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007]. База вулканических извержений составлена в формате базы землетрясений и содержит следующие параметры: дата извержения (год, месяц, день), координаты вулкана (долгота и широта в градусах) и объем изверженного ювенильного материала W . В базе представлены все $n = 6415$ известные (датированные) извержения $N = 607$ вулканов планеты за последние 12 тыс. лет с 9850 г. до н.э. по 2005 г. включительно.

В соответствии со шкалой, принятой в Smithsonian Institution [Simkin, Siebert, 1993], все извержения в базе классифицировались по величине $W = 1, 2, 3, \dots, 7$, значения которой соответствуют следующим объемам извергнутых при извержении ювенильных пород $10^{4.5}, 10^6, 10^7, \dots, 10^{11} \text{ м}^3$ соответственно. Распределение чисел извержений в базе по их величинам W для разных по масштабу регионов от всего мира до отдельно взятого вулкана представлено в табл. 11.6 и на рис. 11.10. Из этих данных видно, что вулканические извержения, независимо от масштаба рассмотрения вулканического процесса, по своей величине распределены вполне закономерным образом: как звезды и землетрясения – чем событие сильнее, тем реже оно происходит.

Таблица 11.6. Значения углов наклонов графиков повторяемости извержений вулканов.

№	Регион	Число вулканов, N	Число извержений, n	Диапазон W	Временной интервал извержений	Угол наклона
1	Планета в целом	607	6415	1÷7	9850 до н.э. – 2006	-0.51 ± 0.04
2	Окраина Тихого океана	503	5498	1÷7	9850 до н.э. – 2006	-0.51 ± 0.04
3	Камчатка	38	443	1÷7	8050 до н.э. – 2006	-0.47 ± 0.04
4	Ключевской вулкан, Камчатка	1	93	1÷4	1697 – 2005	-0.67 ± 0.02
Среднее значение угла наклона графика повторяемости извержений						-0.5 ± 0.1

Данные о повторяемости вулканических извержений, вслед за [Токарев, 1987], позволяют, в принципе, ставить задачу об энергетической классификации вулканических извержений.

Наиболее активным вулканическим регионом планеты является окраина Тихого океана (табл. 11.6). Вдоль узкого вулканического пояса – тихоокеанского огненного кольца, расположены $N = 503$ вулкана - 83% всех вулканов планеты, извергавшиеся за последние 12 тыс. лет $n = 5498$ раз (рис. 11.11 а). Из общего числа извержений вулканов планеты с $W \geq 5$ и с $W \geq 6$ на долю таких же по объему извержений тихоокеанских вулканов приходится 86% и 95% соответственно (рис. 11.11 б).

Данные о тихоокеанских вулканических извержениях с $W \geq 6$ в 250 до н.э. – 1991 гг. представлены табл. 11.7.

О периодичности вулканического процесса. Методом Фурье-анализа исследовалось распределение чисел вулканических извержений по временным интервалам между ними. Оказалось, что по данным мирового каталога такое распределение содержит гармоническую составляющую, содержащую периоды 1600 и 2400 лет [Акманова, 2008].

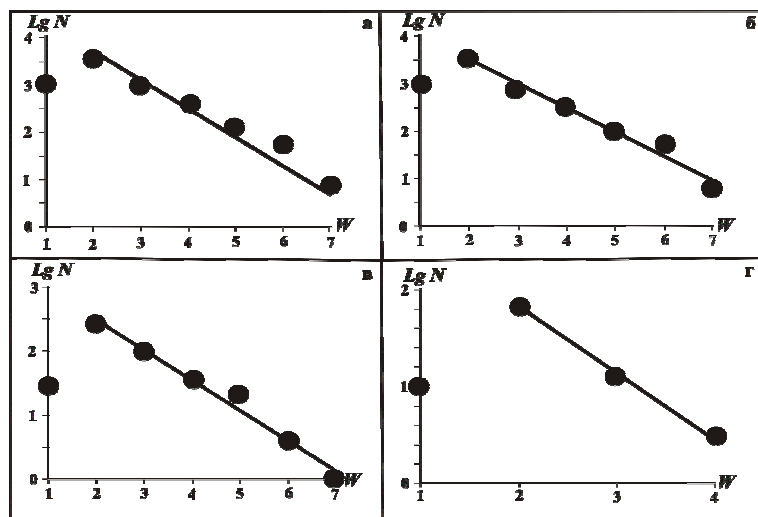


Рис. 11.10. Распределение чисел вулканических извержений по их величинам W – графики повторяемости вулканических извержений, построенные по данным на различных масштабных уровнях: вся планета в целом (а), окраина Тихого океана (б), Камчатка (в) и Ключевской вулкан на Камчатке (г). Характеристика каждой выборки данных приведена в табл. 11.6.

С целью выявления периодов меньшей продолжительности исследовалось распределение чисел вулканических извержений аналогично тому, как это делалось для землетрясений (см. главу 3, раздел «О повторяемости землетрясений»): с разбиением всего (за 12 тыс. лет) и каждой из его половин (по 6 тыс. лет каждая) каталога вулканических извержений на различные выборки событий: планета в целом, Тихоокеанские извержения и извержения других регионов, Восточная и Западная окраины Тихого океана. Анализ показал, что выявленные значения периодов вулканического процесса заключены в широком диапазоне от 170 до 2700 лет. Периоды продолжительностей, меньших 170 лет, очевидно, вследствие малочисленности исходных данных, выявить не удалось.

Исходные данные и первичный анализ был выполнен студентами четвертого курса КамчатГТУ кафедры Информатики во время выполнения курсовой работы в ИВиС ДВО РАН летом 2008 г. За что автор выражает им признательность.

И числа выявленных периодов и их значения для каждой выборки оказались различными. Однако все выборки содержат все три, два или один из трех периодов, продолжительности которых заключены в следующих диапазонах:

$$T_1 \approx 198 \pm 17 \text{ лет}, \quad (11.46.1)$$

$$T_2 \approx 2T_1 \approx 376 \pm 12 \text{ лет}, \quad (11.46.2)$$

$$T_3 \approx 4T_1 \approx 762 \pm 17 \text{ лет}. \quad (11.46.3)$$

Приведенные в табл. 11.7 данные показывают, что выявленные статистическим анализом периоды действительно наблюдаются. Так, с интервалом по продолжительности близким $\approx 2T_3$, извергался вулкан Кракатау в 416 и 1883 гг., $\Delta T = 1402$ лет (табл. 11.7, №№ 9, 26). Примерно через такие же интервалы извергались рядом расположенные вулканы Амбрим в 50 г. и Кувае в 1452 г., $\Delta T = 1497$ лет, Новые Гибриды (табл. 11.7, №№ 3, 20), и вулканы Кагуяк в 415 г. и Новарупта (Катмай) в 1912 г., $\Delta T = 1497$ лет на Аляске (табл. 11.7, №№ 8, 27). Интервал между извержениями рядом расположенных камчатских вулканов Ксудач в 240 г. и Опала в 610 г. составил $\Delta T = 370$ лет $\approx T_2$.

Таблица 11.7. Данные об извержениях с $W \geq 6$ тихоокеанских вулканах в 250 до н.э. – 1991 гг. [Викунин, Водичар, Мелекесцев и др., 2007; Гушечко, 1979; Simkin, Siebert, 1993]

№ п.п.	Дата извержения (год, месяц, день)	Широта, φ	Долгота, λ	W	Название вулкана	Район
1	-250 до н.э.	-29.27	-177.92	6	о-в Раоул	Новая Зеландия
2	-100 до н.э.	53.43	-168.13	6	Окмок	п-ов Аляска
3	50	-16.25	168.12	6	Амбрим	Новые Гибриды
4	60	61.38	-141.75	6	Чурчилл	п-ов Аляска
5	110.00.00	61.25	-141.70	6	Бона	п-ов Аляска
6	180.00.00	-38.82	176.00	7	Таупо	Новая Зеландия
7	240.00.00	51.8	157.53	6	Ксудач	Камчатка
8	415.00.00	58.61	-154.03	6	Кальдера Кагуяк	п-ов Аляска
9	416.00.00	-6.1	105.42	6	Кракатау	Индонезия
10	450.00.00	13.67	-89.05	6	Илопанго	Сальвадор
11	540.00.00	-4.27	152.2	6	Рабаул	о. Н.Британия
12	610.00.00	52.54	157.34	6	Опала	Камчатка
13	700.00.00	61.38	-141.75	6	Чурчилл	п-ов Аляска
14	710.00.00	-5.58	150.52	6	Паго	о. Н.Британия
15	740.00.00	61.25	-141.70	6	Бона	п-ов Аляска
16	800.00.00	-5.06	150.11	6	Дакатау	о. Н.Британия
17	930.00.00	21.13	-104.51	6	Цеборуко	Мексика
18	1030.00.00	-6.09	155.23	6	Билли Митчелл	о. Бугенвиль
19	1280.00.00	-0.85	-78.9	6	Куилотоа	Эквадор
20	1452.00.00	-16.83	168.54	6	Кувае	Новые Гибриды
21	1580.00.00	-6.09	155.23	6	Билли Митчелл	о. Бугенвиль
22	1600.02.19	-16.61	-70.85	6	Хуанапутина	Перу
23	1660.00.00	-5.36	147.12	6	о-в Лонг	Новая Гвинея
24	1815.00.00	-8.25	118	7	Тамбора	Ява
25	1835.01.20	12.98	-87.57	6	Косигвина	Никарагуа
26	1883.05.20	-6.1	105.42	6	Кракатау	Индонезия
27	1902.10.24	14.76	-91.55	6	Санта Мария	Гватемала
28	1912.06.06	58.27	-155.16	6	Новарупта	п-ов Аляска
29	1932.04.10	-35.65	-70.76	6	Сьерро Азул	Чили
30	1991.04.02	15.13	120.35	6	Пинатубо	Филиппины

Примечание: «-» южная широта и западная долгота вулкана, W – величина извержения.

Полученные данные показывают, что и структура гармонической составляющей и значения характерных периодов вулканического процесса, по сути, повторяют такие же параметры сейсмического процесса: выявленные кратные друг другу вулканические периоды (11.46.1), (11.46.2) и (11.46.3) оказались близкими сейсмическим периодам (3.22.2), (3.22.3) и (3.22.4) соответственно.

Как видим, вулканический и сейсмический процессы имеют много общих и даже тождественных свойств, по сути - волновых. Действительно. Вулканический процесс, как и сейсмический, является планетарным процессом и содержит гармоническую составляющую с кратными периодами. Вулканические извержения, как и землетрясения, по своей величине (энергии) распределены вполне закономерно - в соответствии с однотипными графиками повторяемости. Тихоокеанский вулканический пояс – огненное кольцо, как и тихоокеанский сейсмический пояс, является наиболее активным поясом планеты. Вулканический и сейсмический тихоокеанские пояса расположены параллельно друг другу на всем своем протяжении, при этом на западном сегменте окраины «корни» вулканов «прошивают» сейсмофокальную зону на глубинах около 150 км. Скорости миграции вулканической

активности (11.45) расположены в том же диапазоне значений, что и скорости миграции землетрясений (рис. 11.2, соотношения (11.4) – (11.7)).

Все приведенные сейсмические и вулканические данные свидетельствуют не просто о наличии некоторых общих свойств у сейсмического и вулканического процессов. Эти данные по своему физическому содержанию вполне определенно указывают на существование единого энергетического источника для вулканического и сейсмического процессов, протекающих в пределах окраины Тихого океана. При этом вывод о едином источнике становится все более очевидным при переходе к рассмотрению совокупностей, содержащих все более сильные вулканические и сейсмические события. Например, извержения-«погодки» вулканов Кагуяк в 415 г. на Аляске и Кракатау в 416 г. в Индонезии (табл. 11.7, №№ 8, 9), отстоящих друг от друга примерно на $15 \cdot 10^3$ км, по аналогии с сильнейшими сейсмическими событиями (см. предыдущие разделы этой части), можно считать парой извержений.

Таким образом, можно ожидать, что наиболее сильные вулканические извержения, как и сильнейшие землетрясения, мигрируют вдоль окраины Тихого океана по часовой стрелке со скоростями, близкими по величине скоростям миграции сильнейших землетрясений.

Миграция вулканических извержений вдоль окраины Тихого океана. Данные об извержениях с $W \geq 6$ (объемом извергнутого материала 10 км^3 и более) тихоокеанских вулканов за интервал 250 до н.э. – 1991 гг. приведены в табл. 11.7; их расположение представлено на рис. 11.11. Видно, что общая протяженность линии, вдоль которой сосредоточены тихоокеанские вулканы, от крайнего на западе вулкана Бак Айленд (Антарктика) до крайнего на востоке вулкана Десепшен (Южная Америка), составляет $L = 45400$ км (рис. 11.11 а). Протяженность линии, вдоль которой расположены вулканы, извергавшиеся с $W \geq 6$, от вулкана Таупо, Новая Зеландия (табл. 11.7, № 6) до вулкана Сьерро Азул, Чили (табл. 11.7, № 29) составляет 41400 км (рис. 11.11 б).

Исследование свойств распределения в пространстве и во времени вулканических извержений с $W \geq 6$ проводилось на плоскости с осями расстояние вдоль окраины L – время извержения t . Данные, приведенные на рис. 11.12, показывают, что все вулканические извержения (93%, 28 из 30) группируются вдоль двух достаточно узких областей (I, II) примерно параллельных друг другу - скорости миграции $V_{1,2}$ вдоль которых примерно равны между собой:

$$V_I \approx 7,2 \pm 4,0 \text{ км/год}, V_{II} \approx 4,3 \pm 2,0 \text{ км/год}, V \approx \frac{1}{2}(V_I + V_{II}) \approx 5 \pm 2 \text{ км/год}. \quad (11.47)$$

Продолжительность характерного периода T_4 такой миграции вулканических извержений вдоль окраины Тихого океана определяется из очевидного равенства:

$$V \cdot T_4 = \frac{L}{2} \approx 2 \cdot 10^4 \text{ км}, \quad (11.48)$$

где $L = 4,5 \cdot 10^4$ км – протяженность тихоокеанского огненного кольца. Ясно, что в случае, если возможна миграция вулканических извержений с другой скоростью, скажем со скоростью a , то в рамках периодического вулканического процесса характерный период T_a также должен соответствовать уравнению (11.48):

$$a \cdot T_a = \frac{L}{2}. \quad (11.49)$$

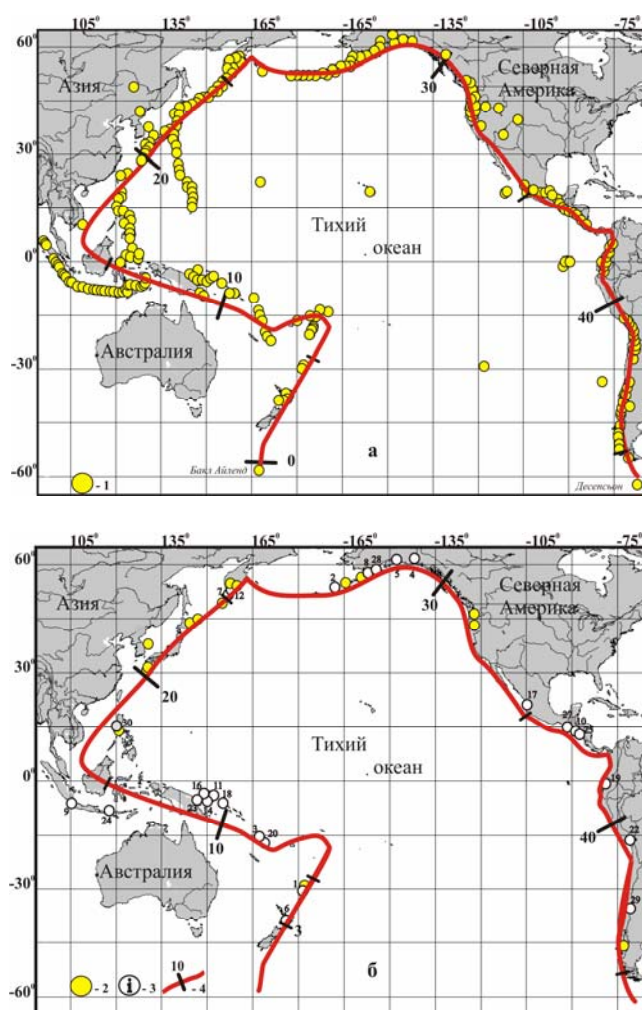


Рис. 11.11. Вулканическая активность окраины Тихого океана за последние 12 тыс. лет. а – вулканы с извержениями $1 \leq W \leq 7$, б – вулканы, извергавшиеся с $W \geq 6$. 1 – вулканы, хотя бы один раз извергавшиеся с $W \geq 1$; 2, 3 – вулканы, извергавшиеся с $W \geq 6$ в 9850 – 251 гг. до н.э. и в 250 до н.э. – 1991 гг. соответственно, i – номер вулканического извержения согласно данным табл. 11.7; 4 – линия, вдоль которой определялась координата L вулканических извержений, градация расстояний соответствует $5 \cdot 10^3$ км.

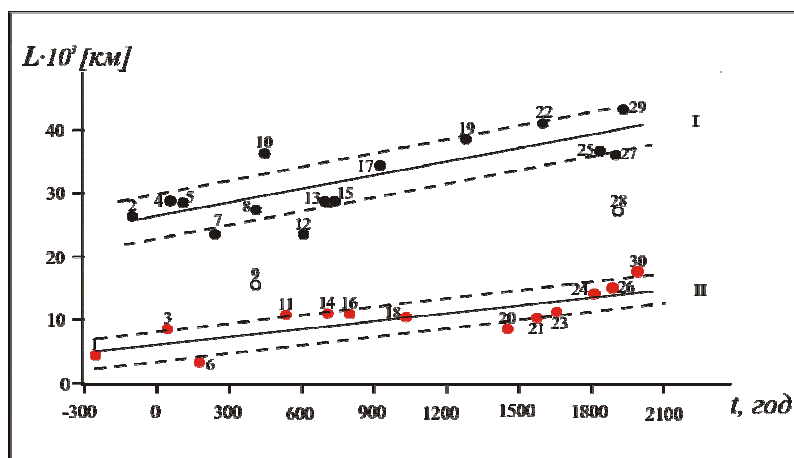


Рис. 11.12. Расположение тихоокеанских вулканов с $W \geq 6$ извержениями на плоскости с осями L - расстояние вдоль окраины, t – время. Пустыми кружками обозначены извержения (№№ 9, 28), данные о которых не использовались при определении зависимостей I и II (11.47). Цифры соответствуют номерам вулканических извержений в табл. 11.7.

Анализ показывает, что миграция тихоокеанских вулканических извержений с $W \geq 6$ со скоростями, отличными от (11.47) возможна. Пример такой миграции представлен на рис. 11.13. Из данных этого рисунка видно, что все 30 вулканических тихоокеанских извержений с $W \geq 6$ в течение последних 2250 лет оказывается возможным разместить вдоль таких цепочек, скорости миграции a вдоль которых и характерный период T_a удовлетворяют соотношению (11.49):

$$a = 60 \pm 10 \text{ км/год}, T_a = 330 \pm 50 \text{ лет}. \quad (11.50)$$

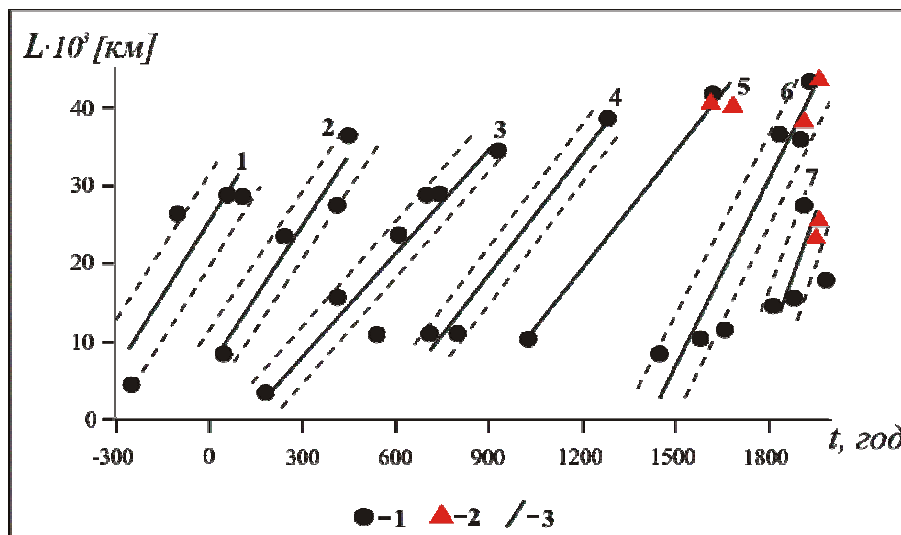


Рис. 11.13. Пример «быстрой» миграции вулканических извержений в пределах окраины Тихого океана со скоростью около 60 км/год . 1 – вулканические извержения, 2 – эпицентры землетрясений с $M_W \geq 8,8$, 3 – линии миграции, определенные методом наименьших квадратов; цифрами обозначены номера миграционных цепочек, параметры которых приведены в табл. 11.8

Действительно, как следует из данных табл. 11.8 среднеквадратичный разброс каждого из этих значений невелик и составляет не более 15-16%, что может служить доказательством миграции со скоростью a .

Таблица 11.8. Параметры цепочек «быстрой» миграции вулканических извержений в пределах окраины Тихого океана с учетом данных о землетрясениях с $M_W \geq 8,8$.

p	k	$a, \text{ км/год}$	$T_a, \text{ год}$
1	4	63 ± 24	
2	4	61 ± 12	302
3	7	44 ± 7	375
4	3	51 ± 8	351
5	4	50 ± 5	273
6	8	80 ± 10	418
7	6	50 ± 40	278
Среднее	5 ± 2	57 ± 9	$T_a \approx 333 \pm 49$

Примечание: p – порядковый номер цепочек мигрирующих вулканических извержений, представленных на рис. 11.13; k – количество извержений вулканов и эпицентров землетрясений в цепочке мигрирующих событий; a – значение «угла наклона» цепочки – скорости миграции; T_a – интервалы времени между миграционными цепочками, определенные по их «центральной» частям на уровне $L/2 \approx 22500 \text{ км}$.

$$T_a \approx T_2 \quad (11.51)$$

указывает на то, что «быстрый» процесс миграции, представленный на рис. 11.13, по сути, является суперпозицией «медленной» миграции (11.47) и повторяемости извержений с периодом T_2 (11.42.2).

О связи вулканизма и сейсмичности. Полученные оценки (11.46) – (11.51) могут рассматриваться как подтверждение вывода о волновой природе вулканического процесса в пределах окраины Тихого океана, сформулированного в работе [Викулин, 2003].

Значение скорости миграции вулканических извержений (11.50) по порядку величины совпадает со скоростью миграции сильнейших тихоокеанских землетрясений (соотношение (11.5), рис. 11.2). На рис. 11.13 нанесены эпицентры наиболее сильных ($M_w \geq 8,8$) тихоокеанских землетрясений 1615-1964 гг., которые, как видно из рисунка, достаточно хорошо «вписываются» в процесс миграции вулканических извержений. Сильнейшее землетрясение 7.05.1986, $M = 7,7$ с очагом в районе Крысых островов, предвращавшееся цепочкой мигрирующих вдоль алеутской дуги извержений вулканов, являвшихся, по сути, форшоковым явлением, отмечено в работе [Sauers, 1986].

Предельные по силе и интенсивности сейсмо-вулканические дуплеты отмечались на планете неоднократно. Два из них отмечены в конце XIX – начале XX вв. на Аляске и Камчатке. Так в заливе Якутат 6-10.09.1899 произошла серия из четырех сильнейших землетрясений с $M = 8,3; 7,8; 8,6; 8,3$, а в июне 1912 в результате извержения вулкана Новарупта (Катмай) на Аляске (табл. 11.7, № 27) было выброшено 16 км^3 пород. На юге Камчатки 25-27.06.1904 произошло три сильнейших землетрясения с $M = 8,0; 8,1; 7,9$ [Гусев, Шумилина, 2004], а в марте 1907 в результате извержения вулкана Ксудач было выброшено $1,5 - 2 \text{ км}^3$ пород, $W = 5$ [Мелекесцев, Сулержицкий, 1987].

Однако наиболее отчетливо тесная взаимосвязь сейсмичности и вулканизма проявилась в результате природной катастрофы 1737 – 1742 гг. на Камчатке [Мелекесцев и др., 2005, с. 553-568]. В течение этого периода извержения происходили вдоль всей ($\approx 670 \text{ км}$) Восточной вулканической зоны Камчатки и в Срединном хребте. Извергались или находились в стадии повышенной активности, как минимум, 15 вулканов. Суммарный объем продуктов извержений только пяти вулканов, для которых выполнены расчеты, составил около 1 км^3 ($W \approx 5$) [Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007].

В начале этого периода в 1737 г. имела место серия сильнейших с $M_w = 9,2; 7,8; 8,0$ [Гусев, Шумилина, 2004] землетрясений, очаги которых «охватили» участок тихоокеанского побережья протяженностью около 1000 км от Северных Курильских островов до Усть-Камчатска. Самое сильное из них, произошедшее 17.10.1737, сопровождалось сильнейшими (до 2-4 м) деформациями береговой линии на протяжении 35 км в районе г. Петропавловска-Камчатского и цунами с высотой заплеска до 60 м . Сильные вулканические землетрясения с магнитудами до $M = 7$ сопровождали отмеченные извержения вулканов.

Помимо значительных деформаций земной поверхности и цунами, еще одним следствием происшедших катастрофических землетрясений была исключительно высокая деятельность гидротерм на всей Камчатке.

Описанный интенсивный сейсмо-вулканический процесс на Камчатке в 1737 – 1742 гг. И.В. Мелекесцевым был отмечен как «региональное «согласие» между вулканизмом и сейсмичностью» [Мелекесцев и др., 2005, с. 562].

Корреляция сильнейших вулканических и сейсмических событий, иллюстрируемая данными на рис. 11.13, показывает, что такое «согласие» сейсмичности и вулканизма, по-видимому, имело место и для других окраин Тихого океана.

Все эти данные позволяют усилить сформулированный выше вывод о волновой природе вулканического процесса. А именно: волны миграции сейсмической и вулканической

активности являются, по сути, проявлениями в разных геофизических полях единого сейсмо-вулканического волнового процесса, протекающего в пределах тихоокеанского геодинамического пояса.

Волновая геодинамика

О вращательном движении тектонических плит. Многочисленные примеры тектонического вращательного движения отдельно взятых блоков (рис. 10.2 - 10.5) и их совокупностей (рис. 11.1) приведены в главе 10. Примеры поворотов сейсмофокальных блоков (сеймотектоническое вращение) и микроплит приведены в разделе «Ротационно-упругие волны». Имеются данные и о вращательном движении протяженных тектонических плит и платформ.

Интересные данные о вращательном движении самой большой (с характерным «радиусом», измеряемым вдоль поверхности Земли $R \approx 10^4$ км) на планете Тихоокеанской плиты приведены в [Маслов, 1996]. Согласно А. Такеучи [Takeuchi, 1985, 1986], с середины олигоцена по настоящее время имели место пять перестроек регионального поля напряжений, которые характеризовались изменениями его величины и ориентации (рис. 11.14). Периодам 30-23, 16-13, 6-0 млн лет отвечает субширотное сжатие (P); периодам 22-17, 12-7 млн лет - субширотное растяжение (T). На этом же рисунке приведена кривая угловых осцилляций вектора скорости Тихоокеанской плиты, полученная в работе [Jackson, Shaw, Bargar, 1975]. В этой же работе показано, что вектор движения Тихоокеанской плиты, определяемый простиранием Гавайской вулканической цепи (составляющее примерно 70° с направлением на север), испытывает периодические повороты по и против часовой стрелки. В результате, Тихоокеанская плита совершает знакопеременные вращательные движения с центром в Гавайской горячей точке. Амплитуда угла вращения по [Takeuchi, 1986] составляет примерно 10° , что на радиусе, соединяющем о. Гонолулу с Тихоокеанским подвижным поясом, равносильно смещениям до нескольких сотен километров [Маслов, 1996].

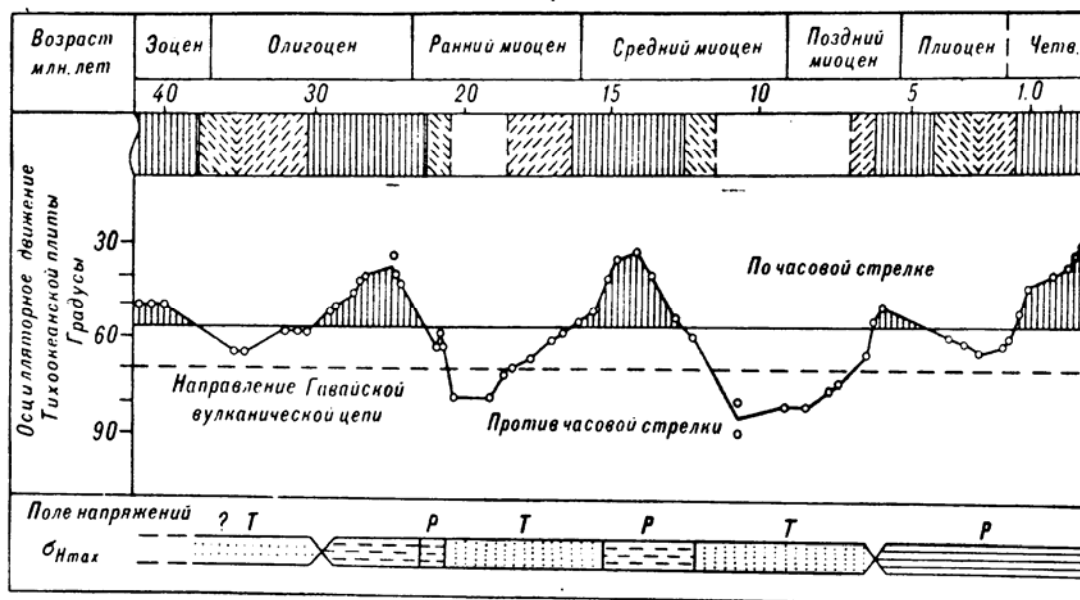


Рис. 11.14. Изменение регионального поля напряжений о. Хонсю во времени по [Маслов, 1996]. P , T – девиаторное сжатие и растяжение соответственно. Приведена кривая угловых осцилляций вектора скорости Тихоокеанской плиты по [Jackson, Shaw, Bargar, 1975]. Вертикальная штриховка на графике указывает на кульминационные моменты эпизодов вращения по часовой стрелке, фиксируемые фазами изменения тектонических напряжений в пределах Тихоокеанского пояса [Тверитинова, Викулин, 2005].

Убедительные комплексные геолого-геофизические данные о вращении Микроплиты Пасха ($R \approx 200$ км, 25^0 ю. ш.), расположенной на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия между плитами Наска, на западе, Пасифик, на востоке, приведены в [Международный..., 2003, с. 56]. «Вихревой» характер вращательного движения этой микроплиты отчетливо прослеживается на тектонической схеме, построенной по механизмам очагов землетрясений, данным батиметрической карты и карты остаточных аномалий магнитного поля и аномалий силы тяжести в свободном воздухе. Микроплита вращается против часовой стрелки со «скоростью около $15^0/\text{млн лет}$ и уже повернулась почти на 90^0 со времени своего образования». Следы вихревых движений отчетливо проявляются на батиметрической карте и карте аномального магнитного поля микроплиты Хуан-Фернандос ($R \approx 150\text{-}200$ км, 33^0 ю.ш.), которая расположена на гребне Восточно-Тихоокеанского поднятия на 500 км южнее плиты Пасха на стыке трех плит Наска, на западе, Пасифик, на востоке, и Антарктической, на юго-западе [Международный..., 2003, с. 57].

На вращение Исландии ($R \approx 100$ км) по часовой стрелке со скоростью $7^0(\pm 2)/10\text{-}20$ тыс лет указывает изменение ориентировки доледниковых и послеледниковых зон трещинных извержений в Южной части острова [Мелекесцев, 1979, 2004]. Вихревые складки ($R \approx 100$ км) Генуя (против часовой стрелки) и Дунай (по часовой стрелке), расположенные в пределах горных дуг Альпийской системы, отмечены в [Ван Беммелен, 1991].

Примеры поворотов Восточно-Европейской платформы ($R \approx 1.2 \cdot 10^3$ км) против часовой стрелки в ордовике и триасе, Сибирской платформы ($R \approx 1.5 \cdot 10^3$ км) по часовой стрелке в триасе, юре и мелу, Омолонского массива ($R \approx 150$ км) по отношению к Сибири, наоборот, против часовой стрелки с конца юры до начала раннего мела, и вращений «отщепов» террейна Горного Крыма ($R \approx 70\text{-}100$ км) на 15^0 против часовой стрелки в титонское время, восточного крыла северной части Левантской зоны ($R \approx 400$ км) по часовой стрелке в плиоцен-четвертичное время, приведены в работе [Полетаев, 2005]. При этом для докембрия установлено «существование...вихревых систем литосферы, объединяющих в качестве своих элементов различные структуры земной коры и верхней мантии...размеры их...до 10-12 тыс. км в диаметре ($R_{\text{max}} \approx (5\text{-}6) \cdot 10^3$ км) и в виде зон глубинных разломов они проникают на глубину до 700 км и более» [Слензак, 1972, с. 4].

Как видим, вращательное и вихревое движение тектонических плит, платформ и массивов разных пространственных масштабов имеет достаточно общий характер, наблюдается в течение разных геологических эпох и затрагивает практически всю верхнюю мантию.

На вращение Индийской плиты ($R \approx 4 \cdot 10^3$ км) убедительно указывают данные по миграции очагов землетрясений как Австралийского материка [Викулин, 1994], так и сейсмического пояса, протягивающегося вдоль Океании в сторону Гималаи [Mogi, 1968], в пределах которого 26.12.2004 произошло землетрясение с $M_w \approx 9$ и катастрофическое цунами. Миграция очагов землетрясений вдоль всей окраины Тихого океана и отдельно взятых островных дуг и континентальных окраин - явление достаточно широко известное, оно, после пионерских работ Р.З. Тараканова [1961], С. Дуды [Duda, 1963] и К. Моги [Mogi, 1968], отмечалось многими и многими исследователями [Викулин, 2001, 2003, 2008а, б; Осипова, 2008]. Более того, эффект миграции землетрясений установлен для всех сейсмически активных поясов, и показано, что он является характерным свойством планетарного сейсмического процесса [Викулин, 2008а, б]. По этой причине эффект миграции очагов землетрясений, несомненно, должен быть связан с механизмом образования смещений вдоль границ плит. Согласно [Маслов, 1996], в масштабах геологического времени землетрясения, многократно обегая Тихий океан, в результате накопления остаточных деформаций могут обеспечить наблюдаемую амплитуду смещения, которая, как отмечалось выше, составляет несколько сот километров. Именно по этой причине циклическая миграция очагов землетрясений может и сопровождать

смещение всего Тихоокеанского сегмента, и в определенной степени его обеспечивать.

Полная подборка данных о миграции тихоокеанских землетрясений представлена в [Викулин, 2003; Осипова, 2008]. Оказалось, что вся совокупность этих данных может быть интерпретирована в виде солитонных (soliton, S) и экситонных (exciton, E) решений «сейсмического» модельного нелинейного уравнения син-Гордона, волновые свойства которого обусловлены ротацией планеты Ω [Викулин, 2008а, б; Осипова, 2008]. При этом энергии волновых миграционных решений E и величины их скоростей V оказались взаимосвязанными в рамках типичных для таких «геофизических» [Быков, 2000, 2005; Вуков, 2008] нелинейных [Давыдов, 1982; Николаевский, 2008]) уравнений (рис. 11.2, соотношения (11.37), (11.41) – (11.43)).

Миграция землетрясений является характерным свойством сейсмического процесса, протекающего в пределах всех сейсмических поясов планеты [Викулин, 2008а, б; Mogi, 1968]. Поэтому волновые ротационно обусловленные решения (11.41) и (11.42), установленные для тихоокеанского пояса, должны быть характерными для границ всех тектонических плит.

Энергия тектонического процесса. Энергия тектонического процесса, очевидно, определяется (массами) размерами L плит (и блоков) и скоростями V их движения. Из самых общих соображений следует, что существование зависимости $L(V)$ является принципиальным моментом, по сути, определяющим физику механизма перемещения тектонических плит вдоль поверхности Земли. Действительно, в случае существования зависимости между такими (вообще говоря, векторными) величинами, однозначно определяющими величины энергий движущихся плит, появляются все основания для предположения о моментной природе тектонического процесса, протекающего на вращающейся планете.

В такой плоскости вопрос об энергии тектонического процесса был поставлен в работах [Викулин, Тверитинова, 2007; Тверитинова, Викулин, 2005; Vikulin, Tveritinova, 2008]. В неявном виде анализ особенностей проявления тектонической энергии проводился. Действительно, во-первых, в настоящий момент вопрос о существовании зависимости $L(V)$ является проблематичным: имеются аргументы как против [Кукал, 1987], так и за [Ле Пишон, 1974; Морган, 1974]. Во-вторых, аргументом в пользу моментной природы тектонического процесса на Земле, на наш взгляд, является установленная корреляция между «средним полярным расстоянием плит» и скоростями субдукции [Жарков, 1983; Forsyth, Uyeda, 1975] и спрединга [Жарков, 1983; Морган, 1974].

Анализ полученных и собранных Т.Ю. Тверитиновой данных о размерах плит и скоростях их движения вдоль границ за последние 150 млн лет позволил получить следующие результаты (Викулин, Тверитинова, 2004). Во-первых, по совокупности всех ($N=61$) имеющихся в нашем распоряжении данных о протяженностях зон и скоростях субдукции (табл. 11.9, $N_1 = 12$; табл. 11.10, $N_2 = 17$), рифтинга и спрединга (табл. 11.11; $N_3 = 5$; табл. 11.12; $N_4 = 24$; табл. 11.13; $N_5 = 3$) в их пределах, статистически значимая зависимость $L(V)$ не выявляется: поле экспериментальных точек на плоскости с осями L - V в диапазонах размеров $650 < L$ [км] < 18000 и скоростей $5 < V$ [мм/год] < 112 равномерно заполняет площадку примерно круговой формы (рис. 11.15а). Во-вторых, анализ только данных о скоростях рифтинга и спрединга (PC -данные), представленных табл. 11.11 и 11.12 ($N=29$) и на рис. 11.15б, позволяет достаточно уверенно выявить следующую статистически значимую зависимость:

$$Lg L_1 [\text{км}] (\pm 0.33) = (0.43 \pm 0.15) \cdot Lg V_1 [\text{мм/год}] + (3.17 \pm 0.26). \quad (11.52)$$

В-третьих, по достаточно представительным (с числом данных 4 и более: строки 2-5 в табл. 11.11 и столбцы в 2-4 табл. 11.12) совокупностям PC -данных, представленных данными в пределах меньших по продолжительности интервалов, определяются близкие друг другу зависимости (табл. 11.14):

$$Lg L_2 [\text{км}] (\pm 0.3) = (0.7 \pm 0.3) \cdot Lg V_2 [\text{мм/год}] + (2.9 \pm 0.5). \quad (11.53)$$

При этом отклонение представленных столбцами 6 и 7 табл. 11.12 данных от средней зависимости (11.53) не превышает ее дисперсии. В-четвертых, статистически значимая зависимость $Lg L(Lg V)$ только для «субдукционных» (С) данных ($N = 32$, табл. 11.9, 11.10, 11.13) не выявляется (рис. 11.15в). Определение всех зависимостей $Lg L(Lg V)$, представленных на рис. 11.15 и в табл. 11.14, проводилось методом наименьших квадратов.

Проведенный анализ данных о протяженностях рифтинг-спрединговых зон и скоростях движения границ плит в их пределах указывает на существование двух механизмов с характерными временами около 150 (144-163) млн лет для (11.52) и примерно 20 (5-33) млн лет для (11.53).

Таблица 11.9. Значения скоростей субдукции [Кукал, 1987, с. 41].

N п. п.	Область	Пододвигание литосферных плит	Длина зоны, L , км	Скорость субдукции, V , мм/год
1	Курилы, Камчатка, Хонсю	Тихоокеанская под Евразийскую	2800	75
2	О-ва Тонга и Кермадек, Новая Зеландия	Тихоокеанская под Индийскую	3000	82
3	Центральная Америка и Мексика	Кокос под Северо-Американскую	2800	95
4	Алеутские о-ва	Тихоокеанская под Северо- Американскую	3800	35
5	Ява, Суматра, Бирма	Индийская под Евразийскую	5700	67
6	Южные Сандвичевы о-ва	Южно-Американская под Скоша	650	19
7	Карибское море	Южно-Американская под Карибскую	1350	5
8	Эгейское море	Африканская под Европейскую	1550	27
9	Соломоновы о-ва, Новые Гибриды	Индийская под Тихоокеанскую	2750	87
10	О-ва Бонин и Марианские	Тихоокеанская под Филиппинскую	4450	12
11	Иран	Аравийская под Евразийскую	2250	45
12	Индия	Индийская под Евразийскую	(2700)	55

Примечание. Значение в скобках – определение длины зоны, принятое в расчетах авторами [Тверитинова, Викулин, 2005].

Отметим, что корреляционная зависимость $Lg L \approx Lg V$, близкая соотношению (11.53), была получена в работах [Айзекс, Оливер, Сайкс, 1974; Жарков, 1983; Морган, 1974] для процессов как спрединга, так и субдукции. Форма («вытянутость») и минимаксные значения «субдукционной» (рис. 11.15в) и «рифтинг-спрединговой» (рис. 11.15б) областей расположения исходных точек являются близкими. Отличаются эти области разными плотностями точек: РС-данные распределены по всей области достаточно равномерно, в то время как С-данные с большей плотностью сосредоточены в области предельно больших значений протяженностей зон. Представляется, что участки зон субдукции малой (1000 - 2000 км и менее) протяженности исследованы недостаточно полно, в результате чего для них имеет место искусственный «дефицит» данных. Другими словами, проведенный в настоящей работе анализ и данные, полученные другими

исследователями, на наш взгляд, показывают, что выявленные в работе два механизма являются характерными для тектонического процесса вообще, включая и процесс субдукции.

Таблица 11.10. Параметры зон субдукции по данным работ [Гатинский, Рундквист, Влагова и др., 2000; Твeритинова, Викулин, 2005].

№№ п.п.	Зона субдукции	Длина ост- ровой дуги над зоной субдукции, L , км	Скорость субдукции V , см/год	Возраст коры пог- ружающей плиты / номера линейных магнитных аномалий в ней	$T_1 - T_2 = \tau$, млн. лет тому назад
1	Восточно- Алеутская	1625	5.8-6.4	палеоцен - эоцен / 18-24	54 – 43 = 11
2	Западно- Алеутская	1000	7.7	палеоцен - эоцен / 20-26	59 – 45 = 14
3	Северо- Курильско- Камчатская	1125	8.3	ранний - поздний мел / 30-M0	119 – 67 = 52
4	Южно- Курильская	950	9.5	ранний мел / M1-M5	128 – 123 = 5
5	Японская (северная часть)	1700	9.5-10.3	ранний мел / M5-M16	145 – 128 = 13
6	Японская (южная часть)	875	6.2	палеоцен - средний миоцен / 6-22	51 – 20 = 31
7	Рюкю	1100	5.2-6.5	палеоцен - эоцен / 18-21	49 – 43 = 6
8	Филиппинская (южная часть)	1000	7.0-9.3	палеоцен - эоцен / 18-22	51 – 43 = 8
9	Идзу-Бонинская	1380	4.7-7.7	поздняя юра – ран-ний мел / M5-M21	154 – 128 = 26
10	Марианская	3000	3.1-3.8	поздняя юра / M21-M32	169 – 154 = 15
11	Западно- Зондская	3000	6.0-6.7	эоцен - ранний мел / 20- M4	128 – 45 = 83
12	Восточно- Зондская	2250	7.6-8.0	поздняя юра / M16-M26	163 – 145 = 18
13	Новая Британия и Соломоновы о-ва	2400	10.3	палеоцен - плиоцен / 2-26	59 – 2 = 57
14	Новые Гебриды	2000	8.5	эоцен - средний миоцен / 9-23	53 – 30 = 23
15	Тонга - Кермадек	3250	5.5-9.3	поздняя юра – ран-ний мел / M0-M16	145 – 119 = 26
16	Анды	9000	7.4-15.4	эоцен - средний миоцен / 5-22	51 – 10 = 41
17	Центральная Америка и Мексика	3125	6	средний миоцен - четвертичный / 1-6	20 – 1 = 19

Примечание. Данные в последнем столбце (временные интервалы T_1 - T_2 и их продолжительности τ) определены авторами статьи [Гатинский, Рундквист, Влагова и др., 2000] по приведенным в таблице номерам магнитных аномалий в соответствии с данными работ [Харленд, Кокс, Ллевеллин и др., 1985; Хейцлер, Диксон, Херрон и др., 1974]

Таблица 11.11 Скорости раскрытия современных океанов, определенные по «Тектонической карте мира» масштаба 1:45.000.000 [Тверитинова, Викулин, 2005].

Протяженность зоны, L , км	Ширина зон проявления процесса, H , км	Возраст зоны, T , млн лет	Скорость, V $= H/T$, мм/год	Регион
~15000	18000	160	112.5	Тихий океан
~11000	6000-8000	144	40-55	Индийский океан
~11000	6300	144	44	Атлантический океан, Центральный сегмент
~7000	5400	163	33	Атлантический океан, Южный сегмент
(18000)	(5400- 6300)	(144) 163)	(33- 44)	Атлантический океан

Примечание. Данные для всего Атлантического океана в расчетах нами не учитывались.

Таблица 11.12. Длина L , км, ширина раскрытия (минимальная и максимальная) H , км, возраста и значения скоростей V , мм/год рифтовых зон Земли, определенные Т.Ю. Тверитиновой по тектонической карте мира масштаба 1:45.000.000 [Тверитинова, Викулин, 2005].

Рифтовая система		Возраст спрединга, $T_1 - T_2 = \tau$, млн. лет					
		N_2-Q (5-0)=5	P_3-N_1 (38-5)=33	P_{1-2} (65-38)=27	K_2 (98-65)=33	K_1 (144-98)= 46	J_3 (163-44)= 19
1		2	3	4	5	6	7
Срединно-Атлантическая	L	18000	18000	18000	16000	13500	3800
	H	180-360	540-1440	540-1260	1350-2700	720-1440	720-1260
	V	36-72	16-44	20-47	41-82	16-31	38-66
Срединно-Индоокеанская	L	11000	11000	11000	9000	—	—
	H	180-1080	180-1620	180-1800	450-1800	—	—
	V	36-260	5-19	7-70	14-55	—	—
Восточно-Тихоокеанская	L	14400	14400	14400	14400	14400	5400
	H	450-1800	1800-4500	2250-3150	2250-4590	2700-5400	> 5400
	V	90-360	50-136	83-117	68-139	59-117	> 284
Западно-Тихоокеанская	L	5000	—	5000	3150	—	—
	H	180-270	—	180-360	1350-1800	—	—
	V	36-52	—	7-13	41-55	—	—
Северн. Ледовитого океана	L	1800	1800	1800	—	—	—
	H	180-450	180-450	360-720	—	—	—
	V	36-90	5-14	13-27	—	—	—
Байкаль-ская	L	900	—	—	—	—	—
	H	45-90	—	—	—	—	—
	V	9-18	—	—	—	—	—
Красно-морская	L	4000	3150	—	—	—	—
	H	45-135	180-270	—	—	—	—
	V	9-27	5-8	—	—	—	—

Примечания. Возраста спрединга определялись по [Харленд, Кокс, Ллевеллин и др., 1985]; ширина раскрытия зоны определялась по минимальному и максимальному замеру ширины зоны поперечно к направлению рифтовой зоны; длина зоны определялась по длине зоны с соответствующим временным интервалом; если вдоль зоны фиксируется спрединг разных временных интервалов, то длина зоны с какого-то момента остается постоянной.

Для определения тектонической энергии движущейся плиты будем полагать, что ее кинетическая энергия равна $E = \frac{1}{2} m V^2$, где $m \approx \rho L^\alpha$ – масса плиты, ρ – ее объемная ($\alpha = 3$), площадная ($\alpha = 2$) или линейная ($\alpha = 1$) плотность. Тогда, дифференцируя выражение для энергии, заменяя в полученном дифференциальном уравнении dL через dV , определяемое из соотношений $LgV \approx \beta LgV$, и интегрируя полученное соотношение, для

величины энергии движущейся со скоростью V плиты протяженностью L , получим выражение $E/E_0 = (V/V_0)^{(2+\alpha\beta)}$ или

$$E \approx V^{(2+\alpha\beta)}, \quad (11.54)$$

где $\beta \approx 0.45 \pm 0.13$ для механизма, описываемого соотношением (11.52), и $\beta \approx 0.7 \pm 0.3$ для (11.53); $E_0 = \frac{1}{2} \rho L_0^\alpha V_0^2$, L_0 и V_0 – энергия, протяженность плиты и скорость движения ее границы в момент начала процесса.

Таблица 11.13. Скорости спрединга, рассчитанные Т.Ю. Тверитиновой по данным работ [Ле Пишон, 1974; Хейцлер, Диксон, Херрон и др., 1974].

Океан	Протяженность зоны, L , км	n	V , мм/год
Тихий	13600	12	40 ± 12
Атлантический	12400	10	17 ± 14
Индийский	9100	7	18 ± 7

Примечание: n – число экспериментальных определений скоростей субдукции для каждой из зон, V – средние значения скоростей субдукции, принимаемые нами в расчетах, и среднеквадратичные отклонения.

Таблица 11.14. Параметры зависимостей $LgL(LgV)$, характеризующих протяженности зон как функции скоростей рифтинга и спрединга для разных геологических отрезков времени [Тверитинова, Викулин, 2005].

N п. п.	Число данных, N	Временной интервал $T_1 - T_2$, млн. лет	Продолжи- тельность интервала, τ , млн. лет	$LgL(\pm s_0) = (a \pm s_a) \cdot LgV + (b \pm s_b)$, L , км, V , мм/год
1	7	5 – 0	5	$LgL(\pm 0.38) = (0.8 \pm 0.4) \cdot LgV + (2.4 \pm 0.6)$
2	5	65 – 38	27	$LgL(\pm 0.37) = (0.7 \pm 0.4) \cdot LgV + (2.9 \pm 0.8)$
3	9	38 – 5; 98 – 65	33	$LgL(\pm 0.31) = (0.6 \pm 0.2) \cdot LgV + (3.1 \pm 0.4)$
	Всего: 21		Средние, $n = 3$:	$0.3 \pm 0.1 \quad 0.7 \pm 0.3 \quad 2.9 \pm 0.5$

Примечание. Исходные данные представлены табл. 11.12.

Из соотношений (11.52), (11.53), (11.54) видно, что зависимости для энергий плит от величин их скоростей движения для каждого из механизмов существенно различаются. Действительно, в «предельных» случаях, для механизмов (11.53), когда $\beta_{max} \approx 1$ при $\alpha_{max} \approx 2.5$ ($2 < \alpha < 3$, например, при малых временах имеем зарождение плиты), и (11.52), когда $\beta_{min} \approx 0.3$ при $\alpha_{min} \approx 1$ (например, при больших временах размер плиты увеличивается практически в одном направлении), соответственно получаем:

$$E_1 \approx V_1^{2+3}, \quad (11.55)$$

$$E_2 \approx V_2^{4+5}. \quad (11.56)$$

Тектонические волны. Существование тектонических волн не вызывает сомнений, проблематичной является их природа [Быков, 2005]. В настоящее время отсутствует

общепринятое определение понятия «тектоническая волна». Поэтому чтобы не вводить новый термин везде ниже под тектоническими волнами будем понимать такие геодинамические возмущения, которые соответствуют движению совокупности тектонических плит Земли.

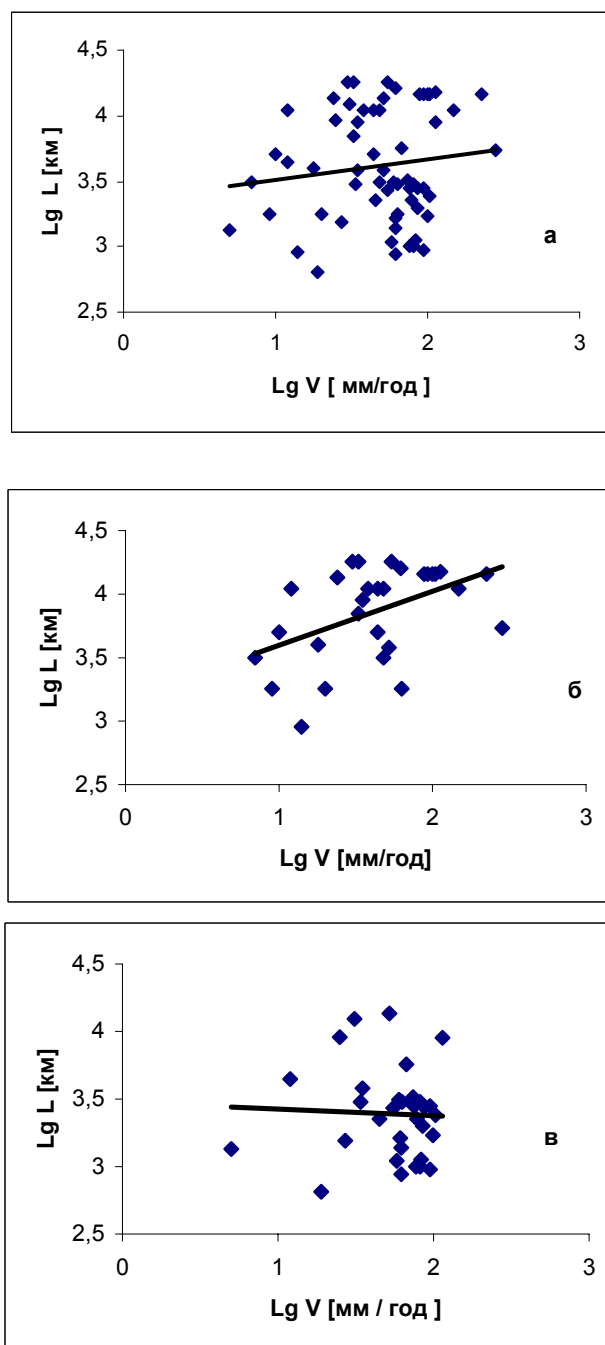


Рис. 11.15. Данные, характеризующие зависимость $Lg L(Lg V)$ между протяженностями плит L и скоростями их движения V по [Тверитинова, Викулин, 2005]. a – скорости субдукции, рифтинга и спрединга ($N=61$); $б$ – скорость рифтинга и спрединга ($N=29$); $в$ – скорости субдукции ($N=32$).

Можно видеть, что полученные выше тектонические соотношения (11.52) и (11.53) и/или (11.55) и (11.56) являются близкими аналогичным сейсмическим соотношениям (11.6.2) и (11.4.2) и/или (11.6.1) и (11.4.1), т.к. соответствующие коэффициенты и показатели степеней оказались равными друг другу. Отмеченное совпадение не случайно и достаточно хорошо согласуется с представлениями описанной выше ротационно-упругой

модели геофизической среды.

Во-первых, данные по движению плит, фактически, могут рассматриваться в качестве независимого подтверждения гипотезы о собственном моменте силы блока геофизической среды. Действительно, в работе [Жарков, 1983], на основании данных [Ле Пишон, 1974; Морган, 1974; Forsyth, Uyeda, 1975], сформулирован важный вывод о движении плит: «скорости плит коррелируются с величиной среднего полярного расстояния плиты». При этом В.Н. Жарков [1983] отмечает, «что движение литосферы...*увлекает* за счет сил вязкого трения подстилающую ее астеносферу» (курсив А.В.) - т.е. движение литосферы никак не зависит от движений в нижележащей астеносфере. В рамках таких геофизических представлений все приведенные выше инструментальные, наблюдательные и теоретические геофизические и геологические данные о вращательном движении плит имеют вполне определенный тектонический смысл. А именно, они, фактически, могут рассматриваться как такие данные, которые в соответствии с (11.53) и (11.53) определяют механизмы, обеспечивающие вращательное движение плит, независимое от движений в мантии. Другими словами, такие вращающие плиты механизмы, как и механизмы, вращающие блоки в описанной выше ротационно-упругой модели, обеспечиваются за счет «собственных» источников, независимых от дрейфа материков и, следовательно, от перемещений вдоль разделяющих их разломов.

Во-вторых, из самых общих соображений ясно, что между реальными блоками и плитами не должно быть физически существенной разницы. Различие между такими структурами, как блоки и плиты - чисто математические: пока не удалось получить аналитического решения задачи о поле напряжений вокруг тонкой плиты на поверхности вращающегося шара, аналогичное решению задачи для блока безграничной вращающейся среды (11.23.1) – (11.23.4). Представляется, что поле напряжений, создаваемое взаимодействующими плитами, должно описываться существенно нелинейным уравнением, типа СГ уравнения (11.35), и, следовательно, качественно иметь решение в виде тектонических (т.е. описывающих движение плит) волн – солитонов (11.56), (11.53) и экситонов (11.55), (11.52), с характерной ротационно-упругой скоростью (11.41), (11.42).

Сейсмичность, вулканизм и тектоника как составные части волнового геодинамического процесса

Выше в этой главе были проанализированы свойства сейсмического и вулканического процессов, протекающих в пределах окраины Тихого океана, и тектонического процесса - как движение совокупности плит планеты. Для каждого из процессов в отдельности были установлены определенные волновые (пространственно-временные) и энергетические закономерности. Показано, что волновые движения, соответствующие каждому из сейсмического, вулканического и тектонического процессов, имеют такие общие ротационно-упругие закономерности, которые указывают на наличие единого геодинамического источника, связанного с вращением Земли.

Циркулярная поляризация ротационно-упругих волн. Существование в земной коре геодинамических волн крутильной поляризации вытекает из следующих данных [Викулин, 2008в].

- Часто при землетрясениях во многих регионах мира наблюдались повороты памятников, повороты отдельных частей зданий друг относительно друга, отколы угловых частей зданий, большие деформации стен и перекрытий от кручения.

- Инструментальными измерениями в различных геофизических полях и геологическими данными установлены повороты блоков земной коры, микроплит и значительных по протяженности плит и платформ. Многочисленные примеры таких движений приведены выше.

- Из очагов достаточно сильных землетрясений визуально отмечено распространение вдоль поверхности Земли видимых «горбов» или «земляных волн», по сути, гравитационных сейсмических волн, и такие колебания теоретически объяснены и инструментально зарегистрированы.

В рамках ротационно-упругой волновой модели, описанной выше, показано, что достаточно сильное землетрясение является результатом взаимодействия блока земной коры – очага землетрясения, с волной тектонической природы круговой поляризации, по сути – спиновой волной. Согласно построенной теории [Викулин, 2008б, в, Vikulin, 2006]:

- в течение форшоковой стадии происходит разворот поля упругих напряжений вокруг неподвижного блока земной коры до предельного (критического) значения $42^0 \pm 3^0$, что, в принципе, может являться доказательством отсутствия в ряде случаев статистически значимого форшокового процесса;

- сам главный толчок и его достаточно сильные афтершоки представляют собой результат «распада» тектонической спиновой уединенной волны (солитона) на дисклинацию (круговую дислокацию) и экситонные возмущения типа волн сейсмической миграции землетрясений (решение II на рис. 11.2, соотношения (11.6), (11.7), (11.6.1), (11.6.2), раздел этой главы «Эффект Доплера»);

- сейсмический момент по самой своей сути приобретает естественное обоснование в рамках теории круговых (винтовых) дислокаций.

Как показано выше, волновые процессы, связанные с сейсмичностью, имеют общие свойства как с вулканическим процессом в пределах островных дуг и континентальных окраин, так и с тектоническим процессом – движением совокупности плит Земли. При этом механизм «собственного» вращения тектонических плит, в свете проведенных геофизических исследований микроплит Пасха и Хуан-Фернандос [Международный, 2003], оказался почти очевидным. Миграция сильных вулканических извержений вдоль окраины Тихого океана происходит аналогично миграции сильных землетрясений и в периоды региональных катастроф сейсмичность и вулканизм «согласованы» между собой [Мелекесцев и др., 2005, . 562].

Таким образом, можно принять, что и геодинамические волны, «управляющие» сейсмическим, вулканическим, тектоническим и другими геофизическими и геологическими процессами Земли, имеют циркулярную поляризацию. Следовательно, геодинамика – наука о геофизических и геологических процессах Земли, по сути своей, является ротационной. «Механическая» составляющая волновой геодинамики подробно будет рассмотрена ниже в главе 13 в разделе «Фигура равновесия вращающихся тел. Задача Дирихле».

В связи с такими подходами необходимо будет в дальнейшем пересмотреть некоторые основы нашего подхода к проблемам геодинамики и физики Земли [Викулин, 2003, 2004, 2008в].

Ротации и Глобальная тектоника. 1. Следует отметить, что в работах [Ле Пишон, 1974; Морган, 1974; Новая..., 1974; Forsyth, Uyeda, 1975] поиск корреляций между скоростями движения границ плит и другими их параметрами проводился в полном соответствии с принципами механики движения жестких плит вдоль сферической поверхности. Однако такое рассмотрение происходило без учета вращения планеты. Поэтому, несмотря на абсолютно правильную с механической точки зрения формулировку целей исследования: «Обладает ли тектонический механизм достаточной для движения плит энергией?», «Может ли предлагаемый теоретический механизм вызвать фиксируемые в зонах спрединга и субдукции движения плит?» [Forsyth, Uyeda, 1975], игнорирование эффектов, связанных с вращением Земли, привело к «пропуску» нелинейных сеймотектонических решений ротационного типа (11.56) - (11.55) или (11.52) - (11.53). И, как следствие, в рамках Новой глобальной тектоники [Новая..., 1974] потребовалось отвечать на вопросы типа [Айзекс, Оливер, Сайкс, 1974]: «Подтверждают ли данные сейсмологии концепцию новой глобальной тектоники?» и «Позволяет ли новая глобальная

тектоника по-новому подойти к проблемам сейсмологии?» - ответы на которые, вообще говоря, были заранее очевидны. Надо отметить, что не на все из таких вопросов к настоящему времени получены убедительные ответы. Например, «структурные и кинематические решения, предлагаемые плейттектоникой, во многих случаях малообоснованны» [Пушаровский, 2005]. Более того, становится все более очевидной несостоятельность Новой глобальной тектоники как всеобъемлющей геодинамической концепции [Спорные..., 2002]. И, тем не менее, плейттектоническая концепция своей наглядностью, тесной причастностью ко многим научным дисциплинам и, по-видимому, главным – своим «мобилистическим началом» [Пушаровский, 2005], уже сыграла, и еще в течение долгого времени будет продолжать играть важную роль в науках о Земле, так как является «популярной до предела» [Пушаровский, 2005].

2. Движение плит и сейсмичность (и вулканизм) – как гром и молния (и дождь), по своей сути – есть разные проявления одного и того же геодинамического процесса. В рамках Новой глобальной тектоники представляется очевидным, что движение плит и тектоника (молния) – «первичны», а землетрясения и сейсмология (гром) – «вторичны». В рамках же геодинамического процесса, опирающегося на представления о нелинейных свойствах вращающейся геофизической среды, вопрос о «первичности» и «вторичности» в такой постановке, вообще говоря, не имеет смысла: они все генерируются единым источником, напрямую связанным с вращением Земли вокруг своей оси. Действительно, и ранее [Викулин, 2003], и выше показано, что и тектонические плиты, и сейсмофакальные блоки на вращающейся планете движутся в условиях самосогласованного упругого поля, волновые свойства которого являются ротационно обусловленными. В соответствии с теоремой Эйлера таким движениям должны соответствовать вполне определенные трансляционные перемещения блоков – землетрясения, сейсмический процесс и плит - тектонический процесс, наблюдаемые на поверхности Земли. Другими словами, «первичным», по сути, является сам геодинамический процесс, волновая (самоорганизующая) природа которого в условиях ротации планеты обеспечивается наличием собственных моментов у слагающих геологическую среду образований. В таком случае становится понятным, почему согласно [Бондарчук, 1970, с. 57], «тектоническое (по сути – геодинамическое – А.В.) движение есть производная форма вращательного движения».

3. В последнее время наблюдается резкое повышение интереса к проблеме вихревых структур и их взаимосвязи с ротацией планеты. «Весьма показательным в этом смысле можно назвать XXXV Тектоническое совещание 2002 года [Тектоника..., 2002], каждый седьмой доклад которого в той или иной мере касался теоретических, планетарных или региональных проблем ротогенеза. Несколько докладов на этом совещании были посвящены результатам изучения влияния ротационного режима Земли на новейшую и современную геодинамику. Отдельные публикации, появившиеся в последние годы, подтверждают перспективность и плодотворность таких исследований, вносящих существенный вклад в познание геотектоники и геодинамики и зачастую приводящих к весьма неожиданным результатам. Огромный фактический материал, накопленный к настоящему времени по обсуждаемой проблеме, вероятно, заслуживает того, чтобы комплекс структур, обязанных своим происхождением ротационному фактору, стал рассматриваться в рамках специально выделенной ротационной тектоники» [Полетаев, 2005].

Более того, согласно [Наливкин, 1969, с. 91], «размеры сил, вызывающих движение в литосфере ... совершенно исключительны. Не меньше они и в гидросфере и, конечно, в литосфере. Они должны вызывать изменения и в твердой среде. Отрицать существование этих изменений бесполезно и даже вредно». Мы уже начинаем осознавать преобладающую роль циклонических процессов в атмосфере [Наливкин, 1969; Сидоров, 2002б] и гидросфере [Бреховских, Иванов, Кошляков, 1971; Крамарева, 2002] Земли и их тесную связь с вращением планеты [Иванчин, 2004; Сидоров, 2002а]. Этот, по сути,

«непрерывный» ряд явлений хорошо дополняют существенно большие по масштабу и интенсивности циклонические явления в атмосферах быстро вращающихся Юпитера, Сатурна и, по-видимому, Нептуна и отсутствие данных о таких явлениях в атмосфере практически не вращающейся вокруг своей оси Венеры. Юпитер и Сатурн, к тому же, имеют гигантские по масштабу и массе (вращающиеся) спутниковые системы.

На существование тесной взаимосвязи между движениями в литосфере, гидросфере и атмосфере Земли указывают и такие данные. С одной стороны, нутация планеты, ее амплитуда и частота связаны с сейсмотектоническим процессом [Викулин, Кролевец, 2001], с другой – периоды многолетних возмущений в системе океан – атмосфера кратны периодам Чандлера [Сидоров, 2002б, с. 278]. Эти данные подтверждают сформулированный многими исследователями вывод о том, что литосфера (тектоносфера) – гидросфера – атмосфера представляют собой единую нелинейную систему, движение которой определяется вращательными движениями планеты. Как видим, «комплекс структур, обязанных своим происхождением ротационному фактору» [Полетаев, 2005], необходимо рассматривать, в том числе и с более общих позиций – ротационной физики Земли [Викулин, 2004, 2008а, б].

4. В самое последнее время появились данные о невозможности существования упруго-вязких волн, распространяющихся вдоль литосферного разлома [Антонов, Кондратьев, 2008]. Такие волны описываются в широко известных моделях В.Г. Быкова, В.Н. Николаевского, В. Эльзассера и др. [Быков, 2000, 2005; Лобковский, Баранов, 1984; Маламуд, Николаевский, 1989; Николаевский, 1995, 1996, 2008; Bykov, 2008]. В складывающейся ситуации описанный выше ротационно-упругий механизм, допускающий существование собственных моментов у геофизических блоков и геологических плит, становится, пожалуй, единственным механизмом, способным объяснить природу уединенных тектонических волн: иначе возникают большие трудности с получением сильно нелинейного уравнения движения, типа уравнения синус-Гордона.

Что же такое землетрясение и его очаг? 1. Дальнедействующий характер взаимодействия блоков земной коры и расположенных в их пределах очагов землетрясений между собой, волновая миграция очагов землетрясений, явление парности землетрясений, эффекты землетрясений-дуплетов и мультиплетов с очевидностью показывают, что землетрясения и выделение упругих энергий в их очагах является составной и неотъемлемой частью непрерывно протекающего на планете сейсмического процесса, который сопровождается постоянно изменяющимся планетарным геодинамическим полем. Возникают вполне закономерные вопросы: «Так что же такое (отдельно взятое) землетрясение? Какая часть планетарной геодинамической энергии выделяется в его очаге и что же, по сути, он собой представляет?».

Впервые такой вопрос о землетрясении автору этой книги был задан в 1984 г. во время его доклада «О новом методе решения геофизических задач» на конференции «Прогноз сейсмической опасности на Дальнем Востоке» в Южно-Сахалинске [Викулин, 1984а]. В этом своем выступлении автор излагал один из своих первых вариантов построения модели сейсмического процесса, представляющего собой совокупность землетрясений тихоокеанского сейсмического пояса, рассматриваемую в «трехмерном» представлении: пространство – время – энергия. И вопрос: «Так что же в таком случае, на ваш взгляд, представляет собою землетрясение!», как-то сам собой естественным образом «всплыл» и был задан автору в ходе возникшей дискуссии по докладу.

В 1984 г. обсуждение таких вопросов казалось абсурдным и лишенным всякого физического смысла, так как физика очага землетрясения, основанная на «близкодействующих», по сути, локальных принципах Ф. Рейда, казалась уже почти установленной. Теперь, когда вопросы о «дальнедействии» упругих полей вокруг очагов (миграция, удаленные форшоки и афтершоки, пары землетрясений и землетрясения-дуплеты и др.) постепенно начинают выходить на первый план (глава 11), становится ясным, что такого рода вопросы вполне обоснованы и требуют ответа. Так какая же часть

планетарного геодинамического (сейсмический «плюс» вулканический «плюс» тектонический) процесса может быть отождествлена с конкретным землетрясением и что такое его очаг? Ясно, что такого же рода вопросы могут быть сформулированы и относительно вулканических извержений и питающих их магматических очагов и относительно «самостоятельности» тектонического процесса в том или ином конкретном регионе планеты.

Ответ автора на той южно-сахалинской конференции на поставленный вопрос, данный им в рамках аналогии: очаги землетрясений в Земле подобны различным дислокационным структурам в твердом теле, упруго взаимодействующим между собой – не только не убедил аудиторию, но был расценен как некая экстравагантная и вызывающая выходка докладчика. И это несмотря на то, что эффект дальнего действия дислокаций в физике твердого тела в то время уже достаточно хорошо был известен и исследован [Викулин, Иванчин, 2002]. Действительно, при колоссальной плотности дислокаций ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$) «эффективный» радиус действия самосогласованного упругого поля, создаваемого дислокациями в объеме твердого тела $\sim 1 \text{ см}^3$, по размерам «может превышать футбольное поле» [Лихачев, Волков, Шудегов, 1986, с. 3].

2. Энергия является физической величиной, поэтому определение ее величины является принципиальным моментом любой теории и модели. Первый способ модельного определения А.В. Викулиным энергии сейсмического процесса был основан на геометрически прозрачном циклическом свойстве сейсмичности – на свойстве непересечения очагов сильнейших землетрясений в течение сейсмического цикла [Федотов, 1965, 1968]. В рамках таких представлений удалось показать, что, в принципе, оказывается возможным определить понятия и кинетической и потенциальной энергии сейсмического процесса [Викулин, Викулина, 1989].

В рамках ротационной модели сейсмотектонического процесса, протекающего в пределах протяженного пояса и описываемого сильно нелинейным уравнением типа уравнения синус-Гордона (СГ), появление представлений о сейсмотектонической потенциальной и кинетической энергии, с точки зрения механики достаточно очевидно. Действительно, одномерное уравнение СГ, как известно, относится к классу интегрируемых уравнений, для которых в явном виде существует и функция Лагранжа и интегралы (законы) сохранения. Тогда из теоремы вириала, связывающей между собой потенциальную и кинетическую энергии механической системы, полагая, что потенциальной энергией является энергия взаимодействия блоков (и плит) E_{int} , для величины кинетической геодинамической энергии E получаем [Викулин, 2003а]:

$$E_{\text{int}} = 2E. \quad (11.57)$$

Кинетическая энергия E , очевидно, представляет собой сумму всех энергий, характеризующих движения (перемещения) вещества Земли, которые имели место после того или иного геодинамического явления. К их числу относятся активизация вулканов, связанная с перемещением магмы на глубине и продуктов извержения на поверхности Земли, движения тектонических плит и перемещения блоков, которые, в том числе, сопровождаются упругими и криповыми волнами, собственными колебаниями планеты и другие.

Сейсмический и вулканический процессы часто протекают без видимой взаимосвязи; взаимосвязь между этим процессами достаточно отчетливо начинает проявляться в случае наиболее сильных землетрясений и катастрофических извержений вулканов, как правило, в периоды региональных катастроф [Мелекесцев и др., 2005]. Наиболее сильные вулканические землетрясения имеют магнитуды не более $M_{\text{max, volc}} \leq 7$ и их очаги «территориально» достаточно отчетливо отделены от очагов тектонических землетрясений. Интенсивные собственные колебания планеты

наблюдаются, как правило, при наиболее сильных землетрясениях, имеющих предельные магнитуды $M_{\max} : M_s \geq 8,3 \div 8,5; M_w \geq 9$.

Сильнейшие землетрясения с магнитудами в диапазоне $M_{\max, \text{volc}} < M < M_{\max}$, $M \approx 8$, разделены во времени: на Земле такие землетрясения происходят примерно один раз в год. Очаг такого землетрясения однозначно «локализуется» вступлениями излучаемых главным толчком волн на сейсмограммах станций сейсмической сети и компактным расположением его форшоков и афтершоков. Очаговая область землетрясения с $M \approx 8$, как показали детальные исследования, имеет достаточно простое «внутреннее» строение, что выражается монотонным по закону Омори уменьшением сейсмической активности в каждой точке афтершоковой области в течение первого афтершокового года [Викулин, 2003, с. 25-27]. По сути, очагом такого землетрясения с магнитудой $M \approx 8$ является «элементарный» сейсмофокальный блок, имеющий протяженность около 150 (100 ÷ 250) км (см. соотношения (11.13) – (11.15)). В таком случае на основании соотношений (11.57) и (11.24), (11.25) и (11.44) для модельного определения величины выделяемой при землетрясении с $M \approx 8$ упругой энергии можно использовать соотношения (11.24) и (11.25). Как показывают оценки, проведенные в этой главе на стр. 314, сейсмический КПД такого преобразования сеймотектонической энергии в энергию сейсмических волн, уносимых из очага землетрясения, составит около 10^{-8} .

Именно такая идеология «одионого» и не связанного с другими геодинамическими явлениями очага землетрясения, традиционно используемая многими исследователями (например, [Ризниченко, 1985]), и была положена автором в главе 3 при выводе зависимости между магнитудой землетрясения и протяженностью его очага (3.11), (3.12). Если же полагать КПД равным 10^{-4} – 10^{-6} , то в рамках ротационной модели необходимо будет признать, что даже в случае явного отсутствия видимой связи сейсмичности с другими явлениями, большая часть геодинамической энергии, связанной с взаимодействием тектонических плит и сейсмофокальных блоков, расходуется не на сейсмический процесс, протекающий с излучением упругих волн.

3. Землетрясение с $M \geq M_{\max}$, как правило, имеет очаговую область, протяженность которой значительно превышает размеры элементарного сейсмофокального блока (табл. 11.15). В пределах очаговой области такого землетрясения фор-афтершоковый процесс развивается вполне закономерным образом (рис. 11.2 – 11.6, табл. 11.1 – 11.3), что, на первый взгляд, позволяет отнести такую область к описанному выше классу очаговых областей «одионых» землетрясений с $M \leq 8$. Однако землетрясения с $M \geq M_{\max}$, как правило, представляют собой мультиплетные события. Действительно, каждое из таких землетрясений представлено не одним, а несколькими толчками. При этом их очаги разбиваются на несколько субочагов. Например, Большое Камчатское землетрясение-дуплет 4.11.1952 г. (табл. 11.15), афтершоковая область которого представлена двумя областями протяженностью 200-250 км каждая, отстоящими друг от друга на расстояние около 150-200 км (рис. 3.4 б). И Аляскинское «шеститолчковое» землетрясение 28.3.1964 г. (табл. 11.15), сильные афтершоки которого достаточно равномерно заполнили собой всю очаговую область протяженностью 750 км (рис. 3.4 в).

Отличительная особенность сейсмического процесса, сопровождаемого мультиплетными землетрясениями, заключается в следующем. Согласно развиваемой автором ротационной модели в результате такого землетрясения «сбрасываются» (перераспределяются) не только момент сил (11.23.1) и энергия (11.23.2) упругих напряжений, связанные с каждым из субочагов в отдельности, но и моменты сил (11.28) и энергии (11.27) упругих напряжений, обусловленные взаимодействием субочагов между собой. Предельный («энергетический») случай такого мультиплетного землетрясения – случай параллельно ориентированных субочагов ($\phi = 0$), когда энергия взаимодействия

(11.27) максимальна ($\cos \phi = 1$), а момент сил (11.28) равен нулю ($\sin \phi = 0$), разобран выше на стр. 319-320.

Второй предельный случай, возможный в рамках ротационной модели, соответствует ортогонально ориентированным субочагам: $\phi = \pi/2 \pm \pi$, для которых момент силы упругого поля, связанный с их взаимодействием, по абсолютной величине максимален ($\sin \phi = \pm 1$), а энергия их взаимодействия (11.27) равна нулю ($\cos \phi = 0$). Как видим, в рамках ротационной модели «моментное взаимодействие» субочагов не сопровождается выделением упругой энергии их (субочагов) взаимодействия между собой.

Таблица 11.15. Данные о магнитуах M_S и M_W , протяженности очага (области афтершоков) L , числе субочагов N и мультиплетности - числе толчков n для наиболее сильных (интенсивных) тихоокеанских землетрясений второй половины XX века.

Дата землетрясения	Регион	M_S	M_W	Протяженность очага, L [км]	Число очагов, N	Число толчков, n	Источник
1952	Камчатка	8,5	9,0	600	2(3)	2	[14, 60, 157]
1957	Алеуты	7,9	8,8	1100 - 1300	6 - 8	-	[169]
1960	Чили	8,3	9,5	≈ 2000	≈ 10	>2	[170]
1963	Курилы	8,2	8,5	250	2	2	[14, 60, 61]
1964	Аляска	8,3	9,2	750	4 - 5	6	[61, 63, 124]
1965	Алеуты	7,9;8,5 8,7	8,7	600 - 700	3 - 5	> 2	[61, 104, 169] [106]

Приложение. Данные о размерах очаговых областей использовались из работ [Викулин, 2003, 1988] и рис. 3.4б, в; использовались так же данные, приведенные в разделе этой главы «Эффект Доплера» и в работе [Касахара, 1985, с. 242-243].

К «моментным» предельным землетрясениям, по-видимому, можно отнести землетрясения, которые при их значительных по величине магнитуах и больших по протяженности афтершоковых областях сопровождались аномально низким макросейсмическим эффектом. К числу таких событий можно отнести, например, землетрясение 2.07.1965 (табл. 11.15), которое на Крысьих и Андреяновских островах, расположенных внутри очаговой области, ощущалось не более чем 6-балльное по XII-балльной шкале [Соловьев, Го, 1974, с. 25-27]. Такая же макросейсмическая аномалия отмечена и при других алеутских сильнейших землетрясениях. Так, землетрясение 17.12.1929, $M = 8,0$, $L = 600-700$ км на островах Ближних - Беринга ощущалось с интенсивностью не более 5 баллов [Викулин, 1988], землетрясение 10.11.1938, $M = 8,3$, $L = 600-900$ км на полуострове Аляска, фактически, на границе афтершоковой области - не более 6 баллов [Соловьев, Го, 1974, с. 19-20].

Причина аномально низкого на большой (гигантской) территории макросейсмического эффекта для землетрясений таких больших магнитуд, может заключаться в следующем.

30.1.1917 г. в Камчатском проливе, в месте сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, между островом Беринга (Алеутская дуга) и полуостровом Камчатский мыс (Камчатка) произошло, на первый взгляд, «обычное» землетрясение с $M = 8,1$. Данные об этом землетрясении собраны в работе [Викулин, 1986]. Согласно этим данным отличительной особенностью землетрясения 1917 г. является низкочастотное (с периодом около одной минуты) излучение сейсмических волн из области его очага. При этом землетрясении, «не ощущавшимся обывателями Петропавловска-Камчатского», сейсмограф Голицына на сейсмической станции Петропавловск-Камчатский, расположенной на эпицентральной расстоянии 440 км, вышел из строя: «максимальное

отклонение пера на сейсмограмме 124 мм, затем сдвинуло магниты, выбросило перья» [Пурин, 1917].

При скорости продольных волн $V_p \approx 10$ км/с для размера области, излучавшей волну с периодом около $T \approx 60$ с, получаем оценку протяженности, близкую $L = V_p \cdot T \approx 600$ км.

Землетрясение 19 января, по-видимому, являвшееся форшоком землетрясения 30 января, ощущалось в Петропавловске-Камчатском как «слабое землетрясение в течение более трех часов с периодом от 10 до 30 с» [Предварительный..., 1968]. Это землетрясение – форшок также можно рассматривать как подтверждение и низкочастотной особенности очага главного толчка и, тем самым, его больших размеров.

Очаг землетрясения 30.1.1917 г. расположен на западном фланге Алеутской островной дуги, в пределах которой и происходили отмеченные выше землетрясения 1929, 1938 и 1965 гг. с аномально низким макросейсмическим эффектом. Более того, отличительной особенностью всех сильнейших ($M \geq 7,9$) алеутских землетрясений XX века ($N = 8$) является аномально большая протяженность их очагов ($L = 1000 \pm 300$ км) по сравнению с протяженностями очагов таких же по магнитуде землетрясений в других островных дугах Тихого океана [Викулин, 1988, 2003]. Аномально большая протяженность очагов сильнейших алеутских землетрясений является характерной особенностью сейсмического процесса в пределах Алеутской дуги [Викулин, 1988, 2003] и может быть объяснена именно моментным характером взаимодействия слагающих его субочагов между собой.

В пользу такой точки зрения, на наш взгляд, указывают так же и данные о малой интенсивности цунами, образовавшихся при большинстве из отмеченных сильнейших землетрясений с аномально низким макросейсмическим эффектом. Так, не отмечено цунами после землетрясений 30.1.1917 и 17.12.1929, а после землетрясения 10.11.1938 эффект цунами был весьма незначительным [Соловьев, Го, 1974, с. 18-20; Соловьев, 1978]. Эти данные показывают, что сейсмический процесс в очагах сильнейших алеутских землетрясений с аномально низким макросейсмическим эффектом протекал без образования крупных цунамигенных нарушений – разрывов и деформаций морского дна.

Таким образом, аномально низкий макросейсмический эффект, отмеченный при некоторых алеутских землетрясениях, по-видимому, позволяет предположить следующее. Моментное взаимодействие «в чистом виде» является не результатом «сброса» (высвобождения) значительной по величине упругой энергии, снимаемой с поверхностей образовавшихся при землетрясении крупных разрывов, а результатом «высвобождения» из объема земной коры момента силы упругих напряжений, ответственного за взаимодействие субочагов между собой. Такие «моментные» напряжения, связанные с взаимодействием субочагов, согласно ротационной модели, сосредоточены не столько в пределах очагов (субочагов), сколько в окружающем их пространстве. Более того, достаточно сильные мультиплетные землетрясения, в том числе и все отмеченные в табл. 11.15, сопровождались интенсивными собственными колебаниями Земли, что позволяет очагом мультиплетного землетрясения в случае «чисто сдвигового» взаимодействия слагающих его субочагов считать всю Землю или только ее «упругие» слои (литосферу - мантию).

4. В ротационную модель сейсмотектонического процесса нами не закладывались никакие критические условия (критерии) разрушения вещества земной коры. Поэтому существование неустойчивости (землетрясения) в процессе передачи (перераспределения) напряжений в системе взаимодействующих сейсмофокальных блоков заложено в самой природе геодинамического процесса, который «знает», когда, где и какой магнитуды произойдет следующее землетрясение и сам его подготавливает. Поэтому высказывание А. Гумбольдта «вулканы являются предохранительными клапанами Земли» можно отнести и к сейсмотектоническому процессу, «предохранительным клапаном» которого, несомненно, является землетрясение. Задачей исследователей является не построение

модели очага или сейсмического процесса, включая прогноз землетрясений, в рамках существующих представлений, опирающихся, в основном, на «локальные» принципы Ф. Рейда. Исследователи при решении такой задачи должны максимальным образом увязать в рамках единой модели не только сеймотектонические данные, но и, по возможности, другие геодинамические явления.

Сформулированный вывод является принципиальным результатом, который предопределен описанной выше постановкой задачи и ее решением. Физика сформулированного результата может заключаться в следующем [Викулин, 2003, с. 96-97; Викулин, Быков, Лунева, Иванчин, 2000].

Обратная задача очага землетрясения имеет неединственное решение [Павлов, 1996]. Следует так же отметить, что, вообще говоря, механизм диполя сосредоточенной силы в рамках задачи о ротационном очаге не является единственно возможным.

В работе [Ivanchin, 1994] показано, что для уединенного источника расширения задача, решениями которой являются соотношения (11.23.1) – (11.23.4), (11.27) и (11.28), в принципе, имеет два независимых решения. Одно из них соответствует чисто сдвиговому решению – выделению энергии в виде упругих волн, излучаемых образовавшимся разломом, другое – выделение момента силы упругих напряжений из объема. Таким образом, сформулированный выше вывод о существовании двух предельных случаев снятия напряжений в системе взаимодействующих блоков и плит, описанных «энергетическим» и «моментным» механизмами, находит свое объяснение.

Существование двух независимых решений, в принципе, указывает на наличие двух уровней, каждый из которых определяет устойчивое состояние системы. Как может следовать из приведенных выше данных, такие уровни могут определяться «сдвигово» - «энергетическим» и «объемно» - «моментным» механизмами. По величине уровни существенно различаются: «сдвиговой» превышает «объемный» примерно на треть [Ivanchin, 1994].

Геодинамические волны имеют циркулярную поляризацию, что позволяет за малые промежутки времени в большом объеме земной коры существенно изменить ротационное упругое поле путем «преобразования» его (объема) момента силы в, например, собственные колебания Земли.

Землетрясение 30.1.1917, как очень сильное, было записано Центральной сейсмической обсерваторией в Пулковом под Санкт-Петербургом. Отсутствие же данных об этом землетрясении, которые наблюдатель сейсмической станции Петропавловск-Камчатский (А.А. Пурин) ввиду выхода ее из строя в Центральную обсерваторию, как обычно, не передал по радиотелеграфу, сочли за «полное уничтожение Камчатки». Вот к чему иногда может привести незнание эффекта моментного взаимодействия между блоками земной коры - очагами землетрясений!

Литература

1. Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л. Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 133–179.
2. Акманова Д.Р. Особенности вулканической активности окраин Тихого океана за последние 12 тыс. лет // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. 11-17 ноября 2007. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. С. 151-155.

3. Антонов В.А., Кондратьев Б.П. О невозможности существования упруго-вязких волн, распространяющихся вдоль литосферного разлома // Физика Земли. 2008. № 6. С. 86-91.
4. Балакина Л.М. Шикотанское землетрясение 4 октября 1994 г. и Курило-Камчатская сейсмогенная зона // Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Экстренный выпуск. М.: ФССН, 1994. С. 42-51.
5. Бондарчук В.Г. Движение и структура тектоносферы. Киев: Наукова Думка, 1970. 192 с.
6. Бреховских Л.М., Иванов Ю.А., Кошляков М.Н. и др. Некоторые результаты гидрофического эксперимента в Тропической Атлантике // Докл. АН СССР. 1971. Т. 198. № 6. С. 1434-1439.
7. Быков В.Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах. Владивосток: Дальнаука, 2000. 190 с.
8. Быков В.Г. Деформационные волны земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176-1190.
9. Бюллетень сейсмической станции Петропавловск-Камчатский. www.emsd.iks.ru
10. Ван Беммелен Р.И. Теория ундаций // Структурная геология и тектоника плит / Ред. К. Сейферт. Т. 3. Тектоника гравитационного скольжения. – Эллипсоид напряжений. М.: Мир, 1991. С. 200-213.
11. Викулин А.В. О магнитудной классификации алеутских землетрясений // Прогноз сейсмической опасности на Дальнем Востоке. Южно-Сахалинск: МСССС, 1984. С. 95.
12. Викулин А.В. О новом методе решения геофизических задач // Прогноз сейсмической опасности на Дальнем Востоке. Тезисы докладов IV научной сессии Дальневосточной секции МСССС. Южно-Сахалинск, 2-6 апреля 1984. Южно-Сахалинск: СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984а. С. 93-94.
13. Викулин А.В. Вариант долгосрочного сейсмического прогноза для Камчатского залива и Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 72-83.
14. Викулин А.В. Пространственные, временные и энергетические особенности сейсмического режима северо-западной части Тихого океана. Диссерт. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. М.: 1988. 201 с.
15. Викулин А.В. Особенности распределения землетрясений северо-западной части Тихого океана // Геофизические исследования при решении геологических задач. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР. 1989. С. 43-57.
16. Викулин А.В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Доклады АН СССР, 1990, т. 310, № 4, с. 821-824.
17. Викулин А.В. Миграция очагов сильнейших Камчатских и Северо-Курильских землетрясений и их повторяемость // Вулканология и сейсмология. 1992. № 1. С. 46-61.
18. Викулин А.В. Прогноз времени сильнейших землетрясений у берегов Камчатки и Северных Курил // Вулканология и сейсмология. 1992. № 1. С. 62-69.
19. Викулин А.В. О природе Австралийских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 99-108.
20. Викулин А.В. Южно-Курильское землетрясение 4 октября 1994 г. как предвестник сильнейшего землетрясения на юге Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 106-112.
21. Викулин А.В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. I Российско-Японский семинар. Хабаровск, 26-29 сентября 2000 г. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 205-224.
22. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса // Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН - КГПУ, 2003. 151 с. www.kcs.iks.ru

22. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса // Математические медоты в геофизике. ММГ – 2003. Новосибирск: 2003а. С. 87-92.
23. Викулин А.В. Введение в физику Земли. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. 240 с. www.kcs.iks.ru
24. Викулин А.В. Волновая природа ротационного упруго поля литосферы // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды научной конференции с участием иностранных ученых. 10-13 окт. 2005. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. С. 401-419.
25. Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. 2008а. Т. 49. № 6. С. 559-570.
26. Викулин А.В. Мир вихрей. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008б. 230 с.
27. Викулин А.В. Циркулярнополяризованные (спиновые) волны в литосфере // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. 11-17 ноября 2007. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008в. С. 55-58.
28. Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н., Иванчин А.Г. Волновая геодинамика литосферы Земли // Сопряженные задачи механики и экологии. Избранные доклады международной конференции. Томск: ТГУ, 2000. С. 28-39.
29. Викулин А.В., Викулина С.А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. Препринт № 5. Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ РАН. 1989. 44 с.
30. Викулин А.В., Викулина С.А. Афтершоки и эффект Доплера // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. 28-31 марта 2007. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 300-311.
31. Викулин А.В., Викулина С.А. Эффект Доплера, нутация полюса и фор-, афтершоки // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. 11-17 ноября 2007. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. С. 140-144.
32. Викулин А.В., Водинчар Г.М. Спектр потока сейсмичности // Четвертый Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон». Материалы докладов. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2005. С. 98-102.
33. Викулин А.В., Водинчар Г.М., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. Сборник докладов IV международной конференции. 14-17 авг. 2007 г. Паратунка, Камчатской обл. Петропавловск-Камчатский: ИКИРР ДВО РАН. 2007. С. 275-280.
34. Викулин А.В., Гусяков В.К., Титов В.В. О природе максимального цунами // Вычислительные технологии. 1992. Т.1. № 3. С. 131-134.
35. Викулин А.В. Журавлев В.И. Статистический анализ распределения курило-камчатских землетрясений во времени и в пространстве. Препринт. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО АН СССР, 1987. 28 с.
36. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Модель сейсмического процесса // Вычислительные технологии. 1997. Т. 2. № 2. С. 20-25.
37. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 6. С. 95-103.
38. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротация и упругость // Вопросы материаловедения. Научно-технический журнал. № 1 (29). Труды международного семинара «Мезоструктура». Санкт-Петербург, 4-7 декабря 2001. СПб: ЦНИИМК «ПРОМЕТЕЙ», 2002. С. 435-441.
39. Викулин А.В., Кролевец А.Н. Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 6. С. 996-1009.

40. Викулин А.В., Мелекесцев И.В. Вихри и жизнь // Ротационные процессы в геологии и физике. М.: ДомКнига, 2007. С. 39-101.
41. Викулин А.В., Сеньюков С.Л. Миграция форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 с $M = 7,5-7,7$ // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатской государственной академии рыбопромыслового флота, 1998. С. 80-88.
42. Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. О скоростях движения тектонических плит // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. С. 83-92. www.kcs.iks.ru
43. Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Доклады РАН. 2007. Т. 413. № 3. с. 372-374.
44. Викулин А.В., Чернобай И.П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 58-65.
45. Викулин А.В., Чернобай И.П. О некоторых особенностях двух сильнейших курило-камчатских землетрясений // Физические поля и свойства горных пород Северо-Востока СССР. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 44-59.
46. Вихман Э. Квантовая физика. М.: Наука, 1974. 416 с.
47. Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КГПУ. 2004. 297 с. www.kcs.iks.ru
48. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Влагова Г.Л. и др. Зоны субдукции: действующие силы, геодинамические типы, сейсмичность и металлогения // Вестник ОГГТГН РАН. № 2(12)'2000. Т.1. http://www.scgis.ru/russian/cpl251/h_dgggms/2-2000/subduction.htm#begin
49. Геологическая история территории СССР и тектоника плит. М.: Наука, 1989. 206 с.
50. Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра, 1978. 487 с.
51. Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. 11-17 ноября 2007. В двух томах. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008.
52. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
53. Гольдин С.В. Физика «живой» Земли // Проблемы геофизики XXI века. Кн. 1. М.: Наука, 2003. С. 17-36.
54. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34-42.
55. Гущенко И.И. Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
56. Давыдов А.С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физических наук. 1982. Т.138. Вып. 4. С. 603-643.
57. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
58. Жуланова И.Л. Методология познания вулканизма Земли: геодинамика или геосинергетика? // Вулканизм и геодинамика. 2-ой Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург, 2003. С. 20-25.
59. Земля. Введение в общую геологию. Т. 1, 2 / Дж. Ферхуген, Ф. Тернер, Л. Вейс, К. Вархафтиг, У. Файф. М.: Мир, 1974. 847 с.
60. Иванов В.В., Гардер О.И. Длительность процесса землетрясения в источнике // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 5. С. 1149-1152.
61. Иванов В.В., Константинова Н.П. Развитие очагового процесса Аляскинского землетрясения 1964 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 5. С. 64-78.
62. Иванчин А.Г. Движущие силы смерча // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. С. 269-273. www.kcs.iks.ru
63. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

64. *Кац Я.Г., Козлов В.В., Полетаев А.И.* и др. Кольцевые структуры Земли: миф или реальность. М.: Наука, 1989. 190 с.
65. *Короновский Н.В.* Общая геология. М.: КДУ, 2006. 528 с.
66. *Крамарева Л.К.* Структура и динамика вихревых образований энергоактивных зон Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2002. 334 с.
67. *Кузин И.П., Лобковский Л.И., Соловьева О.Н.* Об особенностях сейсмичности центральной части курильской гряды // Физика Земли. 2001. № 6. С. 29-40.
68. *Кукал З.* Скорость геологических процессов. М.: Мир, 1987. 246 с.
69. *Курленя М.В., Опарин В.Н.* Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II. ФТПРПИ. 2000. № 4. С. 3-26.
70. *Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Кулинич Р.Г., Карп Б.Я.* Центрально-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал // Доклады РАН. 2006. Т. 408. № 6. С. 1-4.
71. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 2003. 246 с.
72. *Ле Пишон Кс.* Спрединг океанического дна и дрейф континентов // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 93-133.
73. *Лихачев В.А., Волков А.Е., Шудегов В.Е.* Континуальная теория дефектов. Л.: ЛГУ, 1986. 232 с.
74. *Ли Сы-гуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.-Л.: Госгеолтехиздат, 1958. 132 с.
75. *Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 254 с.
76. *Лобковский Л.И., Баранов Б.В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Доклады Ан СССР. 1984. Т. 275. № 4. С. 843-847.
77. *Лукьянов А.В.* Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Проблемы геодинамики литосферы. М.: Наука, 1999. С. 253-287.
78. *Магницкий В.А.* Внутренне строение и физика Земли. М.: Недра. 1965. 204 с.
79. *Маламуд А.С., Николаевский В.Н.* Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: Дониш, 1989. 140 с.
80. *Маслов Л.А.* Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса // Хабаровск-Владивосток: Дальнаука, 1996. 200 с.
81. *Милановский Е.В.* Пульсации Земли // Геотектоника. 1995. № 5. С. 3-24.
82. Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана. М-СПб: Межправительственная океанографическая комиссия, 2003. 120 с.
83. *Мелекесцев И.В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука. 1979. С. 125-155.
84. *Мелекесцев И.В.* Взгляд геолога: вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. С. 20-23.
85. *Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Вулкан Ксудач (Камчатка) за последние десять тыс. лет // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 28-39.
86. *Мелекесцев И.В. и др.* Природная катастрофа 1737-1742 гг. на Камчатке как модель будущих региональных катастроф на островных дугах Северо-Западной Пацифики // Новейший и современный вулканизм на территории России / Ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2005. С. 553-571.
87. *Морган В.* Океанические поднятия, глубоководные желоба, большие разломы и блоки земной коры // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 68-93.
88. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. Л.: Наука, 1969. 488 с.
89. *Николаев А.В.* (ред.) Проблемы геофизики XXI века. Сборник научных трудов в двух книгах. М.: Наука, 2003.
90. *Николаевский В.Н.* Математическое моделирование уединенных

- деформационных и сейсмических волн // Докл. РАН, 1995. Т. 341. № 3. С. 403-405.
91. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра. 1996. 447 с.
92. Николаевский В.Н. Упруго-вязкие модели тектонических и сейсмических волн в литосфере // Физика Земли. 2008. № 6. С. 92-96.
93. Новая глобальная тектоника (тектоника плит). М.: Мир, 1974. 472 с.
94. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 536 с.
95. Осипова Н.А. О миграции тихоокеанских землетрясений в области магнитуд $M > 8$ // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. 11-17 ноября 2007. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2008. С. 196-199.
96. Островский Л.А. Неклассическая нелинейная акустика // Нелинейные волны 2004. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 109-124.
97. Павлов В.М. О неединственности обратной задачи для объемного очага землетрясения // Физика Земли. 1996. № 2. С. 75-81.
98. Панин В.Е., Гиряев Ю.В., Лихачев В.А. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1984. 229 с.
99. Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР, сер. геологическая, 1961. № 3. С. 36-54.
100. Полетаев А.И. Ротационная тектоника // Актуальные проблемы региональной геологии и геодинамики. Шестые Горшковские чтения. 26 апреля 2004. М.: МГУ, 2004. С. 19 – 25.
101. Полетаев А.И. Ротационная тектоника земной коры // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Материалы XXXVIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 97-100.
102. Пономарев В.С. Горные породы как среды с собственными источниками упругой энергии // Проблемы нелинейной сейсмологии. М.: Наука, 1987. С. 50-64.
103. Попов Г.И. Об условиях образования цунами // Бюллетень Совета по сейсмологии. М.: Изд-во АН СССР, 1961. № 9. С. 59.
104. Предварительный отчет о сейсмическом районировании участка строительства Кроноцкой ГЭС на Камчатке. Часть II. Петропавловск-Камчатский: ТСЭ ИФЗ АН СССР, 1968. 144 с.
105. Проблемы геофизики XXI века: В 2 кн. / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003. Кн. 1, 311 с. Кн. 2, 333 с.
106. Пурин А.А. Землетрясения Камчатки и их регистрация. Петропавловск-Камчатский, 1977. 23 с.
107. Пуцаровский Ю.М. Глобальная тектоника в перспективе // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых. Материалы XXXVIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 121-123.
108. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Неоднородность напряженного состояния в геосреде при подготовке суматринского землетрясения 26.12.2004 // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды научной конференции с участием иностранных ученых. 10-12 окт. 2005. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. С. 427-437.
109. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408 с.
110. Рикитаке Т. Геофизические и геологические данные о Японской островной дуге и ее обрамлении // Окраины континентов и островные дуги. М.: Мир, 1970. С. 216-236.
111. Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига. 2007. 528 с.

112. Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е., Добровольский А.Д., Живаго А.В. Цунами 4-5 ноября 1952 г. // Бюллетень Совета по сейсмологии. № 4. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 62 с.
113. Садовский М.А. Новая модель геофизической среды // Българско геофизично списание, 1985. Т. XII. №2. С. 3-10.
114. Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука. 2004. 440 с.
115. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.
116. Сато Х. Повторные геодезические съемки // Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 1984. С. 108–120.
117. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука. 1973. 536 с.
118. Сидоров Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002а. 384 с.
119. Сидоров Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2002 б. 368 с.
120. Симаков К.В. Введение в теорию геологического времени. Становление. Эволюция. Перспективы // Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1999. 556 с.
121. Скотт А., Чжу Ф., Маклафлин Д. Солитон – новое понятие в прикладных науках // ТИИЭР. 1973. Т. 61. С. 79-123.
122. Слензак О.И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова Думка, 1972. 182 с.
123. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР, 1737-1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61-136.
124. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 310 с.
125. Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы / Ред. В.Н. Шолпо. М.: ИФЗ РАН, 2002. 236 с.
126. Стюарт М.В. Избранные труды. М.: Недра, 1975, Ч. 1, 155 с.
127. Сэффмэн Ф.Дж. Динамика вихрей. М.: Научный мир, 2000. 376 с.
128. Тараканов Р.З. Повторные толчки землетрясения 4 ноября 1952 года // Труды СахКНИИ СО АН СССР. 1961. Вып. 10. С. 112-116.
129. Тараканов Р.З., Ким Ч.У., Сухомлинова Р.И. Закономерности пространственного распределения гипоцентров Курило-Камчатского и Японского регионов и их связь с особенностями геофизических полей // Геофизические исследования зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. М.: Наука, 1977. С. 67-77.
130. Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. 2005. № 5. С. 59-77. www.kscnet.ru/kraesc/2005/2005_5/2005_5/html
131. Тектоника и геофизика литосферы. Материалы XXXV Тектонического совещания. Т. 1, 2. М.: ГЕОС. 2002.
132. Токарев П.П. Характеристика и повторяемость вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 110-118.
133. Устинова В.Н., Вылцан И.А., Устинов В.Г. О пространственном и временном развитии циклически протекающих событий на Земле по геофизическим данным // Геофизика. 2005. № 3. С. 65-71.
134. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Труды ИФЗ АН СССР. № 36 (203). Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1965. С. 66-93.
135. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР / Ред. С.В. Медведев. М.: Наука, 1968. С. 121-150.

136. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука. 2005. 302 с.
137. Хаин В.Е. От тектоники плит к глобальной геодинамике // Природа. 1995. № 1. С. 42-51.
138. Харленд У.Б., Кокс А.В., Ллевеллин П.Г. и др. Шкала геологического времени. М.: Мир. 1985. 139 с.
139. Хейцлер Дж., Диксон Г., Херрон Е. и др. Морские магнитные аномалии, инверсии геомагнитного поля и движения океанического дна и континентов // Новая глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. С. 38–57.
140. Цань Сюэ-сень. Физическая механика. М.: Мир, 1965. 544 с.
141. Шейдеггер А. Основы геодинамики. М.: Недра, 1987. 384 с.
142. Эйништейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. М.: Наука, 1966. 632 с.
143. Bykov V. Stick-slip and strain waves in the physics of earthquake rupture: experiments and models // Acta Geophysica. 2008. V. 56. P. 270-285.
144. Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes // Geophys. J. Int. 1995. V. 122. P. 776 – 783.
145. Daly M.C. Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. 1989. V. 8. № 4. P. 769-790.
146. Duda S.J. Strain release in the Circum-Pacific belt, Chile 1960 // J. Geophys. Res. 1963. 68. P. 5531-5544.
147. Geist E.L., Childs J.R., Scholl D.W. The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. 1988. 7. N 2. P. 327-341.
148. Forsyth D., Uyeda S. On the relative importance of the driving forces of plate motion // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1975. V. 43. P. 163-200.
149. International Seismological Centre. On-Line Bulletin. ISC. <http://www.isc.as.uk/>.
150. Ivanchin A.G. Spherical asymmetric solution for point defect // J. Mater. Sci. Technol. 1994. 10. P. 386-388.
151. Jackson E.D., Shaw H.R., Bargar K.E. Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain // Earth Planet Sci. Lett. 1975. V. 26. P. 145–155.
152. Earthquake Search Results. U. S. Geological Survey. Earthquake Data Base. NEIC. http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes_all.php.
153. Lee J.S. Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // Geol. Mag. LXVI. 1928. P. 422-430.
154. Kuchemann D. Report on the I.U.T.A.M. Symposium on concentrated vortex motions in fluids // J. Fluid Mech. 1965. 21. P. 1-20.
155. Mogi K. Migration of seismic activity // Bull. of the Earthquake Res. Inst. 1968. V. 46. P. 53-74.
156. Mogi K. Monthly distribution of large earthquakes in Japan // Bull. Of the Earthquake Research Inst. Of Tokyo. 1969. V. 47. Part 2. P. 419-427.
157. Plafker G., Savage J.C. Mechanism of the Chilean earthquake of May 21-22. 1960 // Bull. Geol. Soc. Amer. 1970. 81. N 4. P. 1001-1030.
158. Sauers J. The westward migration of geophysical events in the Aleutians, Springs, 1986 // Cycles. 1986. 37. N 9. P. 203-204.
159. Simkin T., Siebert L. Volcanoes of the world (catalogue). Published in association with the Smithsonian Institution. 1993. 350 p.
160. Shamsi S., Stacey F.D. Dislocation models and seismomagnetic calculations for California 1906 and Alaska 1964 earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1969. 59. N 4. P. 1435-1448.
161. Takeuchi A. On the episodic vicissitude of tectonic stress field of the Cenozoic northeast Hounshu arc, Japan // Formation of active ocean margins. / Ed. N. Nasu et al. Tokyo. 1985. P. 443-465.

162. *Takeuchi A.* Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan // *Memoir of the Geological Society of China*. 1986. № 7. P. 233–248.
163. *Usami T., Tsuno J.* Bibliography of field studies on major earthquakes in Japan // *Bull. of the Earthquake Research Inst. of Tokyo*. 1969. V. 47. Part 2. P. 271-394.
164. *Utsu T.* Seismic activity in Hokkaido and its vicinity // *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.* 1968. V. 20. P. 51-55.
165. *Vikulin A.V.* Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // *Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects* / Eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2006. P. 273-289.
166. *Vikulin A.V., Krolevets A.N.* Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // *Acta Geoph. Polonica*. 2002. V. 50. No 3. P. 395-411.
167. *Vikulin A.V., Tveritinova T.Yu.* Momentum-wave nature of geological medium // *Moscow University Geology Bulletin*. 2008. V. 63. N 6. P. 368-371.
168. *Ward S.M.* Earthquake mechanism tsunami generation: the Kurile Islands event of October 13, 1963 // *BSSA*. 1982. V. 72. N 3. P. 759-777.
169. *Wu Francis T., Kanamori H.* Source mechanism of February 4, 1965. Rat Island earthquake // *Geophys. Res.* 1973. 78. N 26. P. 6082-6092.
170. *Wyss M., Brune J.* The Alaska earthquake of 28 March 1964: a complex multiple rupture // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1967. 57. N 5. P. 1017-1023.
171. *Xie Xin-sheng.* Discussion on rotational tectonics stress field and the genesis of circum-Ordos langmass fault system. *Acta Seismol. Sinica*. 2004. V.17. N 4. P. 464 – 472.
172. *Yoffe E.H.* The moving Griffith crack // *Phil. Magaz.* 1951. V. 42. N. 330.

12. ГЕОЛОГИЯ И МЕХАНИКА

Форма Земли и геодинамика [Кузнецов, 2000, с. 198; 2008]

«Геодинамика занимает “ключевую” позицию в современной геологии и здесь накопилось наибольшее количество неразрешенных вопросов и парадоксов. Среди них - несоответствие степени сжатия современной Земли и скорости её вращения; несоответствие длины периметра Тихого океана идее распада Пангеи (парадокс Мезервея); нестыковка палеомагнитных оценок положений полюсов направлению дрейфа материков; несоответствие фактических данных о Земле, её ядре, мантии, форме геоида и гравитационным аномалиям идее конвекции в мантии и роли субдукции в этой конвекции и т.п.

Ниже попытаемся разобраться в некоторых из этих несоответствий, связанных с несоответствием сжатия современной Земли со скоростью ее вращения [Кузнецов, 2000, с. 198-202; 2008].

Парадокс Эверндена

Заголовком к этому разделу взято название недавно опубликованной статьи Дж. Ф. Эверндена [1997]. Автор анализирует известную монографию Г. Джеффриса [1960] в части оценки величин параметров, определяющих фигуру Земли, сравнивает результаты Джеффриса с работой Лэмба [2003] и приходит к ряду нетривиальных выводов. Основной из них состоит в том, что Земля сплюснута намного меньше, чем её жидкая модель. Автор объясняет реальное сжатие Земли значительно большей, чем ранее предполагалось, прочностью нижней мантии, а совсем не текучестью её вещества. Более того, он пытается доказать, что прочная мантия Земли сохраняется со времени её образования. Эвернден попутно доказывает, что знание параметров фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333$ ничего не говорит о реальном распределении плотности в Земле.

Джеффрис полагал Землю гидростатичной, однако при этом должно было выполняться правило: $1/H \approx 1/\varepsilon$ ($H = (C - A)/C$), где C и $A = B$ - полярный и экваториальные моменты инерции Земли, $\varepsilon = 5/4 \cdot \omega^2 a^3 / GM$ - сжатие Земли, ω - скорость её вращения, a - экваториальный, c - полярный радиусы Земли, величина, обратная сжатию: $1/\varepsilon = a/(a - c)$. Условие гидростатичности современной Земли, вращающейся с периодом $T = 24$ часа, справедливо при: $1/\varepsilon = 232$. Как известно, у Земли: $1/H = 305.5$, $1/\varepsilon = 297.8$ и $1/H - 1/\varepsilon = 7.8$, а наблюдаемая разность 6.75. Все это говорит о негидростатичности Земли. Длительность суток T для планеты, имеющей размер Земли и её среднюю плотность, должна быть равна: $T = 27.2$ часа, а не $T = 24$ часа, как у Земли. Подчеркнем, что наблюдаемый период вращения T соответствует $1/\varepsilon = 232$, причем отметим, что первым вычислил это ещё Ньютон. Для $T = 22$ часа, Эвернден подсчитывает: $1/\varepsilon = 200$. Он приходит к заключению, что если Земля замедляет свое вращение, то её сжатие не будет уменьшаться до тех пор, пока длина суток T не станет: $T \geq 27.2$ часа. Или, если Земля вращалась в прошлом быстрее и её возможная жидкая конфигурация была более сплюснутой, чем сейчас, но её реальное сжатие было бы таким же, как сейчас. Иначе, вывод, к которому приходит Эвернден: Земля никогда не имела сжатия $1/232$. Он формулирует следствия из этого вывода. Получается, что у Земли:

- 1) Очень высокая прочность нижней мантии;
- 2) Температура нижней мантии никогда не достигала значений, при которых возникает заметная текучесть под действием ротационных напряжений, т.о. исключается конвекция в нижней мантии;
- 3) Высокая прочность мантии требует, чтобы земное ядро было связано с верхней мантией и корой только с помощью кондуктивного (неконвективного) теплового потока;
- 4) Глубинные мантийные плюмы не могут существовать;

5) Отрицая мантийные плюмы, следует отвергнуть гипотезу о том, что граница ядра является источником иридия.

Отдавая должное Дж. Эвердену и его смелому утверждению о негидростатичности Земли и отмеченному им несоответствию T и $1/\varepsilon$, надо заметить, что сделанные им выводы излишне категоричны и противоречат наблюдениям. Например, группой сибирских геофизиков [Крылов, Мишенькин, Мишенькина и др., 1993], с использованием методов глубинного сейсмического зондирования, обнаружено, что астеносферная зона под Байкалом “простреливает” всю толщу мантии от её границы с ядром до земной коры (см. рис. 12.1). Этот выдающийся в физике Земли результат явно противоречит выводам Эверндена. Можно привести и другие примеры, но проблема, поставленная Эвернденом, остается. Может сложиться впечатление, что его выводы противоречат модели горячей Земли, согласно которой мантия нарастается на границе с ядром и, следовательно, если Эвернден прав, и нижняя мантия, без какой-либо динамики ее вещества, существует с момента образования Земли, то, следующего из модели горячей Земли, явления - происходить не может. Можно ли найти естественное и очевидное объяснение несоответствию длительности суток и сжатию в рамках нашей модели? Попытаемся найти такое решение.

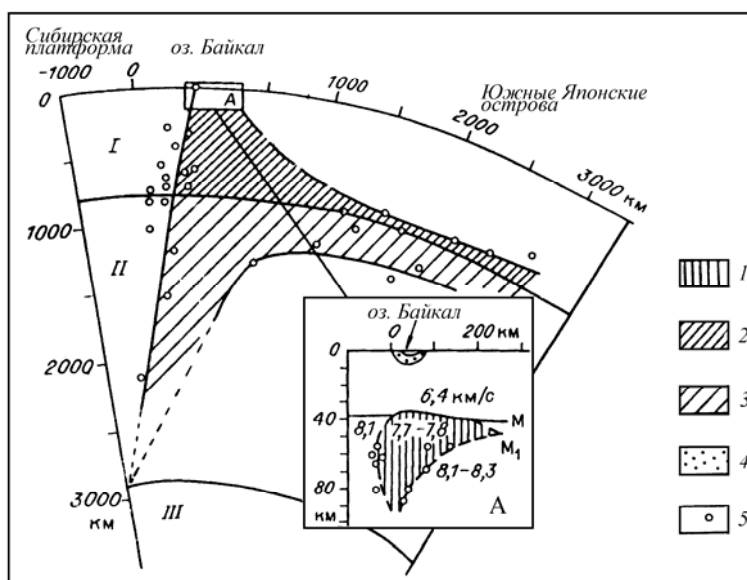


Рис. 12.1. Сейсмический разрез мантии по линии Байкал - южные Японские острова (на врезке - разрез земной коры и верхов мантии через Южно-Байкальскую впадину): 1 – аномальный слой верхней мантии; 2 – аномальная зона с дефицитом скорости $v_p = 0.09$ км/с; 3 – то же с дефицитом 0.07 км/с; 4 – осадочные породы; 5 – проекция пересечения сейсмического луча с контуром аномальной мантии. I – верхняя, II – нижняя мантия, III – ядро Земли [Крылов, Мишенькин, Мишенькина и др. 1993].

Оценки М.В. Стоваса

Обратимся к работам М.В.Стоваса [1975], к сожалению, не получившим должного освещения в литературе по физике Земли. (Такого же мнения придерживается и К.Ф. Тяпкин [1998], автор новой модели геоизостазии, см. ниже – А.В.). Он обратил внимание на очевидный факт, что изменение угловой скорости вращения Земли обуславливает изменение полярного сжатия упруго-пластического тела Земли, что, в свою очередь, приводит к сопряженной деформации всех её основных параметров. При этом возникают широтные, меридиональные и радиальные напряжения в коровом слое, что является причиной возникновения особо напряженного состояния в широтных зонах между $30 - 40^\circ$ в обоих полушариях - зонах перемены знака главных напряжений.

Изменение ротационного режима Земли вызывает соответствующее изменение потенциала центробежных сил и, следовательно, изменение главной части потенциала U деформирующих сил, который непосредственно определяет сжатие Земли:

$$U = \frac{1}{3} \omega^2 a^2 (1 - 3 \sin^2 \varphi) . \quad (12.1)$$

Величина полной деформирующей силы:

$$F = \frac{1}{3} \omega^2 a (1 + 3 \sin^2 \varphi)^{1/2} . \quad (12.2)$$

Формулы, аналогичные (12.2), могут быть записаны для составляющих силы F (F_N , F_R , F_k) [Стовас, 1975, с. 27]. Из решения уравнений для составляющих силы для эллипсоида Красовского следуют 4 вывода:

- 1) нормальная F_N (а, следовательно, и радиальная F_R) деформирующая сила на “критической” параллели ($\pm 35^\circ$) равна нулю;
- 2) на полюсах и экваторе нормальная сила F_N равна силе F .
- 3) тангенциальная деформирующая сила F_k , на “критической” параллели, равна F .
- 4) на полюсах и экваторе тангенциальная сила F_k равна нулю.

При изменении угловой скорости вращения Земли ω будут изменяться F_k и F_R :

$$\frac{\partial F_k}{\partial \omega} \approx 2\omega a(1 - \varepsilon) \frac{\partial r}{\partial \varepsilon}, \quad \frac{\partial F_R}{\partial \omega} \approx 2\omega(1 - \varepsilon) \frac{\partial r}{\partial \varepsilon}, \quad (12.3)$$

здесь $\partial r / \partial \varepsilon$ сопряженное изменение радиуса-вектора эллипсоида; r - радиус-вектор эллипсоида; a - экваториальная полуось; ε - сжатие. Рис. 12.2а демонстрирует изменение F_R в зависимости от широты φ при вариации ротационного режима Земли. Изменение деформирующих сил F_R и F_k при изменении скорости вращения вызывает изменение формы геоида. Перемена знака силы происходит на 35-ой параллели.

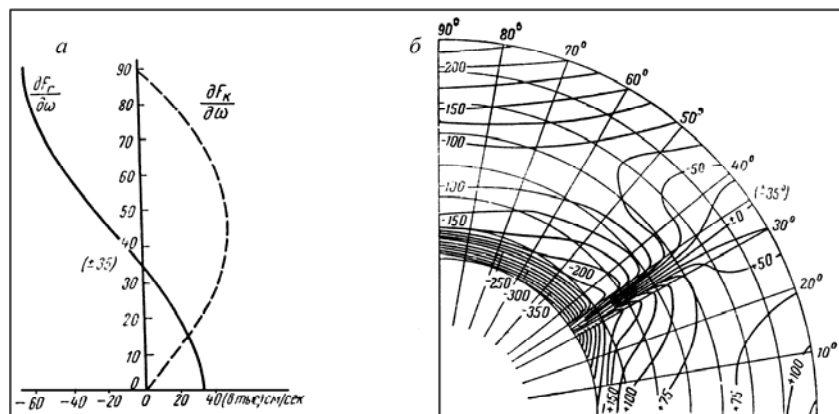


Рис. 12.2. а - Изменение F_R и F_k в зависимости от широты φ при вариации ротационного режима Земли; б - Распределение главного напряжения по широте и глубине. Модель D . Изолинии проведены через 25 дин/см^2 [Стовас, 1975].

Изменение параметров эллипсоида при изменении ε от $1/210$ к современному $1/298$ характеризуется тем, что площадь земной поверхности в районе экватора уменьшается (на 184214 км^2), а площадь в районах полюсов увеличивается, соответственно (на 183474 км^2). Величина радиуса a уменьшается примерно на 3 км , а c - возрастает примерно на 6 .

М.В. Стовас подсчитал изменения главных напряжений σ при изменении полярного сжатия на 10^{-7} , для четырех моделей *A*, *B*, *C* и *D*:

- 1) *A*: $R - R_0 = 64 \text{ км}$; $\sigma = 2 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$;
- 2) *B*: $R - R_0 = 127 \text{ км}$; $\sigma = 4 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$;
- 3) *C*: $R - R_0 = 640 \text{ км}$; $\sigma = 7 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$;
- 4) *D*: $R - R_0 = 2900 \text{ км}$; $\sigma = 2 \times 10^{12} \text{ дин/см}^2$;

здесь R - радиус Земли, R_0 - внутренний радиус сферы.

Как можно видеть из этих оценок и рис. 12.2б, величина главного напряжения σ_1 , оцененная М.В. Стовасом для различных глубин $R - R_0$, заметно превышает литостатическое давление Земли на этих глубинах.

Оценки В.В.Кузнецова величин лапласовых “поверхностных” напряжений, возникающих в верхней оболочке литосферы при её “растекании”, показывают, что для соблюдения Землей принципа минимизации гравитационной энергии возникают усилия $> 10^{11} \text{ дин/см}^2$, по порядку величины близкие приведенным выше.

Ответ на вопрос Дж.Ф. Эверндена

Итак, суть парадокса, замеченного Эвернденом, заключается в сильной негидростатичности Земли. Это выражается в том, что для $T = 24 \text{ часа}$, Земля должна была бы обладать обратным сжатием $1/\varepsilon = 232$, в то время как она имеет $1/\varepsilon = 298$. Вывод, к которому он приходит, состоит в том, что “Земля всегда была такой” и никогда не была гидростатичной. Заметим, что Дж. Эвернден не сомневается в том, что Земля раньше вращалась заметно быстрее, правда, причину замедления он не обсуждает.

Вопрос Дж. Эверндена поставим в такой плоскости: была ли на Земле ситуация, когда $1/\varepsilon = 232$, или сжатие Земли всегда было $1/\varepsilon = 298$? Согласно нашей модели, Земля расширяется. Если бы она не вращалась, то $\varepsilon = 0$, а $1/\varepsilon = \infty$. Если бы Земля была гидростатичной, то, как мы отмечали, $1/\varepsilon_g = 232$, а она имеет: $\varepsilon_g > \varepsilon > 0$. В течение эволюции радиус Земли (R) увеличивался, возрастал и период вращения T . (За счет сохранения момента количества движения Земли: $MvR = \text{const}$, $v = R/T$, период T тоже возрастал: $T \sim R^2$). Длительность периода вращения $T = 16 \text{ часов}$ примерно соответствует (по нашей модели) времени около 400 млн лет назад, когда началось энергичное формирование мантии. Предположим, что к этому моменту Земля была ещё “жидкой”, а дальше стала наращиваться жесткая мантия. Этот момент соответствует: $1/\varepsilon = 100$ (при $T = 16 \text{ часов}$). На рис. 12.3 прямая 1 показывает зависимость $1/\varepsilon(T)$ для реальной Земли $1/\varepsilon = 298$ при $T = 24 \text{ часа}$. Прямая 2 вычислена по формуле Лэмба ($1/\varepsilon \sim T$) для гидростатичной Земли [Эвернден, 1997].

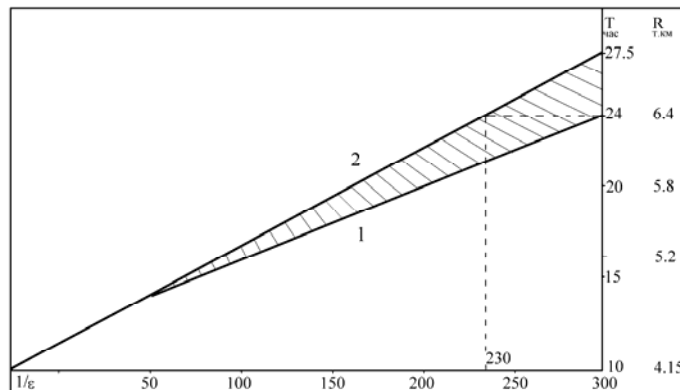


Рис. 12.3. а) Зависимость величины обратного сжатия $1/\varepsilon$ от длительности периода вращения Земли T для: 1 - реальной и 2 - гидростатичной Земли.

Разность величин $1/\varepsilon$ показывает степень негидростатичности Земли. Из этого рисунка следует, что степень негидростатичности Земли увеличивается по мере увеличения T , иначе, по мере её эволюции и расширения. Сплюснутость гидростатичной, “жидкой” Земли больше, чем жесткой. Обозначим экваториальный радиус “жидкой” Земли: $a_1 = a_0 (1 + \varepsilon_1/3)$, а “жесткой”, $a_2 = a_0 (1 + \varepsilon_2/3)$. Введем параметр $\delta = (a_1 - a_2) / (a_1 - a_0) = 1 - \varepsilon_2/\varepsilon_1$. Он характеризует изменение формы Земли по мере увеличения её размера. Если в начале процесса наращивания мантии $\delta = 0$, что говорит о гидростатичности Земли, то в конце процесса, у современной Земли, $\delta = 0.22$ (22 %). Для абсолютно твердой сферы: $\delta = 1$. Введенный нами параметр, в определенном смысле, играет ту же роль, что и числа Лява. Он показывает, насколько жестче становится Земля, точнее, её мантия, по мере эволюции. В отличие от нашего параметра, числа Лява для абсолютно твердой сферы равны нулю и больше нуля, для однородной жидкой сферы.

Таким образом, парадокс Эверндена разрешается в модели горячей Земли сравнительно просто: параметр фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$ говорит о том, что она расширялась в течение своей эволюции, проходя все значения $1/\varepsilon$, а степень негидростатичности современной Земли достигла примерно 22 %. Сейчас самое время вернуться к вопросу: почему Земля стремится к гидростатическому равновесию с фигурой с обратным сжатием $1/\varepsilon = 298$, а не 232, как этого следовало бы ожидать?

Отвечая на этот вопрос, обратимся к рис. 12.3, из которого следует, что Земля, эволюционируя и расширяясь путем наращивания толщины мантии, становилась все в меньшей и меньшей степени гидростатичной. Раньше Земля была сплюснута в большей степени и, по мере уменьшения скорости её вращения, она «отслеживала» скорее не изменение ω , а dR/dt .

Согласно модели «Горячей Земли» генерация мантии происходит в D'' слое, скорость процесса кристаллизации «контролируют» pT - условия в этом слое, которые, в свою очередь, определяются гидродинамикой внешнего ядра и её степенью сжатия. Так как внутренние оболочки Земли всегда имеют сжатие меньшее, чем внешние, именно это обстоятельство и объясняет, почему на Земле $1/\varepsilon = 298$, а не 232» (конец цитаты).

Форма Земли и ее строение: новые подходы

Новая модель геоизостазии
[Тяпкин, 1998; с. 178-180]

«Особенностью классических моделей изостазии является замена равновесного состояния Земли равновесным состоянием земной коры (литосферы). Эта замена, как полагает автор новой модели, отвечала уровню знаний о строении нашей планеты, когда земную кору представляли «плавающей» в субстрате (магме). В настоящее время накоплены данные, выводы из которых противоречат основным положениям классических моделей изостазии. Остановимся на некоторых из них.

Исходя из современных представлений о строении Земли, нельзя считать правомерной замену ее равновесного состояния равновесным состоянием земной коры. Такая замена представляет собой искусственное обособление одной части планеты от тесно связанной с ней остальной ее части. При изучении равновесного состояния Земли ее надо рассматривать как единую систему.

Принятие первого тезиса неизбежно влечет за собой принятие второго, сущность которого заключается в следующем. До тех пор, пока решались частные геодезические задачи на ограниченных территориях или изучались особенности геологического строения отдельных районов, пренебрежение изменением ротационного режима Земли в какой-то мере можно было считать оправданным. (Здесь К.Ф. Тяпкин не точен. Как показано в четвертом разделе, учет вращения отдельно взятого блока приводит к принципиально новым выводам, например, появлению новой модели очага, напряжения

в которой являются дальнодействующими. И такой эффект дальнодействия в силу тех или иных обстоятельств действительно можно не заметить, осуществляя исследования только на ограниченных по площади территориях. - *А.В.*) Но коль скоро ставится задача изучения равновесного состояния планеты в целом, определяемого ротационным режимом Земли (положением оси вращения, угловой скоростью и др.), не учитывать его изменения, по-видимому, нельзя. (Здесь К.Ф. Тяпкин опять не точен. Вращение Земли в классических теориях всегда учитывалось, так как равновесная форма планеты принималась в виде эллипсоида, что соответствует вращающейся планете. – *А.В.*).

Введем понятие равновесного состояния Земли в целом, назвав его *геоизостазией*. Геоизостазии должно соответствовать такое состояние Земли, которое она приняла бы, если бы слагающий ее субстрат в пределах каждой оболочки стал жидким, не смешиваясь. В этом случае нашу планету можно было бы охарактеризовать совокупностью уровенных поверхностей, представляющих собой систему сфероидов со все уменьшающимися коэффициентами сжатия, в формировании которых участвуют массы всей Земли, включая гидросферу и атмосферу. Строго говоря, в достижении геоизостазии должны участвовать и все физические поля Земли.

Рассмотрим условия достижения геоизостазии. В качестве условия равновесия Земли эквивалентного закону Паскаля, использовавшемуся в классических моделях изостазии земной коры (литосферы), с учетом малости величины параметра сжатия ϵ , можно принять равенство веса секторов Земли, вырезанных одинаковыми центральными телесными углами $\Delta\Omega$. Количественно это условие соответствует интегральному выражению:

$$\Delta\Omega \int_0^{\infty} \rho(r)g(r)r^2 dr = const, \quad (12.4)$$

где $\rho(r)$ - изменения плотности в пределах изучаемого сектора Земли, например, задаваемого соотношениями (5.1) и (5.2), (5.1) и (5.7) или зависимостями, представленными на рис. 5.2; $g(r)$ - ускорение свободного падения в точках сектора на расстоянии r от центра Земли, например, задаваемого соотношением (5.15).

Выражение (12.4) можно представить также в виде трех интегралов

$$I_1 + I_2 + I_3 = const, \quad (12.5)$$

где

$$I_1 = \Delta\Omega \int_0^{R_i} \rho(r)g(r)r^2 dr, \quad I_2 = \Delta\Omega \int_{R_i}^{R_e} \rho(r)g(r)r^2 dr, \quad I_3 = \Delta\Omega \int_{R_e}^{\infty} \rho(r)g(r)r^2 dr,$$

где R_i, R_e - внутренний и внешний радиусы мантии Земли.

Практически, исходя из представлений о квазизидком внешнем ядре, величину I_1 можно считать постоянной. Справедливость этого утверждения непосредственно вытекает из известной теоремы: в случае равновесия жидкости уровенные поверхности являются в то же время и поверхностями равного давления [Михайлов, 1939]. При решении вопроса о равновесном состоянии мантии Земли значениями интеграла I_3 , характеризующими атмосферное давление на земной поверхности, в связи с их малостью по сравнению с I_2 можно пренебречь. С учетом приведенных замечаний выражение (12.4) принимает вид:

$$\Delta\Omega \int_{R_i}^{R_g} \rho(r)g(r)r^2 dr = const. \quad (12.6)$$

Вторым условием достижения геоизостазии примем равенство потенциала в каждой точке Земли его теоретическому значению, соответствующему введенному определению геоизостазии. Практически выполнение этого условия удобнее проверять на поверхности Земли, а вместо значений потенциала воспользоваться отметками геоида R_g и сфероида R_c . Разность этих отметок ζ можно принять в качестве критерия уравновешенности Земли. В частности, согласно введенному определению геоизостазии геоид можно признать находящимся в состоянии равновесия при условии выполнения равенства:

$$\zeta = R_g - R_c = 0. \quad (12.7)$$

В самом деле, если бы геоид стал жидким, т.е. ослабилась бы взаимосвязь между слагающими его твердыми частицами, то он принял бы фигуру равновесия – сфероид. Однако, поскольку существуют отклонения геоида от сфероида, обусловленные неоднородностями строения Земли, то должны существовать и напряжения, стремящиеся выровнять эти неоднородности, привести их в соответствие с фигурой ее равновесия. При этом, естественно, закон распределения напряжений будет определяться функцией отклонения геоида от соответствующего ему сфероида.

Приняв за критерий уравновешенности Земли величину отклонения геоида от сфероида ζ , можно определить *направленность* геологического развития тектоносферы. Она должна быть такой, чтобы «утяжелять» области с отрицательными значениями ζ и «облегчать» области с положительными значениями ζ . Назовем возможные физико-геологические процессы, участие которых в достижении геоизостазии наиболее вероятно.

Утяжеление отдельных областей Земли может быть осуществлено в результате следующих физико-геологических процессов: подъема блоков тектоносферы, приводящих к увеличению отметок геоида, заполнения опущенных участков геоида водой; оледенения участков земной поверхности; «пропитывания» гранитной оболочки более тяжелыми базальтоидами и гипербазитами (дайкообразование); образования траппов (платобазальтов); возможного перемещения глубинных границ вверх вследствие фазовых переходов вещества в мантии типа базальт $\leftrightarrow$ эклогит.

Разгрузка отдельных областей Земли может быть осуществлена в результате протекания следующих процессов: опускания блоков тектоносферы, приводящего к уменьшению отметок геоида; денудация выступающих блоков тектоносферы или таяния на них льда, возникшего в предыдущую эпоху оледенения; заполнения верхних частей блоков тектоносферы легкими магматическими образованиями кислого состава (гранитизация); возможного перемещения глубинных границ вниз вследствие фазовых переходов вещества в мантии типа базальт $\leftrightarrow$ эклогит.

Перечисленные выше процессы реализуются в рамках законов, установленных на основании принципа наименьшего действия [Клушин, 1963]. В частности, в этой работе показано, что в пределах достаточно крупных секторов Земли местные изменения их радиусов должны обязательно сопровождаться вертикальным перераспределением плотности. Физическим законом, регулирующим перераспределение плотности в пределах секторов Земли, вырезанных телесными углами $\Delta\Omega$, является закон сохранения момента количества движения. В его интегральное выражение входит расстояние участвующих масс от центра планеты r в четвертой степени. Следовательно, наиболее существенным значением момента количества движения

обладают массы геосфер, удаленных от центра больше, чем на 0,8 радиуса Земли. В частности, момент количества движения Земли почти наполовину определяется массами, сосредоточенными в интервале глубин от 0 до 800 км, соответствующем *тектоносфере*» (конец цитаты).

Принцип минимизации – основной закон эволюции планет
[Кузнецов, 2000; с. 86-89, 324-332]

«Всем известно, что Земля, как и другие планеты, имеет форму шара. Однако мало кто обращает внимание на этот общеизвестный факт, который, тем не менее, указывает на то, что и Земля, и планеты, подвержены действию принципа минимизации гравитационной энергии. Выполнение этого принципа выражается как требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара.

Обратим внимание на ряд моментов, в той или иной степени связанных с гравитационной энергией и принципом её минимизации у Земли и планет. Во-первых, при оценке величины гравитационной энергии необходимо учитывать теорему вириала. Во-вторых, принцип минимизации “заставляет” планеты стремиться к гидростатическому равновесию. Пути достижения этой цели известны, это геодинамика, сейсмичность и вулканизм. В-третьих, действие принципа минимизации автоматически приводит к гравитационной дифференциации вещества планеты и т.д.

Теорема вириала. В самогравитирующей системе, состоящей из большого числа элементов, в отсутствие радиальных движений, полная кинетическая энергия E и потенциальная энергия P связаны и между собой соотношением, называемым теоремой вириала:

$$2E + P = 0 \quad (12.8)$$

Поскольку полная энергия системы равна сумме кинетической и потенциальной, из 12.8 вытекает:

$$E = -1/2P.$$

Именно такую энергию необходимо затратить, чтобы разъединить систему на отдельные “частицы” на бесконечно большие расстояния.

Гравитационная энергия Земли рассчитывается из теоремы вириала следующим образом [Магницкий, 1965] ... Будем считать, что m_i и m_k - массы материальных точек на расстоянии r_{ik} , тогда потенциальная энергия системы точек (частиц) выражается как:

$$E = -G \sum m_i m_k / r_{ik}, \quad (12.9)$$

при этом за нуль принята энергия при бесконечном расстоянии между точками. Перегруппируем слагаемые в (12.9):

$$-E = 1/2 m_1 G (m_2 / r_{12} + m_3 / r_{13} + \dots + m_n / r_{1n}) + \dots \quad (12.10)$$

Если перейти от системы частиц в (12.9) объемному распределению масс с плотностью ρ , то получим:

$$E = -1/2 \int W \rho dV. \quad (12.11)$$

Для однородной сферы потенциал W на расстоянии l от центра будет:

$$W = 2\pi G\rho(R^2 - l^{2/3}), \quad (12.12)$$

после подстановки (12.12) в (12.11) получаем:

$$E = -3/5GM^2 / R. \quad (12.13)$$

Гравитационная энергия Земли:

$$E \approx -2,25 \cdot 10^{39} \text{ эрг.}$$

Роль землетрясений в минимизации гравитационной энергии

Рассмотрим результаты работ, посвященных роли сильных землетрясений в изменении гравитационной энергии Земли [Chao, Gross, 1987; Chao, Gross, 1995; Chao, Gross, Dong, 1995]. Авторы этих работ считают, что землетрясения, кроме энергии диссипации, выделившейся при разрушении, переносят значительное количество энергии и перераспределяют её между вращением Земли, упругим полем, гравитационным полем и теплом. Авторы вычислили косейсмическое изменение глобальной гравитационной энергии, индуцированной 11015 большими землетрясениями, которые произошли с 1977 по 1993 гг., и полагают, что эти землетрясения привели за это время к весьма заметному (около $2 \times 10^{12} \text{ Bm}$) уменьшению величины гравитационной энергии Земли (рис. 12.3). Это значительно больше, чем та доля энергии, которая пошла за это время на увеличение скорости вращения Земли ($6.7 \times 10^9 \text{ Bm}$) и больше энергии сейсмических волн ($4.7 \times 10^9 \text{ Bm}$).

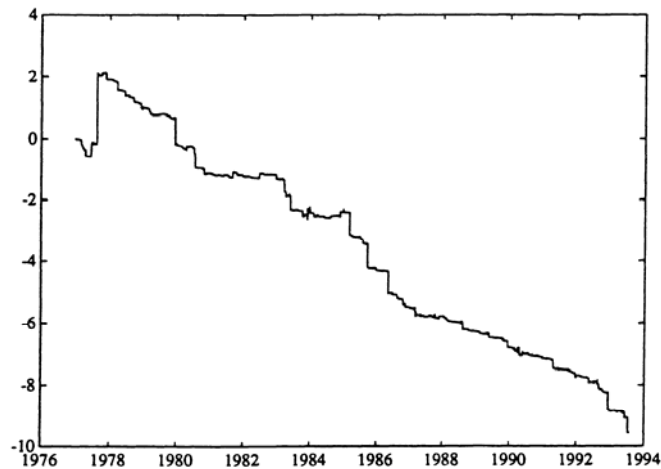


Рис. 12.3. Уменьшение кумулятивной гравитационной энергии Земли индуцированное 11015 землетрясениями в течение 1977 – 1993 гг. [Chao, Gross, 1995].

Принято считать, что энергия землетрясения идет частично на разрушение, частично на нагрев, частично излучается в виде сейсмической волны. Это именно так, по мнению B.F. Chao и R.S. Gross, если не учитывать, что Земля самогравитирующая вращающаяся система. Учет последнего обстоятельства приводит к необходимости принимать во внимание изменение статического поля деформаций Земли. Интегрированное по всему земному шару перераспределение масс, связанное с этим полем смещений, изменяет как момент инерции Земли, и скорость её вращения, так и гравитационное поле, и гравитационную энергию Земли. Изменение гравитационной потенциальной энергии равно работе, выполненной против силы тяжести веществом Земли при смещении $u(r)$:

$$\Delta E = - \int \rho(r) u(r) g(r) dV, \quad (12.14)$$

где $\rho(r)$ - плотность, $g(r)$ - ускорение силы тяжести, интегрирование выполняется по объему Земли V .

В.Ф. Чо и Р.С. Гросс использовали данные Гарвардского каталога о величинах тензора сейсмического момента центра ряда землетрясений с магнитудой больше 5, произошедших с 1977 по 1993 г.г. Обнаружилось, что землетрясения имеют неслучайное поведение, характеризуемое тенденцией к уменьшению гравитационной энергии Земли.

(Другими словами, одним из результатов, полученных В.Ф. Чо и Р.С. Гросс, по мнению В.В. Кузнецова, является утверждение о взаимосвязанности всех землетрясений планеты с магнитудами $M > 5$; при этом, механизм, объединяющий такую взаимосвязь, приводит к уменьшению гравитационной энергии Земли. Такой вывод является сильным аргументом, подтверждающим главное допущение в модели, разрабатываемой С.В. Мишиным [1993, с. 106]: «землетрясение – это перемещение блока горных пород и удар при его остановке» - А.В.).

На рис. 12.3 показано кумулятивное изменение гравитационной энергии, обусловленное 11015 большими землетрясениями. То, что землетрясения стремятся уменьшить гравитационную энергию Земли, подтверждает тот факт, что именно сила тяжести является их причиной и управляющим механизмом. В.Ф. Чо и Р.С. Гросс вычислили, пользуясь данными Гарвардского каталога, изменение кумулятивной энергии этих землетрясений в течение этого же периода времени (рис. 12.4). Оба рисунка находятся в хорошем согласии, из них видно, что увеличение энергии сейсмических волн землетрясений, за один и тот же промежуток времени, примерно на три порядка меньше, чем убыль гравитационной энергии Земли. Основной вывод В.Ф. Чо и Р.С. Гросс состоит в том, что землетрясения «делают» Землю более компактной и, как ни странно, более напряженной.

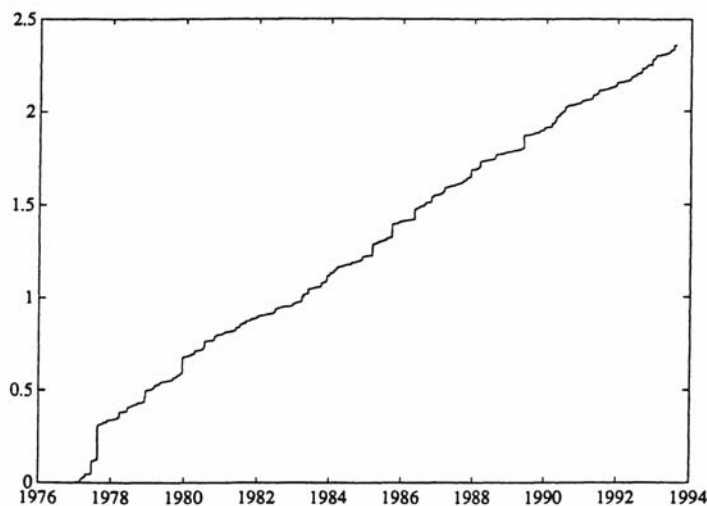


Рис. 12.4. Увеличение кумулятивной энергии сейсмических волн индуцированное 11015 землетрясениями в течение 1977 – 1993 гг. [Chao, Gross, 1995].

Оценим порядок величины гравитационной энергии, теряемой Землей благодаря “работе” землетрясений. В год это составляет примерно 10^{27} эрг, или, иначе (хотя эта оценка большого смысла не имеет), землетрясениям потребовалось бы примерно 10^{12} лет для полной диссипации всей гравитационной энергии Земли. “Потери” гравитационной энергии примерно в 10 раз меньше теплового потока Земли.

Представим потенциал силы тяжести Земли в виде суммы двух потенциалов [Серкеров, 1990]:

$$W(x, y, z) = U(x, y, z) + T(x, y, z), \quad (12.15)$$

где U - потенциал силы тяжести, T - потенциал масс, на который потенциал силы тяжести Земли отличается от потенциала сфероида, т.е. T - это часть потенциала силы тяжести реальной Земли, связанная со значениями аномалий силы тяжести на поверхности Земли. Потенциал T называется возмущающим потенциалом. Тогда уравнение:

$$W(x, y, z) = U(x, y, z) + T(x, y, z) + C, \quad (12.16)$$

где C - постоянная, $T(x, y, z)$ - уравнение геоида, а $U(x, y, z) = C_1$, - уравнение нормального сфероида (C_1 - константа, соответствующая сфероиду).

Поверхность, ортогональная силе тяжести (а не силе притяжения), поверхность постоянного потенциала силы тяжести (хотя сама сила тяжести на нем не постоянна), поверхность, совпадающая со средним уровнем океана, называется геоидом. При движении тела вдоль поверхности геоида сила тяжести не совершает работы.

Геоид - ортогональная силе тяжести поверхность, всегда горизонтальна. При наличии аномальных глубинных масс, направления силы тяжести в разных точках поверхности не будут взаимно параллельны и ортогональная к ним поверхность будет отличаться от плоскости. В этом случае наблюдаются изменения формы геоида – т.н. ундуляции. Высота ундуляции геоида ζ показывает, насколько локальная поверхность геоида, отличается от геометрической плоскости. Как правило, изменение силы тяжести Δg коррелирует с ζ . Рассмотрим пример. На глубине d находится масса m . Величины Δg и ζ над глубинной массой будут равны:

$$\Delta g = Gm/d^2; \quad \zeta = Gm/gd. \quad (12.17)$$

Известно, что на Земле $H/R \approx 10^{-3}$; $\Delta g/g \approx 10^{-4}$; $\zeta/R \approx 10^{-5}$. Здесь H - высота гор, а R радиус Земли. Складывается впечатление, что Земля лучше всего скомпенсирована по высоте геоида. Подставим значения: $\Delta g/g = (m/M)(R/d)^2$; $\zeta/R = (m/M)(R/d)$ и разделив ζ/R на $\Delta g/g$, получим, что это отношение $\sim d/R$. В нашем случае $d/R \approx 0.1$. Отсюда следует, что чем выше Земля скомпенсирована по высоте геоида ($\zeta/R \rightarrow \min$) относительно аномалий силы тяжести, тем о меньших величинах d можно говорить: $\zeta/d = \Delta g/g$ (сравни с (12.7) – А.В.).

Замечание по поводу сжатия Земли

Сжатие Земли $\varepsilon = (a_1 - a_2)/a_1 = 1/298.25$. Центробежное ускорение на экваторе $g_{\omega} = 3.39 \text{ см/с}^2$. Отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести Земли: $h = g_{\omega}/g = 1/289$. Сжатие жидкой Земли определяется из уравнения Клеро: $4/5 \varepsilon_g = \alpha$, откуда $\varepsilon_g = 1/232$ (оценка Ньютона). Обычно, для сравнения, приводится оценка по модели Гюйгенса, полагавшего, что вся масса Земли сосредоточена в её центре, т.е., казалось бы, радиус Земли $a = 0$. Тем не менее, принято считать, что можно оценить степень сжатия Земли по модели Гюйгенса:

$$\varepsilon_g = \frac{1}{2} [\omega^2 a^3 / (GM)] = \frac{1}{2} h = \frac{1}{578},$$

у Буллена – $\varepsilon_g = 1/580$.

Но ведь по модели Гюйгенса $a = 0$! Далее делается, на взгляд В.В. Кузнецова, совершенно неправильный вывод: так как обратное сжатие Земли (1/298) занимает промежуточное положение между 1/232 и 1/578, то это якобы говорит о характере распределения плотности по радиусу Земли, что неверно.

Принцип минимизации энергии

Принцип минимизации гравитационной энергии равнозначен известной в физике вариационной задаче о минимуме поверхностной свободной энергии:

$$\alpha \int dS = \min, \quad (12.18)$$

где α - поверхностное натяжение, а S - площадь поверхности раздела, в нашем случае, площадь поверхности гравитирующего шара радиусом R . Если поверхность раздела отличается от сферической, и можно говорить о двух радиусах R_1 и R_2 , немного отличающихся друг от друга, на поверхности возникает Δp - поверхностное давление:

$$\Delta p = \alpha (1/R_1 + 1/R_2) \approx 2\alpha/R. \quad (12.19)$$

Это известная формула Лапласа. Отсюда следует условие равновесия поверхности:

$$1/R_1 + 1/R_2 = \text{const.}$$

Если вся поверхность свободна, то это условие означает, что она должна иметь шарообразную форму.

Не учитывая вращения Земли, выполнение условия равновесия её поверхности, следующего из соблюдения принципа минимизации гравитационной энергии, приводит к стремлению Земли принять форму шара. Если учесть вращение, то равновесной формой будет сфероид, эллипсоид вращения. Земля достигнет гидростатического равновесия в тот момент, когда высота геоида в целом по Земле окажется равной нулю.

Если принять во внимание значение величины “поверхностного натяжения” литосферы α , полученное в рамках модели «горячей Земли» ($\alpha \approx 10^{19}$ дин/см²), то поверхностное, лапласово давление оказывается вполне существенным: $p = 10$ кбар. Такое давление способно “заставить” литосферу растекаться, аналогично тому, как это происходит с каплями жидкости.

На каких объектах может проявляться наш принцип минимизации гравитационной энергии? Можно ли оценить тот минимальный размер космического объекта, где принцип “начинает работать”? Из самых общих представлений ясно, что далеко не любой твердый объект способен “собираться в каплю”. В рамках модели горячей Земли было показано, что если:

$$GM/R \geq U_{\Pi},$$

где U_{Π} - теплота плавления вещества планеты ($U_{\Pi} \approx 10$ кДж/г), то $R > 1$ тыс км. Таким образом, все большие спутники и планеты подвержены действию этого принципа. Надо заметить, что интенсивно он проявляется только в том случае, если в недрах космического тела еще осталось вещество в метастабильном состоянии, подобное тому,

что находится во внутреннем ядре Земли. Только у такого тела может происходить эффективное действие принципа минимизации, т.е. могут происходить циклы сжатия и расширения. Однако даже если уже нет необходимого запаса энергии на прохождение циклов, представляется, что на планете или большом спутнике могли бы происходить процессы минимизации её гравитационной энергии. Вполне возможно, что подобный процесс является причиной выделения диссипативной энергии, причиной вулканизма и сейсмичности Марса, Луны, Ио и др. Т.е., иначе, он является источником энергии на тех планетах и спутниках, на которых уже давно нет внутреннего ядра с его колоссальным запасом энергии. Хотя, с другой стороны, мы рассматриваем как источник энергии на таких объектах фазовый переход кристаллизации.

Механизмы реализации принципа минимизации

Выше мы называли их: это геодинамика, т.е. “течение” - горизонтальный перенос вещества литосферы; вулканизм и сейсмичность. Вулканизм и сейсмичность, в определенном смысле, являются механизмами вертикального (радиального) переноса. При этом либо переносится вещество, что происходит при излиянии вулкана, либо переносится тензор момента - при землетрясении. Легко видеть, что эти механизмы взаимосвязаны, хотя подчас такую связь выявить нелегко. Например, горизонтальный перенос изменяет структуру напряжений части литосферы, что вызывает возникновение землетрясения, которое приводит к перераспределению касательных напряжений, являющихся причиной течения и т.д. Аналогичную цепочку взаимосвязей можно проследить и при взаимодействии: геодинамика-вулканизм-геодинамика. Используя подходы, развитые в синергетике, можно считать, что горизонтальное течение - это «перенос», а сейсмичность и вулканизм - явления по своей физике, близкие к “просачиванию” - перколяции. Как принято считать в синергетике, симбиоз взаимодействующих механизмов переноса и перколяции приводит к самоорганизации структуры, в которой проявляются эти механизмы.

Самоорганизующиеся системы описываются уравнением Фоккера-Планка (ФП):

$$\frac{\partial f(q,t)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial j}{\partial q}\right)_j = \frac{d(\eta q f)}{dq} + \frac{1}{2}Q \frac{d^2 f}{dq^2}, \quad (12.20)$$

где $K = \eta q$ - коэффициент дрейфа, а Q - коэффициент диффузии. В нашей задаче K характеризует процессы горизонтального переноса - геодинамики, а Q - процессы сейсмичности или вулканизма, т.е. перколяции.

При решении уравнения ФП находятся стационарные решения, когда аргумент не зависит от времени, либо находятся решения, зависящие от времени, но не зависящие от координаты. Стационарное решение уравнения ФП для одномерного случая выглядит следующим образом:

$$f(q) = N \exp(-2V(q)/Q), \quad (12.21)$$

где $V(q) = -\int K(q) dq$, имеет смысл потенциала, а N - нормировочный множитель.

Физический смысл решения уравнения ФП можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия и т.п.) тем меньше вероятность появления этого решения. По-видимому, эта особенность (её называют “ $1/f$ ” фликкер-шумом) является фундаментальным свойством природы. Многие сейсмологи склонны считать график повторяемости землетрясений, известный как закон Гутенберга-Рихтера, фликкер-шумом. В этом случае он показывает, что в открытой диссипативной

структуре, имеющей целью минимизировать гравитационный потенциал, или, что примерно одно и то же, минимизировать высоту геоида, происходят процессы самоорганизации. Т.о. мы приходим к важному выводу: реализация принципа минимизации высоты геоида и стремление планеты к установлению гидростатического равновесия, сопровождается проявлением самоорганизации» (конец цитаты).

Идея использования в задаче оптимизации формы Земли аналогии с поверхностным натяжением жидкостей и твердых тел крайне заманчива. Однако возникает много вопросов, ответы на которые пока не получены.

На наш взгляд, одним из главных является следующий. Оптимальная форма жидкости (и твердого тела, кристалла в том числе) определяется балансом между силой тяготения и молекулярными силами. Такой баланс и обеспечивает известные значения коэффициентов поверхностного натяжения для жидкостей и твердых тел, которые лежат в пределах четырех порядков: $1 - 10^4 \text{ эрг/см}^2$. Получаемое из модели горячей Земли значение коэффициента натяжения поверхности Земли, равное 10^{19} эрг/см^2 , на много (один – два десятка) порядков по величине превосходит эти известные значения. Какой физический механизм обеспечивает такое большое по величине натяжение поверхности Земли и как он соотносится с силами гравитации?» (конец цитирования).

Процесс самоорганизации [Тимашев, 2003]

«Была разработана концепция "самоорганизованной критичности" [Bak, 1997], позволившая понять генезис самоподобия основных черт эволюции открытых диссипативных систем разной сущности. Этот принципиальный результат был получен при компьютерном моделировании динамики лавин в статистически стационарном состоянии кучи песка при наличии внешних источника и стока песка, когда с кучи "сходят" песчаные лавины разных масштабов. Были выявлены особенности эволюции открытой диссипативной системы, проявляющиеся в наличии динамических всплесков разного масштаба для анализируемых величин (например, числа песчинок в лавине) при их кажущемся хаотическом распределении во времени; степенной характер совокупности формирующихся разнообразных интегральных распределений исследуемых динамических величин (законы Гутенберга-Рихтера, Ципфа-Парето, "фликкер-шум"), что характеризует масштабную инвариантность (скейлинг) на некотором интервале изменения аргументов; установлена определяющая роль эффектов инерции и диссипации в формировании указанных степенных распределений. Очевидно, что такое понимание физической сущности особенностей динамики модельных сложных систем, выявляемое при компьютерных расчетах, делает более осмысленным любой анализ состояния природных систем.

Однако расчеты на основе концепции "самоорганизованной критичности" не позволили продвинуться в решении практических проблем параметризации реальных процессов и структур, прогнозирования их динамики на основе анализа хаотических (временных, пространственных) серий измеряемых динамических переменных. Эта цель практически не была достигнута и при использовании численных методов анализа, разработанных на основе теории детерминированного хаоса [Шустер, 1988; Hegger, Kantz, Schreiber, 1999]. В этих подходах предполагается, что даже одна измеряемая переменная может достаточно хорошо отражать общую динамику сложной системы, а топология общего аттрактора может быть восстановлена только из наблюдений динамики этой одной переменной, измеряемой в ходе экспериментального исследования на некотором временном интервале. При этом вводится многомерное фазовое пространство, в котором "размещается" траектория изучаемого динамического процесса. В качестве динамических параметров, совокупность которых может однозначно характеризовать происходящую в этих условиях эволюцию, вводятся корреляционная размерность аттрактора, характеристики сечения Пуанкаре, коэффициенты Ляпунова, энтропия Колмогорова.

Однако заметных достижений в приложении данной методологии к анализу экспериментально измеряемых временных рядов, характеризующих динамику реальных природных процессов, пока нет» (конец цитаты).

Гидростатическое равновесие на примере гравитационного поля планет
[Кузнецов, 2000, с. 329-330; 2008]

«Приведем, для сравнения, особенности гравитационных полей планет и Луны. Возможно, это поможет нам разобраться в том, действует ли принцип минимизации энергии при самогравитации других планет и спутников. Рассмотрим подробнее гравитационные поля Луны, Венеры, Марса и Меркурия. Эти объекты Солнечной системы, по нашей модели, находятся на различных этапах эволюции. Луна и Марс “выработали” доставшееся при образовании вещество внутреннего ядра. В пользу этого говорит то, что магнитное поле на них было, но генерация его уже прекратилась. Это означает, что на этих объектах закончился этап тектонической активности, связанной с функционированием фазового перехода “испарение-конденсация”. Несмотря на то, что Меркурий меньше Марса, на нем продолжается генерация дипольного магнитного поля и, как следует из нашей модели, фазовый переход еще продолжает “работать”. Это означает, что на Меркурии могут происходить процессы релаксации вещества внутреннего ядра и, как их следствие, циклы сжатия и расширения. (По видимому, именно наличие сравнительно большого внутреннего ядра Меркурий “обязан” столь большой величиной средней плотности). Естественно, что и на Луне, и на Марсе внутреннего ядра уже нет, не могут происходить и эволюционные циклы. На Венере, несмотря на то, что там магнитное поле не обнаружено, внутреннее ядро должно было бы ещё сохраниться. (Хотя это вопрос дискуссионный). Если это так, то там, возможно, должны происходить циклы, аналогичные земным. Таким образом, на Луне и Марсе могут наблюдаться эффекты некомпенсации гравитационных аномалий и большие ундуляции высот геоида. На Меркурии и Венере, как и на Земле, должен работать механизм гидростатического выравнивания.

Поверхности, аналогичные геоиду, определены для Луны, Марса и Венеры [Хаббард, 1987]:

Луна. Эквипотенциальная поверхность Луны выглядит сигарообразной с большой осью, направленной к Земле. На карте селеноида (лунного геоида) видны “возвышения” гравитационного потенциала, соответствующие двум возвышениям - Морю Дождей и Морю Ясности, круговым бассейнам, базальтовым “морям”. Менее отчетливая структура соответствует Морю Кризисов. Гравитационные поднятия, коррелирующие с круговыми морями, называют масконами. Масконы, в основном, - положительные, но известны и отрицательные, например, Море Восточное.

По сравнению с геоидом, форма гравитационного поля Луны является очень неровной. Высоты селеноида достигают 500 м, что в 10 раз больше, чем на Земле. Однако если учесть, что сила тяжести на Луне примерно 1/6 земной, а средняя плотность составляет 0.6 от земной, то высота лунного геоида $h \sim 1/\rho g$ и должна быть больше примерно в 10 раз.

Меркурий. Карта высот геоида Меркурия ещё не построена. Наблюдения за поверхностью Меркурия говорят о том, что “он подвергся значительному изменению радиуса после образования литосферы” [Хаббард, 1987]. Оценки, сделанные по данным фотогоеологических измерений, показывают, что Меркурий подвергся уменьшению радиуса на величину примерно 1-2 км. С другой стороны, рассуждения на тему о внутреннем устройстве Меркурия и дифференциации его недр, приводят исследователей к выводу относительно возможного увеличения радиуса Меркурия примерно на 10 км (там же). (По всей видимости, можно считать, что на Меркурии происходят пульсации его размера).

Венера. Карта высот внешней уровенной поверхности Венеры известна [Хаббард, 1987]. Основные высокие области Венеры, это земля Иштар, где расположены высочайшие вершины - горы Максвелла; область Бета и “суперконтинент” - земля Афродиты. Наибольшие отклонения высот «геоида» Венеры близки к земным и составляют 60 - 80 м. Более точная информация о гравитационном поле Венеры представлена на карте вертикальной компоненты ускорения силы тяжести на высоте 200 км, полученная по измерениям орбитальной станции “Пионер-Венера” (там же). Максимальные отклонения Δg не превышают 100 мГал, что примерно соответствует гравитационному полю Земли.

Марс. Как известно, марсианские вулканы в области Фарсида достигают высоты 20 км. Характерные диаметры этих вулканов так же весьма значительны: 500 - 600 км, что намного превышает размеры земных вулканов. На Марсе нет следов плитовой тектоники, зато явно наблюдаются разрывы и растяжения. Карта высот ареоида (марсианского геоида) показывает очень большие величины, достигающие километра и более. Эта негидростатическая вариация ареоида соизмерима с разницей между полярным и экваториальным радиусами (18 км).

Юпитер и другие “гиганты”. Неизвестно, есть ли карта высот геоида Юпитера и других планет “гигантов”, по всей видимости, она ещё не построена. Известно, что гравитационное поле Юпитера обладает “удивительной” симметрией. Это может говорить о том, что Юпитер хорошо гидростатичен.

Выводы. Приведенные данные по гравитационному полю планет и Луны подтверждают наши представления о том, что планета, которая находится в состоянии тектонической активности, за счет следующих один за другим циклов расширения и сжатия способна поддерживать гидростатическое равновесие. И наоборот, если на ней тектоническая активность прекратилась, то гравитационное поле такой планеты (спутника) очень несимметричное, а ундуляции геоида очень велики. Вполне возможно, что и на этих планетах происходит гидростатическое выравнивание, аналогичное тому, что имеет место на Земле в настоящее время, т.е. растекание литосферы и связанные с ней сейсмичность и вулканизм.

Анализируя приведенные данные, можно сделать еще один вывод, который касается влияния вращения на процесс гидростатического выравнивания, иначе, минимизации гравитационной энергии. Оказывается, вращение (планеты, как целой – А.В.) здесь не играет заметной роли, хотя, казалось бы, соблюдение принципа равенства угловых моментов и их перераспределение между различными частями гравитирующего шара, давало бы преимущество Земле по сравнению с Венерой. Однако, т.к. величины высот геоида на этих планетах практически равны, этот фактор, по-видимому, не играет заметной роли.

Распределение плотности [Кузнецов, 2000, с. 330-332; 2008]

Определим распределение плотности гравитирующего шара, исходя из принципа минимизации гравитационной энергии [Шен, 1984]. Запишем требование минимума функционала, определяющего гравитационную энергию шара, в математической форме [Магницкий, 1965]:

$$\Omega = - 2\pi \int_0^R \varphi \rho r^2 dr \quad (12.22)$$

где φ – гравитационный потенциал, $\rho = \rho(r)$ - плотность, R - радиус шара (планеты). Минимизировать функционал (12.22) можно лишь одним способом, посредством преобразования функции $\rho = \rho(r)$. Эта функция должна удовлетворять заданным

значениям массы планеты M и момента инерции I (второму и третьему соотношению в (5.1) – А.В.):

$$\left. \begin{aligned} M &= 4\pi \int_0^R \rho r^2 dr \\ I &= 8/3 \pi \int_0^R \rho r^4 dr \end{aligned} \right\} \quad (12.23)$$

Определим распределение плотности по радиусу гравитирующего шара:

$$\rho_{\max}(r) \geq \rho(r) \geq \rho_{\min}(r), \quad 0 \leq r \leq R \quad (12.24)$$

Условия (12.22), (12.23) и (12.24) необходимы и достаточны для того, чтобы поставить вариационную задачу с целью определения закона распределения плотности, удовлетворяющего принципу минимизации гравитационной энергии шара. Решение имеет вид [Шен, 1984]:

$$\rho(r) = \rho_{\max}(r), \quad 0 \leq r \leq R \quad (12.25)$$

Этот результат соответствует однородности планеты в начальном состоянии равновесия. Решение включает и тот случай, когда планета неоднородна, но компоненты ее вещества равномерно перемешаны. При этом возможно протекание процессов гравитационной дифференциации. (Заметим, что возникающий при этом вопрос о неизменности радиуса планеты принято считать очевидным и даже не обсуждать).

Ситуация с возможным переносом (перераспределением) масс в процессе эволюции планеты вполне обоснована. Формулируем постановку задачи, следуя [Шен, 1991]: каким должно быть перемещение масс внутри планеты (какой должна быть структура вариации плотности), чтобы оно привело к наименьшему значению гравитационной энергии при неизменных массе и моменте инерции? Отличием этой задачи от предыдущей является то, что нуль становится внутренней точкой области допустимых значений вариации $\delta\rho(r)$ для каждой точки $r_o \leq r \leq R$. Решение задачи оказывается разрывным:

$$\left. \begin{aligned} \delta\rho(r) &= \delta\rho_{\max}(r), & 0 \leq r \leq r_G, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho(r), & r_G \leq r \leq r_o, \\ \delta\rho(r) &= \delta\rho_{\min}(r), & r_o \leq r \leq R. \end{aligned} \right\} \quad (12.26)$$

Здесь $\delta\rho_{\max}$, $\delta\rho$ и $\delta\rho_{\min}$ – границы области допустимых значений $\delta\rho(r)$, а r_o и r_G – первая и вторая точки разрыва непрерывности вариации.

Полученная вариация должна превращать однородную модель в многослойную. Причем, отметим, что этот переход может происходить только при увеличении объема модели. (Заметим, что применение принципа наименьшего действия [Клушин, 1963] приводит к несколько другому условию – вертикальному перераспределению плотности, см. выше – А.В.)

Таким образом, принятые нами очевидные предположения о минимуме гравитационной энергии, постоянстве массы и момента инерции планеты приводят к выводу об её расширении (? – в свете нашего предыдущего замечания – А.В.) в процессе эволюции. Использование принципа минимизации гравитационной энергии

естественным образом приводит к минимизации времени образования планеты, во-первых. Во-вторых, перемещение масс (по [Клушин, 1963] – перемещение плотности – А.В.) вдоль по радиусу, происходящее при превращении однородной модели в многослойную, должно сопровождаться ответным перемещением масс в обратную сторону, таким образом, чтобы соблюдалось постоянство момента импульса (рис. 12.5). И, наконец, гравитирующий шар (звезда, планета, большой спутник) рассматривается как саморегулирующаяся, самоорганизующаяся система в терминах теории самоорганизации и оптимальных процессов» (конец цитирования).

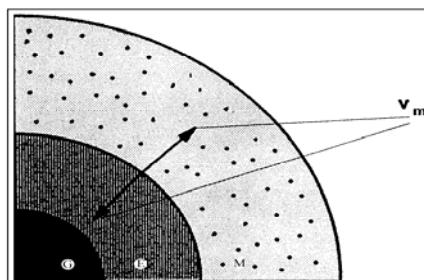


Рис. 12.5. Перенос массы: положительной (наружу, в направлении увеличения радиуса Земли) при формировании мантии и “отрицательной” (внутри), - при формировании внешнего ядра, при выполнении условия соблюдения постоянства момента импульса.

Вихревые структуры

Развитие механических представлений о вихревых движениях подробно рассмотрено выше в предыдущей 10 главе этой части. Ниже кратко остановимся на развитии представлений о вихревых движениях в геологии и геофизике.

Проблема вихревых структур в геологических процессах была впервые обозначена китайским ученым Ли Сы-гуаном в 20-х гг. прошлого века [Lee, 1928] и через 30 лет сформулирована им в качестве научной гипотезы в книге [Ли Сы-гуан, 1958], в которой на большом фактическом материале обосновывается существование структур, являющихся, по мнению автора, результатом сдвигов, возникающих при вращении отдельных масс земной коры, и, видимо, по этой причине названных вихревыми. В последние годы появилось большое количество данных о существовании структур поворотного, крутильного, вихревого типов в геологической среде как Земли [Ван Бемеллен, 1991; Вихри..., 2004; Мелекесцев, 1979, 2004а, б; Мясников, 1999; Ротационные, 2007; Система..., 2003; Слензак, 1972; Тектоника, 2002; Mandeville, 2000], так и других планет и их спутников [Мелекесцев, 2004б; Maps, 1989; Whitney, 1979].

Примеры вихревых структур в районах островов Пасха и Хуан-Фернандос, проявляющиеся в разных геофизических полях, приведены на рис. 12.6 и 12.7.

Вихревая Соловьевская морфоструктура центрального типа (район Приамурья), выраженная на поверхности фрагментами разрывных нарушений, приведена на рис. 10.4 из [Мясников, 1999]. Вихревая структура северной полярной ледяной «шапки» Марса приведена на рис. 10.7. Вихревые структуры Японии, выявленные на основании долговременных геодезических измерений, представлены на рис. 11.1.

Проблема выделения и анализа вихревых структур на границе Тихоокеанского и Индо-Азиатского блоков литосферы или внутри этих блоков неоднократно обсуждалась в геологической литературе [Викулин, Тверитинова, 2007; Вихри, 2004; Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Ли Сы-гуан, 1958; Мелекесцев, 1979, 2004а, б; Ротационные, 2007; Слензак, 1972]. На рис. 12.8 из [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993] показана возможная картина проявления глубинных вихревых движений, получившая свое

отражение в особенностях морфологии рассматриваемой переходной зоны. С использованием литературных материалов была составлена схема распространения ксенолитосодержащих объектов (рис. 12.9), которая позволяет конкретизировать каждый конкретный вихрь в общей вихревой картине рассматриваемой окраины [Колосков, Аносов, 2006].

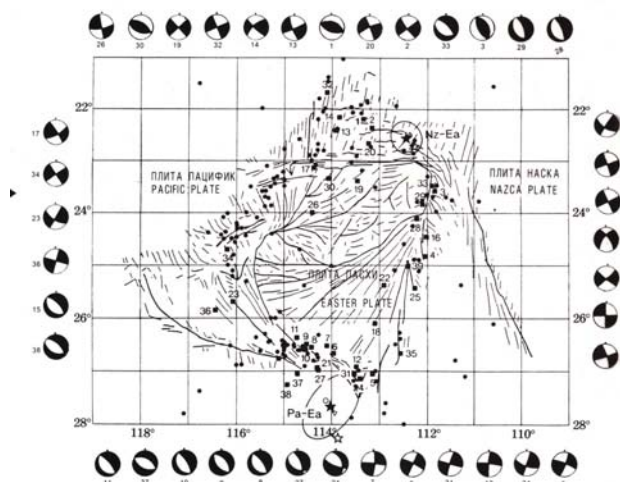


Рис. 12.6. Упрощенная тектоническая интерпретация микроплиты Пасхи. Показаны положения эпицентров землетрясений по данным Международного сейсмологического центра за период 1971-1991 гг. (черные кружки) и опубликованные данные о механизме движений в очагах 39 землетрясений (пронумерованные квадратики). Звездочками, полными кружками и треугольниками обозначено положение полюсов вращения плит Наска (на севере) и микроплиты Пасифик (на юге) [Международный..., 2003, с. 56].

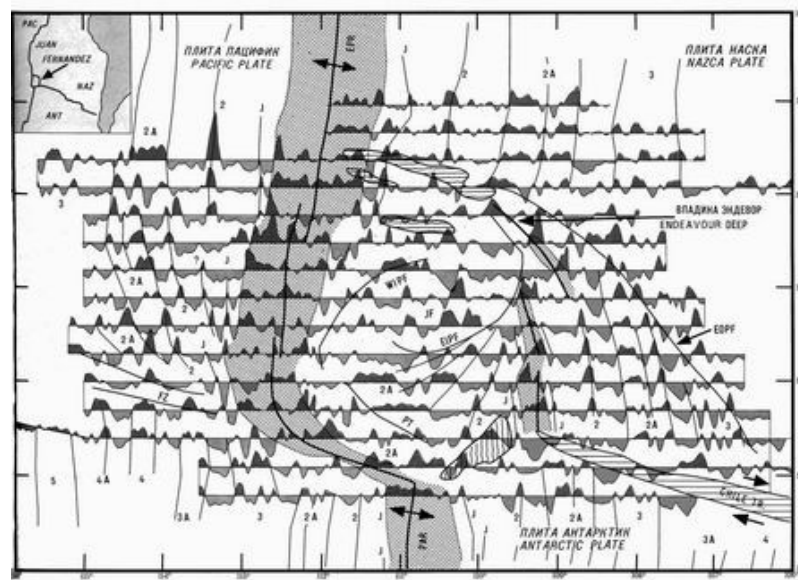


Рис. 12.7. Тектонические границы (жирные линии) и магнитные изохронны – корреляция магнитных аномалий (тонкие линии) по данным [Международный..., 2003, с.с. 57].

В соответствии с данными работ [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Колосков, Аносов, 2006; Мелекесцев, 1979, 2004а, б; Слензак, 1972], вихревые структуры и геолого-геофизические процессы их объясняющие, должны, по сути, являться краеугольными камнями современной геодинамики.

Проблема происхождения вихревых систем литосферы подробно освещается в [Слензак, 1972]. В этой же работе, в частности, отмечается, что «сходство вихревых

образований атмосферы, гидросферы и литосферы не случайно и в факте вращения Земли проблема генезиса вихревых образований имеет прочную основу для своего решения» [Слензак, 1972, с. 76]. Из последних следует отметить работы [Викулин, Тверитинова, 2007; Полетаев, 2006; Ротационные, 2007], в которых приводится обзор современного состояния проблемы с описанием большого количества геологических структур вихревого типа.

Анализ полей деформаций на геологических и тектонических картах показывает, что образование таких вихревых структур в земной коре и их генезис являются прямым следствием геодинамических процессов. Совокупность данных о расположении планетарных структур сжатия и растяжения [Роль, 1997], о поле напряжений, по механизмам очагов землетрясений Евразии определенное как мегарегиональное [Гущенко, 1979]; о геодезических [Рикитаке, 1979; Сато, 1984; Hashimoto, Tada, 1988] и светодальномерных [Давыдов, Долгих, Запольский и др., 1988] инструментальных измерениях, проведенных на больших базах; о движениях блоков Тихоокеанской сейсмофокальной зоны [Геологическая, 1989; Daly, 1989; Geist, Childs, Scholl, 1988; Nur, Ron, Scotti, 1986], тектонических плит [Викулин, 1994; Жарков, 1983; Мелекесцев, 1979; Forsyth, Uyeda, 1975; Takeuchi, 1985], платформ [Полетаев, 2006] и других более «мелких» геологических образований [Ван Беммелен, 1991; Полетаев, 2006], которые, в свою очередь, «пронизаны» перекрывающимися вихревыми планетарными структурами литосферы [Слензак, 1972] - прямо указывают на вращательный, крутильный и вихревой характер движения геологических структур планеты [Викулин, 2003; Вихри, 2004; Маслов, 1996; Слензак, 1972].

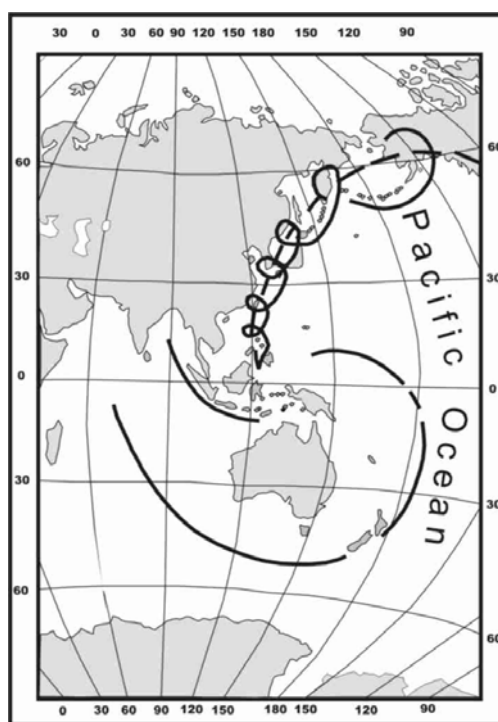


Рис. 12.8. Глобальная вихревая система Индо - Тихоокеанского региона Земли [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993]: «Геометрия рукавов данной тектонической структуры установлена нами по морфоструктурным признакам: спиральная форма северного рукава вихря выражена в конфигурации островной дуги континентальной окраины, а спираль южного рукава определяется геометрией срединно-океанического хребта и линией о-вов Новой Зеландии – Тонга. Данная вихревая система удовлетворительно выражена в глобальной структуре гравитационного поля Земли (модель GEM-9) и в рисунке горизонтальных течений в верхней мантии по данным сейсмической томографии. Интересно, что в центре вихревой системы расположено крупнейшее вздутие геоида, согласно годдаровской (НАСА) модели Земли GEM-9, построенной по спутниковым данным».

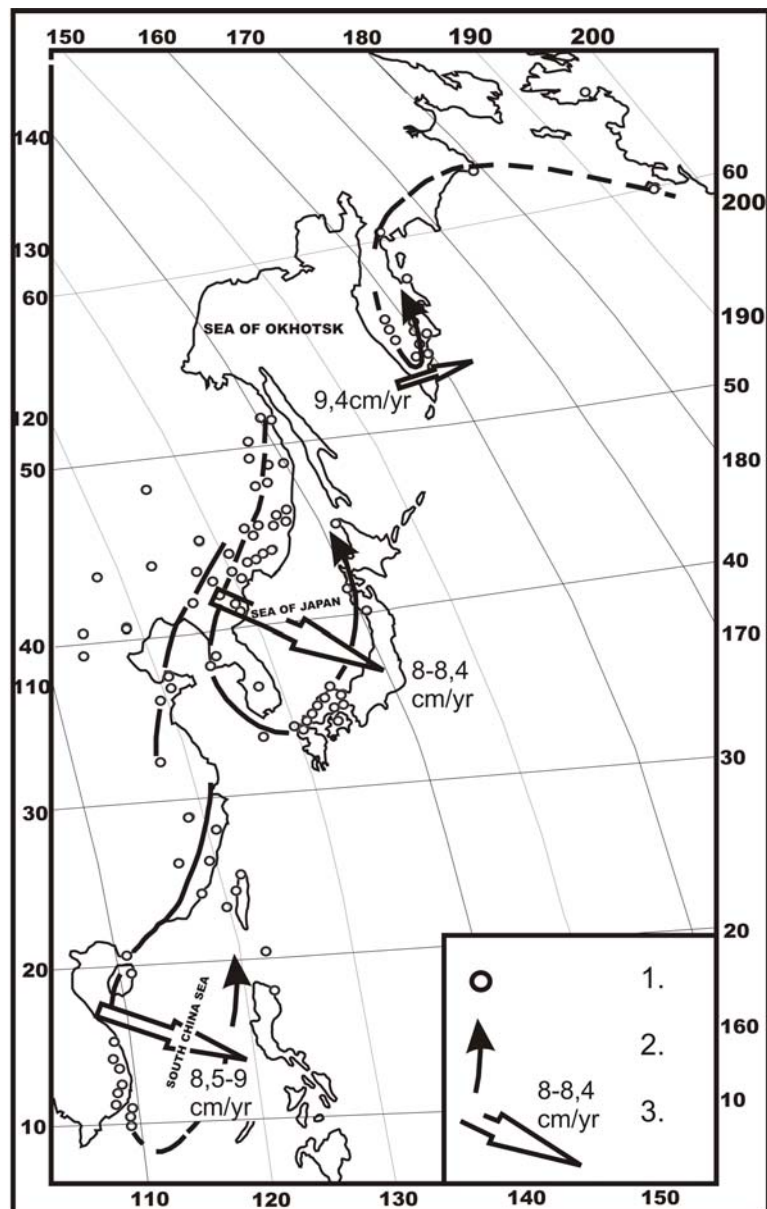


Рис. 12.9. Вулканические объекты позднекайнозойского возраста с включениями ультраосновного состава в пределах Восточно-Азиатской окраины и контуры вихревых тектоно-магматических структур. 1- объекты, несущие ультраосновные включения (вулканические постройки, лавовые поля); 2 – условные контуры вихревых структур; 3 – направления и скорости перемещения вулканического фронта в ходе развития вихревой структуры [Колосков, Аносов, 2006].

Анализ большого количества тектонических данных показывает следующее. Согласно А.В. Лукьянову [1999] «если представить себе тектоническое течение в виде векторного поля скоростей (или перемещений) частиц тектоносферы, то самоорганизация приводит это поле к единому, сплошному, непротиворечивому структурному рисунку», в котором «находят свое место не только неоднородные деформации, но и *зоны с ненулевыми дивергенциями и вихрями*». При этом, уже почти полвека, как А.В. Пейве отметил [Лукьянов, 1999], что «каждый блок земной коры обладает как бы *самостоятельной «движущей силой», заключенной в нем самом*» (в обеих цитатах курсив наш). В работе [Слензак, 1972, с. 37-38] делается «важный вывод о *самостоятельности крупной вихревой системы*, как типа тектонической структуры литосферы, который не может быть создан внешними источниками движения в виде дрейфующих материков или

смещений по планетарным разломам». Далее «перекрытие вихревых систем способствует образованию систем меньшего размера, соединяя в новые вихри отрезки больших дуг крупных систем» [Слензак, 1972, с. 43]. При этом «непосредственное изучение пород свидетельствует о формировании вещества», слагающего вихревые системы, «в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии» [Слензак, 1972, с. 98].

Проведенный в [Вихри, 2004] анализ движений, наблюдаемых в Природе во всем пространственно-временном масштабе от элементарных частиц (имеющих спин) до галактик и их скоплений, подтверждает саму суть «геотектонических» наблюдений и обобщений А.В. Пейве и А.В. Лукьянова [Лукьянов, 1999] и О.И. Слензака [1972]. Такие наблюдения и обобщения в свете анализа [Вихри, 2004] и представлений Декарта, Канта-Лапласа, Кельвина и Гамова, фактически, предписывают структурным элементам геологической среды, как части Материи, на разных пространственно-временных масштабах, вращающейся независимо от физического состояния слагающего ее вещества, иметь собственный момент количества движения. На основании этих данных поворотные, закрученные спиралеобразные (по [Ли Сы-гуан, 1958] - вихревые) структуры, их формирование и развитие в пространстве и во времени, взаимосвязь друг с другом («самоорганизация»), по мнению авторов, основанному на данных: Ли Сы-гуана [Ли Сы-гуан, 1952, 1958; Lee, 1928], А.В. Пейве [1961] и А.В. Лукьянова [1999], О.И. Слензака [1972], А.Н. Дмитриевского с соавторами [1993], А.И. Полетаева [2006], сборников [Вихри, 2004; Ротационные, 2007; Система, 2003; Тектоника, 2002] и других, являются следствием «собственных» вращательных движений, слагающих геологическую среду блоков, плит и их образований.

Наличие вихревых структур в литосферах Земли, других планет и их спутников естественным образом продолжает и «замыкает» цепочку такого рода движений вещества при разных физических состояниях.

Следует отметить следующее. Согласно данным работы [Викулин, 2003], в понятие «собственное вращательное движение» мы вкладываем смысл, по сути, близкий спину, который имеет любая достаточно малая частица вещества (элементарная частица, атом, молекула) в течение всей своей «жизни». Данные физического плана, подтверждающие такую гипотезу, содержатся в работах [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Потапов, Фоминский, Потапов, 2000; Шипов, 2002]. Поэтому «самостоятельную движущую силу, заключенную в самом» блоке [Лукьянов, 1999] и «самостоятельность вихревой системы» [Слензак, 1972] мы также связываем с «собственным вращательным моментом». Очевидно, что используемое нами понятие «собственного вращательного движения», в принципе, отличается от Эйлерового вращения, соответствующего поступательному перемещению вдоль сферической поверхности.

Новые данные и нестыковки

1. Накопленные геологические данные о кольцевых, вихревых и т. п. «непрямолинейных» структурах указывают на ротационную природу тектонического процесса [Викулин, Мелекесцев, 2007; Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Иванчин, 2007; Шипов, 2002], и, как следствие, эти данные должны быть использованы физиками при разработке новой ротационной, вихревой концепции пространства-времени.

2. Первые вихревые структуры на примере Китая были описаны уже почти 80 лет тому назад [Lee, 1928]. С тех пор накопилось большое количество данных по таким структурам [Вихри, 2004; Teisseyre, Takeo, Majewsky, 2006], и их число постоянно увеличивается [Полетаев, 2005, 2006; Thomson, 1890]. Размеры вращающихся (в соответствии с классификацией, предложенной в [Полетаев, 2006]) структур изменяются в больших пределах: от метров и десятков метров [Lee, 1928; Thomson, 1890] до сотен (альпийские складки Генуя и Дунай, Исландия), тысяч (Восточно-Европейская и Сибирская платформы [Полетаев, 2005]) и многих тысяч (например, вся Тихоокеанская

плита [Маслов, 1996]) километров. Примечательно, что в науках о Земле стремительное за последние 10 лет увеличение интереса к проблеме вращательных структур [Полетаев, 2005, 2006] (т.е. переход от «линейки» к «циркулю») происходит на фоне «неуспехов» Новой глобальной тектоники [Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005; Пущаровский, 2005; Спорные, 2002]. Как видим, имеет место очевидный процесс поиска новой тектонической парадигмы. И в то же время, механизм вращательных движений, «генерирующий» геологические структуры, остается пока не до конца и понятным, и разработанным.

3. Накопленные данные указывают на наличие следующих наблюдаемых на поверхности Земли особенностей вращательных движений земной коры [Вихри, 2004].

3. 1. А.В. Пейве [1961] уже почти полвека назад отметил, что «каждый блок земной коры обладает как бы *самостоятельной «движущей силой», заключенной в нем самом*».

3. 2. О.И. Слензак [1972] сделал «важный вывод о *самостоятельности крупной вихревой системы* как типа тектонической структуры литосферы, который не может быть создан внешними источниками движения в виде дрейфующих материков или смещений по планетарным разломам», а также о том, что «перекрывание вихревых систем способствует образованию систем меньшего размера, соединяя в новые вихри отрезки больших дуг крупных систем». При этом «непосредственное изучение свидетельствует о формировании вещества», слагающего вихревые системы, «в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии». По-видимому, именно этот процесс мы наблюдаем на примере «молодых» растущих микроплит Пасха и Хуан-Фернандес, вихревые структуры которых отчетливо проявляются в различных геофизических полях [Международный..., 2003].

3. 3. А.В. Лукьянов [1999] отметил, что «если представить себе тектоническое течение в виде векторного поля скоростей (или перемещений) частиц тектоносферы, то самоорганизация приводит это поле к единому, сплошному, непротиворечивому рисунку», в котором «находят свое место не только неоднородные деформации, но и *зоны с ненулевыми дивергенциями и вихрями*».

3. 4. В.Н. Жарков [1983], на основании полученных в рамках концепции Новой глобальной тектоники данных о движении плит, формулирует вывод о том, что «скорости плит коррелируются с величиной среднего полярного расстояния плиты». При этом делается вывод, «что движение литосферы...*увлекает* за счет сил вязкого трения подстилающую ее астеносферу». По сути, к аналогичному выводу приходят авторы работы [Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005], убедительно показывая, что «осесимметричная *одноячейковая* конвекция...*является вынужденной*». Другими словами, движение литосферы, в соответствии с этими данными, по сути, не зависит от движений в нижележащей астеносфере. Курсив во всех вышеприведенных цитатах, кроме работы [Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005] – автора.

Рассмотрение строения границ литосферных плит как зон сдвиговых деформаций в свете волновой тектонической концепции привело к формулировке гипотезы о правозакрученном планетарном вихре. В рамках гипотезы именно такой полярный вихрь планетарного масштаба и должен вызывать наблюдаемое левостороннее кручение ансамбля всех литосферных плит [Вихри, 2004; Тверитинова, Викулин, 2005].

Фигура равновесия вращающихся тел. Задача Дирихле

Обстоятельные обзоры проблемы содержатся в классических работах [Буллен, 1978; Ламб, 2003]. Согласно [Кондратьев, 2003] условно можно выделить следующие этапы, характеризующие состояние теории фигур равновесия вращающейся гравитирующей жидкости.

Начальный ньютоновский этап можно связать с появлением первых фактов. В 1672 г. Рише обнаружил, что часы, верно отсчитывающие секунды в Париже (49^0 с.ш.), отстают приблизительно на 2,5 мин в сутки в Кайенне (5^0 с.ш.), где он вынужден был укоротить маятник более чем на линию ($1/12$ французского дюйма). Аналогичное отставание часов позднее было замечено Вареном и Де Хэем в Горэ (15^0 с.ш.) и в других местах. Один из членов Парижской академии предположил, что на экваторе тело весит меньше, чем на полюсах. В 1690 г. Гюйгенс заметил, что линия отвеса направлена нормально к поверхности вращающейся самогравитирующей жидкости. Кроме того, он оценил эллиптичность ε Земли [Буллен, 1978, с. 18].

Все это стимулировало деятельность Ньютона, который, как сообщают, случайно слышал об открытии Рише на заседании Королевского общества в 1682 г. Ньютон понял, что с помощью закона всемирного тяготения можно исследовать не только движение небесных тел, но и саму их форму. Он поставил знаменитую задачу *о равновесной форме гравитирующей жидкой массы, имеющей вращение вокруг оси. Эта задача и положила начало теории фигур равновесия*. Ньютон первый и определил сжатие однородной Земли:

$\varepsilon = \frac{5}{4}m = 229^{-1}$, где m – отношение центробежной силы к притяжению на экваторе. Это

был несомненный успех в познании Земли и других планет.

Ученые думали и о фигуре равновесия неоднородной Земли. Не все моменты этой проблемы во времена Ньютона были ясными и понятными. Например, из популярной в то время вихревой теории Декарта (вспомним великое (!) противостояние ньютонианцев и картезианцев [Вихри, 2004; Тверитинова, Викулин, 2005]) вытекало, что Земля, в противоположность полученному Ньютоном результату, должна напоминать огурец, стоящий на остром конце.

И только Клеро (1743) верно понял, что все дело в существовании тесной взаимосвязи между сжатием планеты и распределением вещества внутри нее. Ему первому стало ясно, что в рамках альтернативы «сплюснутость однородной фигуры (Ньютон) – сплюснутость полностью переконденсированной фигуры (Гюйгенс)» имеет

место неравенство: $\frac{5}{4}m \geq \varepsilon \geq \frac{1}{2}m$.

Ньютоновские «Начала» побудили многих математиков к занятию задачами по фигурам равновесия. Маклорен (1742), последователь Ньютона, решил трудную задачу о притяжении внутри однородного сфероида. Компоненты силы притяжения оказались линейными функциями координат. Это позволило Маклорену красиво обобщить результат Ньютона доказательством, что однородно сжатый сфероид при любой сплюснутости может быть фигурой относительного равновесия вращающейся жидкой гравитирующей массы. В итоге Маклорен не только открывает равновесные жидкие сфероиды, носящие теперь его имя, но и доказывает, что внутри них полная сила тяжести всегда направлена по нормали к поверхности, проходящей через испытываемую точку и подобной границе данной фигуры. Это и есть уровенные поверхности, которые после вышедших в 1743 г. работ Симпсона и Клеро, выражаясь современным языком, являются поверхностями постоянного значения давления и полного потенциала.

Этап Якоби

Период становления теории фигур равновесия был наполнен решением важных математических задач. Лежандр ввел понятие гравитационного потенциала и разработал общую теорию притяжения однородного трехосного эллипсоида, содержащую как частный случай и результаты Маклорена. Лаплас получил знаменитое дифференциальное уравнение второго порядка для потенциала вне гравитирующей массы, а Пуассон – внутри

нее. Эйлер сформулировал принципы гидродинамики невязкой жидкости. Лагранж преобразовал всю механику. В результате этого подход к проблеме фигур равновесия, сформулированной Ньютоном, стал более абстрактным, что давало какой-то выигрыш в общности.

Дело касалось самого принципиального момента теории: *обязаны ли фигуры равновесия иметь осевую симметрию? Или могут существовать и фигуры с нарушением ее?* У самого Ньютона предположение об осевой симметрии было только априорным, однако почти все его последователи считали, что гипотезе об осесимметричности нет альтернативы. Все рассуждали здраво, но, увы, стандартно: раз поле центробежных сил, ответственных за появление сплюснутости вращающейся конфигурации, имеет осевую симметрию, то неизбежно такую же симметрию должна иметь и сама фигура.

Новый толчок к развитию теории дал математик Якоби (1834), указавший на возможность существования однородной фигуры равновесия в форме трехосного эллипсоида – эллипсоиды Якоби. В 1884 г. Ляпунов и годом позднее Пуанкаре совершенно независимо друг от друга открывают целый класс новых фигур равновесия, отдаленно напоминающие по форме то груши, то рубчатые дыни, волнистые патиссоны и другие фрукты и овощи. Оказалось, что в окрестности определенных сфероидов Маклорена и эллипсоидов Якоби (их множество бесконечно, хотя и счетное) существуют неэллипсоидальные фигуры относительного равновесия. Строгое доказательство существования неэллипсоидальных форм дано в начале XX века [Ляпунов, 2000].

Это блестящее достижение Ляпунова-Пуанкаре открыло новую страницу в математической физике и геофизике, сформулировало круг любопытных идей и дало толчок к развитию новых аналитических методов. Отсюда берут начало понятия о линейных сериях фигур равновесия, бифуркациях, нелинейных интегральных уравнениях. Был сделан важный шаг от идеальных поверхностей второго порядка к сложной реальности: действительно, у многих галактик, звезд и планет в их форме замечено присутствие третьих и более высоких гармоник [Пуанкаре, 2000].

Этап Дирихле

Математик Дирихле внес настолько революционный вклад в основы теории фигур равновесия, что раздвинул сами границы этой дисциплины. Поставленная Дирихле [Dirichlet, 1860] проблема такова. *Дана однородная несжимаемая масса гравитирующей жидкости. Допускают ли законы гидродинамики такое движение этой массы, чтобы ее форма в любой момент оставалась эллипсоидальной, а поле скоростей жидкости – линейным по координатам?* Дирихле поставил задачу и получил уравнения движения такого эллипсоида.

Если до Дирихле говорили исключительно о фигурах относительного равновесия, то теперь вопрос поставлен значительно шире: существуют ли однородные эллипсоиды с внутренними течениями? Фигуры же относительного равновесия – всего лишь частный случай стационарных фигур в проблеме Дирихле. Ключевым в этой проблеме является *условие линейности внутреннего поля скоростей в эллипсоидах*; только оно делает решаемой трудную динамическую задачу учета сил Кориолиса. В итоге поля сил гравитации и Кориолиса и центробежной силы в эллипсоиде оказываются линейными. Суперпозиция этих силовых полей, без которой проблема Дирихле вообще не имела бы смысла, и порождает обширное семейство возможных конфигураций, в том числе, и вихревые течения.

Дедекинд отметил *особую симметрию, присущую уравнениям движения эллипсоида Дирихле*. Такое свойство уравнений говорило о том, что возможно и такое движение эллипсоида, конгруэнтного исходному, которое имеет и другое поле скоростей и вращается уже с другой угловой скоростью. Другими словами, такое свойство

симметрии уравнений движения указывает на возможность существования во вращающихся средах вихревых течений.

Самый значительный вклад в разработку идеи Дирихле внес великий математик Риман. Он впервые рассмотрел стационарные фигуры равновесия и открыл класс двухпараметрических равновесных эллипсоидов, у которых вектор угловой скорости Ω и вектор вихря внутренних течений ζ совпадают с одной из главных осей симметрии фигуры (S-эллипсоиды Римана). Класс S-эллипсоидов состоит из однопараметрических последовательностей фигур с определенным отношением $f = \zeta/\Omega$ (являющимся, как впоследствии будет показано Чандрасекхаром, своеобразным условием «квантования» получаемых решений).

Еще более удивительными являются эллипсоиды Римана [Риман, 1948] с наклонным вращением (например, Земля); у таких фигур ось вращения и вектор вихря в общем случае не совпадают с главными осями эллипсоида, что значительно расширяет спектр возможных решений.

По сути, задача Дирихле явилась дальнейшим на более высоком уровне развитием идеи Декарта (1644) «о вихревых движениях, как основных движениях Материи, как системы Мира» [Тверитинова, Викулин, 2005].

Первый этап развития проблемы Дирихле прошел под знаком «бури и натиска»: ни Дедекин, ни Риман, так много сделавший в различных областях математики и механики, к этой теме после получения ими первых результатов так и не возвращались, и наступило долгое затишье.

Современный этап

Интерес к проблеме Дирихле был возрожден через сто лет работами по динамике звезд, выполненными С. Чандрасекхаром с сотрудниками в 60-х гг. прошлого века. За эти работы С. Чандрасекхар (совместно с У.А. Фаулером) в 1983 г. был удостоен Нобелевской премии. Важные результаты в областях астрономии, космогонии и геофизики, связанные с изучением строения и свойств звезд, звездных систем, галактик, газопылевых облаков и твердого внутреннего ядра Земли, движущегося в вязкой мантийной оболочке, в рамках проблемы Дирихле, были также получены Б.П. Кондратьевым с сотрудниками и другими коллективами исследователей. Эти работы убедительно доказывают существование во вращающихся *реальных* (не идеальных!) системах внутренних движений, имеющих *вихревую* природу. И важным результатом такого рассмотрения, имеющим принципиальное значение, является возможность получения новых данных о физических свойствах сред, таких как вязкость, сжимаемость, напряженность магнитного поля и др.

Полученные данные позволили модифицировать *классическую* задачу Дирихле идеальной жидкости и, тем самым, применить ее к движению *реальных* сред [Кондратьев, 2003]. Представляется, что вихревые решения модифицированной проблемы Дирихле будут в большей степени соответствовать движениям, наблюдаемым в реальных средах, включая и геофизическую среду, которая, как известно [Вихри, 2004; Ли Сы-гуан, 1958; Поплавский, Соловьев, 2000], содержит большое количество разномасштабных вихревых геологических структур и вихревых геофизических движений.

О новой парадигме в геологии

В рамках ротационно-упругой модели тектонические и «климат» и «погода» Земли, т.е. и формирование и генезис зон сжатия и растяжения и разделяющих их узлов сдвига, определяются не столько самим движением блоков и плит, сколько их *взаимодействием* – ротационно-упругими волнами. Аргументом в пользу моментной природы тектонического процесса, протекающего на Земле, является установленная корреляция между «средним полярным расстоянием плит» и скоростями субдукции [Жарков, 1983; Forsyth, Uyeda,

1975] и спрединга [Жарков, 1983; Морган, 1974].

С помощью таких представлений объясняется геодинамика тектонических перестроек, связанная с направленными изменениями в расположении тектонических областей на поверхности Земли [Вихри, 2004]. А именно: во-первых, геометрической выдержанностью процесса смены простираций структур на одну и ту же величину, примерно 90^0 , во-вторых, тектонической цикличностью, выражающейся ритмично повторяющимся увеличением скорости вращения структурных планов и, в-третьих, корреляцией вращения структурных планов с тенденцией вращения палеомеридианов [Тверитинова, Викулин, 2005].

Рассмотрение строения границ литосферных плит как зон сдвиговых деформаций в свете ротационно-упругой тектонической концепции привело к формулировке гипотезы о правозакрученном полярном планетарном вихре, объясняющем левостороннее закручивание большинства литосферных плит [Вихри, 2004; Тверитинова, Викулин, 2005]. «Следы» такого вихря проявляются, во-первых, в чередовании радиальных субмеридиональных орографически выраженных современных структур сжатия (горно-складчатых систем) и растяжения (рифтовых зон) и, во-вторых, в сочетании с ними незамкнутых кольцевых субширотных структур левого сдвига (согласно [Кэрри, 1991]): зоны Тетического левостороннего кручения, а также подобные ей Циркумарктическая и Циркумантарктическая зоны). Те и другие представляют собой своеобразные рукава гигантского планетарного вихря, существованием которого можно объяснить, почему согласно модели «осесимметричной одноячейковой вынужденной конвекции» [Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005] литосферные и подлитосферные массы стягиваются к северному полушарию в виде их неравномерного северо-западного смещения (дрейфа) более быстрого в северном полушарии относительно южного.

Таким образом, основные особенности тектонических перестроек и движений литосферных плит хорошо укладываются в построенную нами ротационно-упругую (по сути, «вихревую») модель, что позволяет использовать ее в качестве основы при построении волновых геотектонических концепций. Поворотные движения блоков и плит, как и вихревые, ротационные и др. структуры, являются «собственными» решениями описанной ротационной задачи. Это позволяет концепцию о собственных моментах блоков и плит в рамках модифицированной задачи Дирихле сформулировать в виде более общей ротационно-упругой геодинамической модели, применимой к Земле, в целом. Интенсивность вихревых (поворотных) движений на планетах прямо пропорциональна величинам их угловых скоростей вращения [Вихри, 2004]. Поэтому модифицированная ротационно-упругая геодинамическая модель может быть использована для исследования тектонических процессов, протекающих на всех «твердотельных» планетах и их спутниках в солнечной системе, включая и их взаимодействие, объясняемое моментной природой упругих полей.

Примечательно, что в науках о Земле стремительное за последние 10 лет увеличение интереса к проблеме вращательных структур [Викулин, Тверитинова, 2007; Вихри, 2004; Ротационные, 2007; Тверитинова, Викулин, 2005], другими словами - переход от «линейки» к «циркулю», происходит на фоне «неуспехов» Новой глобальной тектоники [Пущаровский, 2005; Ротационные, 2007]. Как видим, имеет место очевидный процесс поиска новой тектонической парадигмы, в основу которой могут быть положены представления описанной в работе ротационно-упругой тектонической модели [Викулин, 2003; Викулин, Иванчин, 1998; Тверитинова, Викулин, 2005].

Хорошим примером, иллюстрирующим «неизбежность» перехода к моделям типа модифицированной ротационно-упругой геодинамической являются поплавокковые колебания Земли, для объяснения которых необходимо выходить за рамки класса моделей механически замкнутой Земли.

Под поплачковыми колебаниями Земли понимаются ее перемещения на орбите в направлении оси вращения. На возможность существования поплачковых колебаний Земли указывают результаты исследования дрейфа нуля сейсмометров и гравиметров, а также результаты сопоставления приливов северного и южного полушарий.

Исследования дрейфа нуля приборов показали постоянство спектрального состава дрейфа во времени, синхронность дрейфа в разных пунктах установки приборов и отсутствии связи дрейфа и его спектра с местными гидрометеорологическими условиями. Такие свойства дрейфа и его спектра позволяют предположить глобальный, планетарный характер причин, вызывающих смещение нуля-пункта приборов.

Вместе с тем значительные амплитуды дрейфа (достигающие при увеличении $\approx 10^4$ на сейсмограмме 10-15 мм) не находят пока объяснения, если не предположить существования перемещений всей Земли, в целом. Тогда кривую дрейфа нуля можно было бы интерпретировать как запись ускорений при возмущении орбиты Земли. Так как на записи дрейфа нуля не обнаружено суточных волн с заметной амплитудой, то можно предположить, что перемещения происходят в направлениях, близких к направлению оси вращения Земли, т.е. Земля колеблется как поплавок.

Проведенные исследования показали наличие взаимосвязи между дрейфом нуля и индексами солнечной и магнитной активности. При этом ход солнечной активности опережает ход кривой дрейфа на двое - пять суток, а ход магнитной активности практически синхронен с дрейфом нуля сейсмометра, что объясняется временем подлета к Земле заряженных частиц, излученных Солнцем.

Исследование океанических приливов показало, что наличие асинфазных океанических приливов в северном и южном полушариях не может быть объяснено лунно-солнечным притяжением и может служить доводом в пользу существования асинфазных вариаций силы тяжести, связанных с поплачковыми колебаниями Земли. Если допустить существование перемещений Земли на орбите, то следует прийти к выводу о связи этого явления с сейсмической активностью. Физический смысл этой связи очевиден: с моментов, близких временам экстремальных значений ускорений (при поплачковых колебаниях), в теле Земли возникают дополнительные напряжения, которые могут оказаться причиной повышения планетарной сейсмической активности. Такая связь действительно была обнаружена при сопоставлении сейсмической активности Земли с кривыми дрейфа нуля сейсмометров и гравиметров.

Если исходить из факта существования осевых колебаний Земли на орбите, то можно с единой точки зрения объяснить возбуждение сравнительно короткопериодических (1-3 месяца) и нерегулярных изменений скорости вращения и движений полюсов Земли. Сравнительно короткопериодические нерегулярные изменения скорости вращения Земли были обнаружены Д.Ю. Белоцерковским еще в 1963 г. Однако до настоящего времени не установлена их природа. Можно попытаться объяснить существование этих нерегулярных изменений на основе колебательных перемещений континентов в меридиональном направлении. Будем исходить из возможности колебательных перемещений континентов по слою пониженных скоростей, который обнаружен под материками на глубине 100 – 200 км.

Физический смысл связи изменения скорости вращения Земли с ее перемещениями на орбите в направлении оси вращения состоит в следующем. При ускоренном движении Земли в северном направлении на континенты будет действовать инерциальная сила, направленная к югу, что вызовет их скольжение по астеносферному каналу вдоль меридиана. При этом среднее расстояние от оси вращения Земли до континентов северного полушария увеличится, что приведет к увеличению момента инерции. Если бы материки были расположены симметрично на обоих полушариях, то эти два эффекта скомпенсировали бы друг друга. Но так как площадь материков северного полушария в

два раза больше площади южного, то, в целом, при таком движении момент инерции Земли увеличивается, а, следовательно, скорость вращения должна уменьшаться. При ускоренном движении Земли в южном направлении должно происходить увеличение скорости ее вращения.

Таким образом, короткопериодические изменения скорости вращения Земли могут быть объяснены колебательными перемещениями континентов в меридиональном направлении с амплитудой до 1 м.

Как видим, допуская существование поплавокковых колебаний Земли можно в рамках одной модели объяснить ряд важных эффектов, не находящих пока объяснения в рамках существующих подходов к задачам геодинамики. Суть проблемы очевидна: для объяснения причин, вызывающих такие колебания Земли на орбите, необходимо механические движения Земли связать с движениями других тел солнечной системы. И приведенные выше в настоящей работе данные это позволяют сделать в полном согласии с имеющимися геодинимическими данными.

Действительно. Все земные движения, включая сейсмические, вулканические, тектонические и, в целом, геодинимические коррелируют с величиной солнечной активности. По всей видимости, такой вывод является справедливым для всех планет солнечной системы. Солнечная активность, в свою очередь, определяется орбитальными и вращательными вокруг своих осей движениями планет, в основном, движениями планет – гигантов Юпитера и Сатурна. Эти данные показывают, что поплавокковые колебания Земли, как и такие же колебания других планет, могут являться тем связующим звеном, которое в рамках модифицированной вихревой ротационно-упругой задачи Дирихле для солнечной системы отвечает за взаимодействие между геодинимическими планетарными процессами.

Литература

- Буллен К.Е. Плотность Земли. М.: Мир, 1978. 442 с.
- Ван Беммелен Р.И. Теория ундаций // Структурная геология и тектоника плит / Ред. К. Сейферт. Т. 3. Тектоника гравитационного скольжения. – Эллипсоид напряжений. М.: Мир, 1991. С. 200-213.
- Викулин А.В. О природе Австралийских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 99-108.
- Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. 150 с. www.kscnet.ru/ivs/monograph/vikulin/index.html
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В. Вихри и жизнь // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 39-101.
- Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры // Доклады РАН. 2007. Т. 413. № 3. С. 372-374.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2004. 297 с. www.kscnet.ru
- Геологическая история СССР и тектоника плит / Ред. Л.П. Зоненшайн, Е.И. Приставакина. М.: Наука, 1989. 206 с.
- Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. М.: УКД, 2005. 496 с.
- Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 26-59.
- Давыдов А.В. Долгих Г.И., Запольский А.М., Конвиллем У.С. Регистрация собственных колебаний геоблоков с помощью лазерных деформографов // Тихоокеанская геология. 1988. №2. С. 117-118.
- Джеффрис Г. Земля, её происхождение, история и развитие. М.: ИЛ, 1960. 485 с.

- Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 155 с.
- Жарков В.Н.* Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
- Иванчин А.Г.* Непотенциальное вихревое решение задачи об электроне // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 211-218.
- Клушин И.Г.* Взаимосвязь тектонических напряжений и магматизма Земли на основе вариационного принципа наименьшего действия // Зап. ЛГИ. 1963. Т. 46. Вып. 1. С. 33-50.
- Колосков А.В., Аносов Г.И.* Особенности геологического строения и позднекайнозойский вулканизм восточно-азиатской окраины в рамках концепции вихревой динамики // Фундаментальные исследования океанов и морей. Книга 1 / Ред. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2006. С. 278-291.
- Кондратьев Б.П.* Теория потенциала и фигуры равновесия. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 624 с.
- Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. и др.* Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S- волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 198 с.
- Кузнецов В.В.* Физика горячей Земли. Новосибирск, 2000. 365 с.
- Кузнецов В.В.* Введение в физику горячей Земли Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 367 с.
- Кэрри У.* В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной: История догм в науках о Земле. М.: Мир, 1991. 447 с.
- Ламб Г.* Гидродинамика. . Т. 2. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика, 2003. 482 с.
- Линьков Е.М.* Сейсмические явления. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1987. 248 с.
- Ли Сы-гуан.* Геология Китая. М.: Изд-во Иностран. лит-ры, 1952. 146 с.
- Ли Сы-гуан.* Вихревые структуры Северо-Западного Китая. М.-Л.: Госгеолтехиздат. 1958, 132 с.
- Лукиянов А.В.* Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Проблемы геодинамики литосферы. М.: Наука, 1999. С. 253-287.
- Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движения. Череповец: Меркурий-ПРЕСС, 2000. 386 с.
- Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недр., 1965. 204 с.
- Маслов Л.А.* Геодинамика литосферы тихоокеанского подвижного пояса // Хабаровск-Владивосток: Дальнаука, 1996. 200 с.
- Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана.* М-СПб: Межправительственная океанографическая комиссия, 2003. 120 с.
- Мелекесцев И.В.* Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы глубинного вулканизма. М.: Наука, 1979. С. 125-155.
- Мелекесцев И.В.* Роль вихрей в происхождении и жизни Земли // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004а. С. 25-70.
- Мелекесцев И.В.* Взгляд геолога: вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли // Вихри в геологических процессах. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004б. С. 20-23.
- Михайлов А.А.* Курс гравиметрии и теории фигуры Земли. М., 1939. 432 с.
- Мишин С.В.* Элементы сейсмометрии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1993. 167 с.
- Морган В.* Океанические поднятия, глубоководные желоба, большие разломы и блоки земной коры // Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. С. 68-93.
- Мясников Е.А.* Магматические и рудоконтролирующие морфоструктуры центрального типа. На примере Верхнего Приамурья. Владивосток: Дальнаука, 1999. 84 с.
- Пейве А.В.* Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. 1961. № 3. С. 36-54.

- Поletaев А.И.* Ротационная тектоника земной коры // Материалы XXXVIII Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2005. С. 121-123.
- Поletaев А.И.* Ротационная тектоника или тектоническое вращение? // Актуальные проблемы региональной геологии и геодинамики. Восьмые Горшковские чтения. М.: МГУ, 2006. С. 32-38.
- Поплавский А.А., Соловьев В.Н.* Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. С. 235-242.
- Потапов Ю.С., Фоминский Л.П., Потапов С.Ю.* Вихревая энергетика и холодный ядерный синтез с позиции теории движения. Кишинев-Черкассы: Око-Плюс, 2000. 324 с.
- Потапов Ю.С., Фоминский Л.П., Потапов С.Ю.* Энергия вращения. <http://www.fund-skip.ru/books/Potapov/1.html>.
- Пуанкаре А.* Фигуры равновесия жидкой массы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 208 с.
- Пуцаровский Ю.М.* Глобальная тектоника в перспективе // Материалы XXXVIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 121-123.
- Рикитакэ Т.* Геофизические и геологические данные о Японской островной дуге и ее обрамлении // Окраины континентов и островные дуги. М.: Мир, 1970. С. 216-236.
- Rikitake T.* Geophysical and geological data in and around the Japan Arc. Japanese National Report for the UMP. Tokyo. 1967.
- Риман Б.* О движении жидкого однородного эллипсоида. М.-Л.: Гостехиздат, 1948. 339 с.
- Роль сдвиговой тектоники в структуре литосферы Земли и планет земной группы. СПб.: Наука, 1997. 591 с.
- Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.
- Сато Х.* Повторные геодезические съемки // Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии. М.: Недра, 1984. С. 108-120.
- Sato H.* A study of horizontal movement of the crust. Bull. Geograph. Survey Inst. 1973. 19 (1). 89-130.
- Серкеров С.А.* Теория гравитационного и магнитного потенциалов. М.: Недра, 1990. 304 с.
- Система планета Земля. (Нетрадиционные вопросы геологии). XI научный семинар. 3-5 февраля 2003 г. Материалы. М.: МГУ, 2003. 336 с.
- Слензак О.И.* Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова Думка, 1972. 182 с.
- Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы / Ред. В.Н. Шолпо. М.: ИФЗ РАН, 2002. 236 с.
- Стовас М.В.* Избранные труды. Ч. I. М.: Недра, 1975. 155 с.
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В.* Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. 2005. № 5. С. 59-77. www.kscnet.ru/kraesc/2005/2005_5/2005_5/html
- Тектоника и геофизика литосферы. Материалы XXXV Тектонического совещания. Т. 1, 2. М.: ГЕОС, 2002.
- Тимашев С.Ф.* О базовых принципах «Нового диалога с Природой» // Проблемы геофизики XXI века. Кн. 1 / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003. С. 104-141.
- Тяпкин К.Ф.* Физика Земли. Киев: Вища школа, 1998. 312 с.
- Хаббард У.* Внутреннее строение планет. М.: Мир, 1987. 327 с.
- Шен Э.Л.* Расширение Земли в связи с формированием её глобальной структуры // Проблемы расширения и пульсаций Земли. М. Наука, 1984. С. 180-185.
- Шен Э.Л.* Типы внутренней структуры Земли и возможные схемы эволюции Земли и планет. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 2. С. 18-25.
- Шипов Г.И.* Теория физического вакуума. М.: Изд-во ООО «Кириллица-1», 2002. 128 с.

- Шустер Г.* Детерминированный хаос: Введение. М.: Мир, 1988. 240 с.
- Эвернден Дж.Ф.* О чем говорят параметры фигуры Земли $\varepsilon = 1/298$, $C/Ma^2 = 0.333?$ // Изв. РАН. Физика Земли. 1997. № 2. С. 85-94.
- Bak P.* How nature works: The science of self-organized criticality/ Oxford: Oxford Univ. press. 1997. 212 p.
- Chao B.F., Gross R.S.* Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes // Geophys. J.R. astr. Soc. 1987. V. 91. P. 569-596.
- Chao B.F., Gross R.S.* Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes // Geophys. J. Int. 1995. V. 122. P. 776-783.
- Chao B.F., Gross R.S. and Dong D-N.* Changes in global gravitational energy induced by earthquakes // Geophys. J. Int. 1995. V. 122. P. 784-78.
- Daly M.C.* Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. 1989. 8. N 4. P. 769-790.
- Dirichlet G.L.* Untersuchungen uber ein Problem der Hydrodynamik // J. Reine Angew. Math. 1860. V. 58. P. 801.
- Forsyth D., Uyeda S.* On the relative importance of the driving forces of plate motion // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1975. V.43. P. 163-200.
- Geist E.L., Childs J.R., Scholl D.W.* The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. 1988. 7. N 2. P. 327-341.
- Hashimoto M., Tada T.* Horizontal Crustal movements in Hokkaido and its tectonic implications // Jour. Seismol. Soc. Jap. 1988. 41. N 1. P. 29-38.
- Hegger R., Kantz H., Schreiber T.* Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package // Chaos. 1999. V. 9. N 2. P. 413-435.
- Lee J.S.* Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // Geol. Mag. LXVI. 1928. P. 422-430.
- Mandeville M.W.* An outline of the principles of vortex tectonics. 2000. <http://www.aa.net/~mwm>
- Maps of part of the Northern hemisphere of Venus. Miscellaneous investigations series / Published by the U.S. Geological Survey. 1989.
- Nur A., Ron H., Scotti O.* Fault mechanics and the kinematics of block rotation // Geology. 1986. 14. P. 746-749.
- Takeuchi A.* On the episodic vicissitude of tectonic stress field of the Cenozoic northeast Houshu arc, Japan / Formation of active ocean margins. Ed. N. Nasu et. al. Tokyo. 1985. P. 443-465.
- Teisseyre R., Takeo M., Majewsky E.* (Eds.). Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects. Heidelberg, Germany: Springer, 2006. 582 p.
- Thomson W.* Mathematical and physical papers. V. VIII. L.: Cambridge Uversity Press, 1890. P. 484-515.
- Whitney M.I.* Aerodynamic and vorticity erosion of Mars: Part II. Vortex features, related systems, and some possible global patterns of erosion // Geol. Soc. America Bull. 1979. Part I. V. 90. P. 1128-1143.

13. «ПРОБЛЕМА № 1» В ФИЗИКЕ ЗЕМЛИ

Уже более 500 лет, со времен знаменитого плавания Колумба в 1492 г. и открытия магнитногоклонения Г. Гертманом в 1510 г., известно, что источником магнитного поля Земли являются процессы, протекающие в ее недрах. В разное время многие выдающиеся умы: С.И. Брагинский, Э. Буллард, К.Ф. Гаусс, У. Гильберт, П.Н. Лебедев, Я.Б. Зельдович, Д. Лармор, В. Сазерленд, Я.И. Френкель, А. Эйнштейн, М. Эльзассер и многие, многие др., пытались определить механизм генерации геомагнитного поля Земли [Буссе, 1984; Григорьев, 2004; Яновский, 1953, 1967]. Однако до настоящего времени так и нет достаточной ясности о природе такого механизма.

Трудности, стоящие на пути решения проблемы геомагнитного поля, связаны не только с недостаточным знанием строения Земли и состояния вещества в ее недрах, но и с пониманием самих основ электромагнетизма [Низовцев, Бычков, 2007; Николаев, 2002]. В этой главе остановимся на некоторых из них.

Суть проблемы геомагнетизма

Состояние проблемы, словами автора работы [Кузнецов, 2008], можно выразить следующим образом.

Ф. Буссе [1984] утверждает, что А. Эйнштейн считал эту проблему одной из трех важнейших проблем Физики. Несмотря на колоссальные усилия сотен физиков, занимающихся этой проблемой, нет ни одного достаточно серьезного успеха в этом деле. Проследим еще одну цепочку. Если магнитное поле на Земле обязано динамо-эффекту в жидком железном ядре (что не подвергается сомнению), то почему магнитное поле раньше было на Марсе, Луне, Ио, Ганимеде, а потом исчезло? (Возможно, что на Ганимеде поле ещё существует). Почему оно обнаружено на Меркурии, но его нет на Венере? Почему магнитное поле имеется на больших планетах (по своей структуре однотипное с земным), где, по-видимому, нет железного ядра? Разговоры относительно того, что, дескать, динамо на этих планетах “раскручивается” в жидком водороде, и вообще эти планеты “холодные”, “разбиваются” результатами наблюдений космической станцией Вояджер, которая обнаружила, что тепловой поток на этих планетах значительно превышает поток тепла от Солнца на их расстояниях.

Остановимся на теоретической проблеме динамо. Модель генерации геомагнитного поля базируется на совместном решении нескольких уравнений. Они описывают движение вязкой проводящей жидкости, заполняющей сферическую полость внешнего ядра. Жидкость подвергается воздействию гравитационных, гидродинамических, инерционных и электромагнитных сил. Движение жидкости описывается: 1) гидродинамическим уравнением Навье-Стокса, 2) уравнением индукции, связывающим магнитное поле с движением жидкости, 3) уравнениями неразрывности и 4) термодинамики.

Уравнение Навье-Стокса в векторной форме имеет вид:

$$\partial \mathbf{v} / \partial t + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \nu / 3 \nabla (\operatorname{div} \mathbf{v}) - 2(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) - 1/\rho \nabla p + \mathbf{g} - \mu / 4 \pi \rho \operatorname{rot} \mathbf{H} \times \mathbf{H},$$

где t – время, $\mathbf{v}$ – вектор скорости, ν – коэффициент кинематической вязкости, $\boldsymbol{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли, ρ – плотность вещества внешнего ядра, P – давление, $\mathbf{g}$ – ускорение массовых сил, μ – магнитная проницаемость, $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля.

Уравнение индукции в векторной форме записывается в виде:

$$\partial \mathbf{H} / \partial t = \operatorname{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{H}) + \nu_m \Delta \mathbf{H},$$

где ν_m – коэффициент «магнитной диффузии» (магнитная вязкость).

Уравнения неразрывности и диффузии тепла (T – температура):

$$\nabla(\mathbf{v} \times \mathbf{H}) = 0,$$

$$\partial T / \partial t + \mathbf{v} \nabla T = Pr^{-1} \nabla^2 T,$$

где $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, x, y, z – декартовы координаты.

Эти уравнения содержат скорость $\mathbf{v}$ и напряженность магнитного поля $\mathbf{H}$ и должны решаться совместно. Однако, их совместного решения до сих пор не получено (и вряд ли возможно), поэтому проблема генерации геомагнитного поля идет в направлении разработки кинематической теории динамо, в которой скорость жидкости $\mathbf{v}$ считается известной и решается только уравнение индукции, определяющее геомагнитное поле. Если принять, что характер движения жидкости задан, необходимость решения уравнения Навье-Стокса отпадает, а уравнение индукции превращается в линейное уравнение в частных производных второго порядка, которое после соответствующих преобразований может быть решено.

Заметим, что внимательный анализ особенностей геомагнетизма, рассматриваемые в контексте динамо модели (глобальной тектоники плит) показывает:

- Модель-динамо не решает ни одной из проблем геомагнетизма, кроме одной, в которой показывается принципиальная возможность генерации магнитного поля посредством взаимодействия полоидального (дипольного) и тороидального магнитных полей. При этом не находят решения и такие задачи геомагнетизма как: инверсии поля, западный дрейф, движение магнитных полюсов, джерки, морфология поля и т.п.

- Принято считать, что причина появления джерков, т.е. быстрых (в течение одного года) изменений магнитного поля, присуща механизму генерации геомагнитного поля. Если джерки генерируются около поверхности внутреннего ядра, то в этом случае можно оценить электропроводность внешнего ядра Земли. Оцененная таким образом электропроводность примерно на 5 порядков меньше, чем постулированная величина проводимости, необходимая для протекания динамо-эффектов.

- Не найдены численные решения уравнения гидродинамики, подтверждающие принятую в динамо модель конвекции.

- Данные сейсмологии (travel time, splitting functions) не подтверждают принятую модель конвекции, а, скорее, ей противоречат.

- Нет единой теоретической модели динамо. Огромное количество противоречащих друг другу моделей $\alpha\omega$ -динамо: α^2 – динамо, динамо Рикитаке, диск Фарадея и т.д. (рис. 13.1), указывает на сомнительность таких подходов.

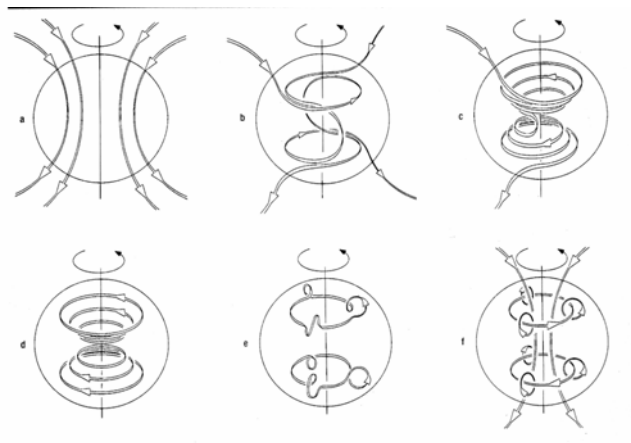


Рис. 13.1. Известные модели $\alpha\omega$ -динамо [Кузнецов, 2008].

- Принципиальным моментом многих моделей динамо является наличие во внешнем ядре сильного тороидального поля. По некоторым моделям интенсивность тороидального поля больше дипольного в 500 раз. Тем не менее, тороидального поля по наблюдениям на поверхности Земли не обнаружено. Мы, вероятно, могли бы не обнаружить наличие тороидального поля на земной поверхности, например, если бы ядро было окружено сверхпроводящим экраном. Однако если бы по какой-либо немыслимой причине на границе ядра оказался бы сверхпроводящий экран, то мы, тем не менее, могли бы судить о его наличии с помощью электромагнитного зондирования.

В течение последних веков, в основном, в XVIII – XX вв., усилиями ученых многих специальностей были достигнуты значительные успехи в изучении строения планеты (главы 2 - 6). Получены несколько менее значимые, но вполне определенные знания о распределении температуры в недрах Земли (глава 8) и, как следствие, о природе границ между ее слоями (глава 9). На этом фоне существующие «неопределенности» в проблеме геомагнитного поля, как Земли, так и других планет Солнечной системы, позволяют, и даже «вынуждают» нас считать ее Проблемой № 1 в Геофизике.

Определенные надежды на решение проблемы Геомагнетизма возникли в рамках Новой глобальной тектоники, в основе которой были заложены представления о тектонических плитах, «движущихся» на «спинах» конвекционных ячеек, возникающих во внешнем ядре и нижней мантии. Однако, как оказалось (глава 12), в рамки таких представлений «не вписываются» вихревые геологические структуры. В этой связи, «неуспехи» в решении проблемы генерации геомагнитного поля планеты, по-видимому, могут быть объяснены недостаточно полной разработкой представлений о геодинамических движениях планеты, не учитывающих «вихревые» особенности геологических структур. Рассматриваемая в такой плоскости, проблема геомагнитного поля Земли является, по сути, Проблемой № 1 в Геодинамике [Викулин, 2004, 2008].

В настоящей главе постараемся собрать «под одной крышей» все наработанные к настоящему времени «нестыковки», которые, на наш взгляд, являются «камнем преткновения» в решении Проблемы № 1 Геодинамики.

Нестыковки [Тверитинова, Викулин, 2007]

Выше (см. раздел «Новые данные» предыдущей главы) приведены тектонические нестыковки между существующими геодинамическими концепциями и моделями, с одной стороны, и наблюдаемыми данными – с другой. Перечень такого рода нестыковок может быть продолжен. Действительно, в соответствии с геосинэнергетическими представлениями [Жуланова, 2003], для оценки геодинамических моделей в качестве наиболее надежных должны использоваться термодинамические критерии. Но, в таком случае [Жуланова, 2003], «несмотря на гигантский массив расчетов и физические эксперименты, доводы в пользу ячейистой конвекции мантийных масс, остаются большие сомнения в том, что она может рассматриваться как фактор сопряженного проявления тектонических сил (горизонтальное движение плит, субдукция) и петрогенетических (выплавление огромных объемов магм на границах плит) процессов. Дело в том, что стационарная ячейистая конвекция способна реализоваться только в закрытых термодинамических системах, будучи направлена на выравнивание внутренних тепловых неоднородностей. Она несовместима с выносом энергии и вещества вовне, сопровождающим вулканизм (и, добавим, сейсмичность – А.В.)».

Как видим, тектоническая нестыковка «потянула» за собой и электромагнитную нестыковку, что вполне можно было ожидать, т.к. последняя парадигма геологии - Новая глобальная тектоника, представляет собою вполне завершённую самосогласованную концепцию, подтверждаемую данными многих разделов науки.

Перечень геомагнитных нестыковок может быть продолжен. Действительно, на основании обзора в [Низовцев, Бычков, 2007], имеем:

1. Согласно классической теории электромагнетизма, магнитное поле есть проявление завихренности эфирных течений, не связанных обязательно с электрическим током. Так, В. Томсон (лорд Кельвин) полагал, что магнитное поле суть «движение, вращение которого есть магнитная сила» [Thomson, 1890], а не электрический ток.

2. Накопленные экспериментальные данные указывают на то, что магнетизм является более универсальным явлением, нежели электричество. Еще М. Фарадей истолковывал криволинейность магнитных силовых линий как признак того, что сила есть результат процесса. Согласно Кельвину, «объяснение всех явлений электромагнитного притяжения или отталкивания и электромагнитной индукции следует искать просто в инерции и давлении материи, движения которой образуют тепло» [Максвелл, 1989, с. 831]. Для Максвелла «в каждой точке среды существует нечто такое, что имеет природу угловой скорости относительно оси, направленной вдоль магнитной силы» [Максвелл, 1989, с. 821]. Эффект Холла однозначно свидетельствует о том, что магнетизм есть явление вращательной природы [Уиттекер, 2001].

3. Во второй половине XX в. был установлен квантовомеханический эффект Ааронова-Бома [Чирков, Агеев, 2001], сущность которого заключается в том, что заряженная частица, движущаяся в области, в которой отсутствует магнитное поле, но векторный потенциал отличен от нуля, испытывает воздействие неясной природы (согласно данным работы [Иванчин, 2007] – вихревой?), приводящее к изменению фазы частицы.

4. Имеет место несовпадение в расположении географических и магнитных полюсов при закономерной (по спиральной линии) миграции последних с течением геологического времени. При этом, в истории Земли неоднократно происходили переполюсовки геомагнитного поля. В.И. Уломовым также отмечена «близость расположения большинства полюсов вращения литосферных плит...к геомагнитным, а не географическим полюсам» [Атлас, 1980].

5. Экспериментальные исследования гиромагнитного эффекта, проведенные П.Н. Лебедевым и С. Барнеттом, не позволяют связать геомагнетизм с вращением планеты [Паркинсон, 1986], что в то же время не позволяет исключить наличие неизвестного физического (ротационного, торсионного, вихревого, согласно данным работ [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Иванчин, 2007; Шипов, 2002] поля, которое одновременно могло бы поддерживать и вращение планеты, и создавать ее магнитное поле. Такие экспериментальные факты вынуждают искать более универсальное, нежели гидромагнитное динамо, решение.

Приведенные данные позволили авторам работы [Низовцев, Бычков, 2007] в рамках модельных представлений природу геомагнетизма планеты увязать с имеющими место в литосфере и других слоях Земли вихревыми течениями, связанными с вращением планеты. При этом удастся объяснить существование пропорциональной взаимосвязи между магнитным и механическим угловым моментами Земли.

Бароэлектрический эффект и электромагнетизм планет [Григорьев, Григорьева, Ростовский, 2003]

Почему Земля – магнит?

Почему магнитные поля есть и у других планет, и у звезд? Какую физическую природу имеют эти поля? Как объяснить вариации геоэлектрического и геомагнитного полей? На эти и многие другие вопросы, которые стоят перед человечеством уже не одну сотню лет, пока так и нет ответа.

Поиски объяснения физической природы магнетизма небесных тел, в первую очередь геомагнетизма, шли по путям по хорошо всем известным путям (глава 7). В их начале – теория Гильберта, согласно которой Земля является большим магнитом. Открытие явления Кюри, в основе которого заложено разрушающее влияние высокой температуры на остаточное намагничивание, заставило искать другие пути. Одним из возможных путей является гипотеза разделяющихся зарядов, предложенная В. Сазерлендом в начале XX в. [Suthtrland, 1903]. Согласно этой гипотезе, магнетизм планет и звезд, хотя бы частично, обязан действию следующего механизма: внутренняя часть космического тела под действием его гравитации деформируется, что в результате разделения зарядов ее заряжает положительно. Вращение этих перераспределившихся зарядов вместе со всем телом и порождает его магнитное поле.

Согласно настольной книге всех физиков [Ландау, Лифшиц, 1982], внутри проводников электростатические поля отсутствуют. В этой связи многие исследователи полагали и, по-видимому, полагают, что в недрах планет и звезд, которые обладают достаточно высокой проводимостью, не может существовать электрических полей. Однако, как следует из теории, электрические поля отсутствуют только внутри таких *химически однородных* проводников, внутри которых и температура и давление являются *постоянными*. Земля и другие планеты, как мы видели из данных, представленных в предыдущих главах настоящей книги, имеет достаточно сложное слоистое строение, а температура и давление увеличиваются с глубиной до достаточно больших значений. Таким образом, «запрет» на обширный класс *бароэлектрических явлений*, приводящих к появлению внутри Земли электромагнитных полей, оказывается несостоятельным.

Физическая причина возникновения бароэлектрических полей определяется существованием зависимости работы выхода электрического заряда от давления. Если распределение давлений в проводнике неоднородно, то электроны, переходят из областей, где работа выхода меньше в те, где она больше. Такое перераспределение электронов и порождает бароэлектрические поля.

Проведем некоторые оценки. Пусть в центре атома в отсутствии гравитации находится ядро заряда Ze , окруженное облаком электронов. Равновесие наступает, когда гравитационная сила Mg , действующая на ядро, уравнивается электрической силой ZeE , где E – напряженность электрического поля, создаваемое окружающими ядро электронами, M – масса ядра, g – вектор ускорения свободного падения. Отсюда следует элементарная оценка для величины напряженности этого поля:

$$E = \frac{Mg}{Ze}.$$

Подстановкой численных значений получаем ничтожно малую величину для значения напряженности поля, возникающего в атоме в результате его деформации под действием силы тяготения $E \approx 10^{-12}$ СГСЕ.

Однако, оценивая величину поля в макроскопических масштабах, получаем совершенно другую величину. Действительно, полагая, что перепад напряженности гравитационного поля между поверхностью Земли и ее центром составляет $\delta g \approx 10^3$ СГСЕ, среднее число атомов в единице объема составляет $N \approx 10^{24}$, для поля $E = 4\pi P$, где P – вектор поляризации, получаем значение, близкое к 10^6 СГСЕ!

Таким образом, поляризационный механизм формирования бароэлектрического (и баромагнитного, образующегося при движении обзанных бароэлектрическому эффекту зарядов) полей может играть весьма существенную роль. При этом бароэлектрические эффекты будут играть тем более заметную роль, чем значительнее перепады давлений. Именно поэтому важным примером их проявления являются такие объекты, как планеты и звезды.

В монографии [Григорьев, Григорьева, Ростовский, 2003] детально излагаются некоторые варианты теоретического описания бароэлектрического эффекта. Значительная их часть базируется, в конечном итоге, на наиболее общем условии термодинамического равновесия – условии постоянства электрохимического потенциала, а различаются они лишь подходами к вычислению плотности «избыточной» энергии в зависимости от давления.

Особый вопрос занимают дифференциальные внутренние движения. Именно такие движения ответственны за магнитогидродинамическую генерацию (усиление) магнитных полей, т.е. за те «эффекты динамо», которые, по мнению большинства исследователей, играют доминирующую роль. Палеомагнитные данные о магнитном поле Земли и, конечно, наблюдения над магнитными полями Солнца и ряда звезд убедительно показывают, что эта роль действительно велика и что она тем заметнее, чем более интенсивны дифференциальные движения.

В рассматриваемой монографии «электромагнитной» модели Земли придаются более реалистические черты, по сравнению с моделями предшественников. При этом, конечно, авторам пришлось столкнуться с вопросом: какое место внутри планеты занимают области ионной проводимости и какую они играют роль в формировании ее электрического и магнитного полей. Ионная проводимость, естественно, доминирует в приповерхностных участках планеты. Ионы, перегруппировываясь под действием бароэлектрического поля, приводят к его ослаблению и даже, возможно, полному занулению вблизи поверхности. В итоге авторам пришлось признать, что, в действительности, отрицательно заряженная поверхность, под которой такое поле имеется, не совпадает с поверхностью планеты, а определяется границей между областями проводимости первого и второго рода.

Следует отметить, что бароэлектрический эффект в проводниках должен проявляться при наличии градиентов давлений, вне зависимости от того, какие физические причины вызывают появление этих градиентов. Непрерывность тангенциальных составляющих напряженности электрического поля на границе раздела сред должна привести к тому, что электрическое поле может обнаружиться и за пределами неоднородно напряженного проводника. Конечно, при малых градиентах давления поле также будет мало. Однако, как показывают оценки, это поле доступно для экспериментального обнаружения, его напряженность может быть измерена даже при нагрузках, далеких от разрушающих.

Как показывают оценки [Григорьев, Григорьева, Ростовский, 2003], около 10% магнитного момента планет земной группы обязано перераспределению зарядов, создаваемому в результате действия их собственного *тяготения и вращения*.

Та же часть давления, которая обязана действию приливных сил, ответственна за создание электрических полей над поверхностью планет. В частности, наблюдаемые черты поля ясной погоды над поверхностью Земли [Имянитов, Шифрин, 1962; Чалмерс, 1974; Френкель, 1947] объясняется не как результат действия «грозового механизма», а как следствие действия приливных сил со стороны Луны и, в меньшей мере, Солнца. Из сказанного, в частности, следует вывод о наличии электрических полей над поверхностями таких небесных тел, которые лишены атмосферы, но испытывают приливные воздействия, например, над Луной [Григорьев, Григорьева, 1995].

Резюме

Как видим, бароэлектрические механизмы дают вполне реалистические оценки и в ряде случаев позволяют уточнить и дополнить существующие модели Земли и подходы к решению «геомагнитных и электрических» задач Наук о Земле. Основой бароэлектрических построений, как отмечалось выше, являются именно «собственные» *тяготение и вращение* космического тела. Это позволяет надеяться, что дальнейшее развитие «бароэлектрического» направления позволит со временем получить и новые интересные результаты в области *вихревой* Геодинамики.

Литература

- Атлас океанов. Северный ледовитый океан. ГУНО–МО СССР, 1980. С. 145.
- Буссе Ф. Магнитная гидродинамика земного динамо // Вихри и волны. М.: Мир, 1984. 335 с.
- Викулин А.В. Введение в физику Земли. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. 297 с.
- Викулин А.В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008. 230 с.
- Григорьев В.И. Электромагнетизм космических тел. М.: Физматлит, 2004. 112 с.
- Григорьев В.И., Григорьева Е.В. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физ. Астроном. 1995. Т. 36. № 1. С. 61.
- Григорьев В.И., Григорьева В.С., Ростовский В.С. Бароэлектрический эффект и электромагнитные поля планет и звезд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 192 с.
- Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И. Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 154 с.
- Жуланова И.Л. Методология познания вулканизма Земли: геодинамика или геосинэнергетика? // Вулканизм и геодинамика. 2-ой Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург, 2003. С. 20-25.
- Иванчин А.Г. Непотенциальное решение задачи об электроне // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 211-218.
- Имянитов М.И., Шифрин Л.С. // УФН. 1962. Т. 76. № 4. С. 593.
- Кузнецов В.В. Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 367 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Теоретическая физика. Т. VIII. М.: Наука, 1982. 624 с.
- Максвелл Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. Т. II. М.: Наука, 1989.
- Низовцев В.В., Бычков В.Л. Сдвиговые течения в земной коре и вихревая природа геомагнетизма // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 383-401.
- Николаев Г.В. Тайны электромагнетизма и свободная энергия. Новые концепции физического мира. Томск: ООО «НТЦ НЭД», 2002. 150 с.
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 120 с.
- Тверитинова Т.Ю., Викулин А.В. Волновая ротационно-упругая тектоника планет // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 271-278.

- Шипов Г.И.* Теория физического вакуума. М.: «Кириллица-1», 2002. 128 с.
- Чалмерс Дж. Ф.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
- Чирков А.Г., Агеев А.Н.* // ЖТФ. 2001. Т. 1. В. 2. С. 16-22.
- Уиттекер Э.* История теорий эфира и электричества. Современные теории. 1900-1926 гг. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 464 с.
- Френкель Я.И.* // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1947. Т. 11. № 6. С. 587.
- Яновский Б.М.* Земной магнетизм. М.: Госуд. изд-во Техничко-теоретической литературы, 1953. 592 с.
- Яновский Б.М.* Магнитное поле Земли. Л.: Общество «Знание» РСФСР, 1967. 48 с.
- Sutherland W.* // Terrastr. Magn. Planet Sci. 1903. V. 2. P. 249; Atm. Electr. 1903. V. 8. P. 49.
- Thomson W.* // Mathematical and physical papers. V. VIII. L.: Cambredge University Press, 1890. P. 484-515.

14. ГЕОЛОГИЯ И ВРЕМЯ (продолжение)

Выше, в начале главы 11, мы уже останавливались на проблеме времени в геологии. Была отмечена исключительная важность категории времени для геологических процессов и показано, что в первом приближении характерные периоды фанерозойской эры можно считать примерно равными по продолжительности. На этом основании для геодинамических построений в пределах фанерозоя было предложено использовать концепцию ньютоновского, протекающего однородно, времени, достаточно надежно «привязанного» абсолютными радиометрическими измерениями к современному периоду. Именно такая концепция геологического времени и использовалась при геодинамических построениях, проводимых в главах 11 и 12.

Геология и жизнь

Даже в пределах достаточно короткой по продолжительности в геологическом смысле фанерозойской эры, которая составляет около одной седьмой от общей геологической истории «жизни» земной коры, однородным (равномерным) течение времени можно считать с большой натяжкой. Действительно, по данным определений А. Холмеса и Ю. Кулпа [Земля, 1974, с. 267; Holmes, 1959; Kulp, 1961] продолжительности основных фанерозойских периодов по-прежнему, в среднем, равны той же (глава 11, раздел «Геология и время») величине:

$$T = (60 \pm \sigma) \text{ млн лет}, \sigma = 20 \text{ млн лет},$$

при большем (в два раза) значении среднеквадратичного разброса σ . При этом продолжительности двух периодов из десяти оказываются явно аномальными: аномально малой для Силура $\approx 20 \leq (T - 2\sigma) \text{ млн лет}$ и аномально большой для Кембрия $\approx 100 \geq (T + 2\sigma) \text{ млн лет}$.

Следует отметить, что именно в фанерозое имел место наиболее «бурный» за всю 4.5 млрд. историю Земли расцвет различных форм жизни. Действительно, жизнь на Земле возникла менее чем за первый *млрд лет* существования планеты [Хаин, 1987]. Прошли еще *2.5 млрд лет* и возникли одноклеточные водоросли; многоклеточные организмы появились только около *500 млн лет* назад, в Кембрии; наземные растения и позвоночные возникли быстрее – в Палеозое, около *400 млн лет* назад; млекопитающие – в Мезозое, около *200 млн лет* назад [Викулин, Мелекесцев, 2007]. Первые человекообразные обезьяны появились в конце третичного периода: *Australopithecus Anamensis* – *3.8-4.2 млн лет* назад и *Australopithecus Afarensis* – *2.9-3.7 млн лет* назад; завершается этот ряд единственным, выжившим из десятков видов гоминидов, *Homo sapiens sapiens*, который в Европе появился и окончательно «обосновался» около *40-20 тыс лет* назад [Быков, 2005; Викулин, 2007].

Известно, что процессы, обеспечивающие жизнь, и тем более, способствующие ее зарождению, протекают не в соответствии с принципами рассеяния энергии и увеличения энтропии и даже более определенно – вопреки этим принципам. Процессы же психической деятельности у человека и высших животных могут протекать и без (видимых) затрат энергии - т.е. с нарушением закона сохранения энергии. Именно эти факты и позволили К.Э.Циолковскому около ста лет назад усомниться в безусловной справедливости принципа неуменьшения энтропии [Гвай, 1959; Циолковский, 2007]. К.Э. Циолковский считал, что «в теоретическом отношении все явления обратимы» [Гвай, 1959, с. 54], и, что «невозможно создать энергию из ничего. Но энергию можно собрать» [Гвай, 1959, с. 9], что, по сути, и осуществляют на практике живые организмы. Близкой, по сути, точки зрения придерживался и В.И. Вернадский [1991, с. 25]: «В косной среде

биосферы нет необратимости. Обратимые круговые физико-химические и геохимические процессы в ней резко преобладают». Поэтому вполне естественно предположить, что и течение геологического времени на Земле – планете, на которой существует жизнь, могло происходить не в соответствии с принципами только рассеяния энергии, ее сохранения и, как следствие, неуменьшения энтропии. Другими словами, можно ожидать, что течение геологического времени на Земле, возможно, происходило неоднородно (неравномерно).

Как видим, концепция времени в геодинамике приобретает самую первостепенную важность.

Согласно [Геологический, 1978, с.121], «время в исторической геологии следует применять *только для обозначения промежутков*, в течение которых образовались отличия стратиграфических единиц» (курсив – автора). По сути, такой же подход к концепции времени имеет место и в достаточно большой по объему главе 4 фундаментального труда по общей геологии [Земля, 1974, с. 230]: «Функциональная связь времени и Земли пронизывает все аспекты геологии. Развитие геологических теорий обусловлено выявлением уникальных событий прошлого, установлением хронологической последовательности явлений в отдельных районах и одновременности некоторых событий, осуществлявшихся в прошлом в точках, расположенных на значительном расстоянии одна от другой».

Проблеме концепции геологического времени посвящена фундаментальная работа К.В. Симакова [1999]. В этой работе [Симаков, 1999, с. 4] показывается, «что неразработанность концепции геологического времени вызвана, в первую очередь, отсутствием глубокого философского осмысления его специфической природы, кардинального отличия от обыденного (физического). И это совершенно естественно и закономерно, поскольку, *специфическая природа реального геологического времени, относящегося к категории статического, а не динамического*, требует использования принципиально иного логико-математического аппарата по сравнению с тем, который традиционно применяется при конструировании метрики и измерении концептуального физического (обыденного) времени» (курсив автора).

В чем же суть проблемы?

Суть проблемы

Впервые наиболее полное физическое определение категорий абсолютных пространства и времени было дано И. Ньютоном. Согласно И. Ньютону, «абсолютное, истинное математическое время само по себе и по самой своей сущности без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью» [Ньютон, 1936, с. 30].

Но: «абсолютное время, если бы такое могло существовать, из-за однородности не могло бы «течь». Не было бы и «стрелы времени»» [Круть, 1978, с. 84].

В каждой науке существуют свои периодичности, которые только и могут быть использованы в рамках этой науки в качестве эталона времени.

«Метагалактика, рассматриваемая на астрофизическом уровне, обладает *космологическим временем*, обусловленным разбеганием галактик, происходящим однонаправлено в течение, как полагают, более 10 млрд лет» [Круть, 1978, с. 87].

В.И. Вернадский [1975, с. 73] вводит понятие о биологическом времени: «Время, связанное с жизненными явлениями ... я буду называть биологическим временем. Очевидно, свойства и проявления такого времени, связанного с («жизненным» - автор) пространством, резко отличны от всего остального пространства нашей планеты, могут отличаться от другого времени. Решить этот вопрос можно только эмпирическим изучением времени. Такое изучение показывает, что биологическое время равно по длительности геологическому, так как на всем протяжении геологической истории мы

имеем дело с жизнью ... биологическое время охватывает время порядка 1.5-3 (в соответствии с новыми данными 4.2 – автор) *млрд лет*» [Круть, 1978, с. 91-92]. Этот анализ, проведенный В.И. Вернадским, подтверждает высказанные выше предположения о возможном неоднородном течении геологического времени на Земле и напрямую связывает такую «неоднородность» с существованием жизни на планете.

Как видим, концепция времени, вполне вероятно, не является единой концепцией для различных научных направлений. Поэтому проблеме времени посвящено очень большое количество фундаментальных работ, число которых постоянно увеличивается, см., например [Конструкции, 1996; Рейхенбах, 2003; Хоккинг, 2007].

Обзор представлений о развитии концепции времени

Следуя обзорам [Викулин, 2007; Викулин, Мелекесцев, 2007; Чернин, 1987], можно выделить следующее.

Во времени классической механики Ньютона нет никакого выделенного, особенного момента, который мог бы претендовать на исключительное право считаться начальным, стартовым, да и вообще какие-либо особые права. Все моменты одинаковы – поэтому-то одинаковы и результаты одних и тех же физических экспериментов, проводимых в разное время.

Во всей области применимости классической механики пространство и время «ведут себя» так, как если бы они были ограничены и бесконечны по объему и длительности. Именно с такими симметриями времени и пространства, как показала Э.А. Нетер в 1918 г., и связаны законы сохранения энергии, импульса и момента импульса [Вариационные, 1959, с. 604-630].

По выражению А. Эйнштейна, построенный И. Ньютоном фундамент оказался исключительно плодотворным и, тем самым, позволил осуществить мечты философов-натуралистов древности – Демокрита и Эпикура, считавших, что должна существовать причинная взаимосвязь всех без исключения природных явлений. После таких успехов ньютоновской теории вряд ли оставались какие-нибудь сомнения в том, что развитие вообще всех материальных явлений должно происходить детерминировано и с закономерностью, которую можно было бы сравнить с ходом часов.

Развитие идеи о материи, движении и космосе как грандиозном механизме в XVII веке было распространено Р. Декартом и на живую природу, на мир организмов. После Р. Декарта механистический подход к проблеме жизни развивался в работах Ж. Кювье, А.А. Ляпунова, Н.А. Умова, А.Н. Колмогорова и многих других исследователей. Даже уже в наши дни биолог академик Б. Вайнштейн назвал молекулу белка молекулярным роботом – самой маленькой имеющейся в природе машиной, работающей на стереохимических и электронных принципах и определяющих самосборку белковой цепи в закрученную спиральную структуру ДНК. Как видим, представления о жизни, как о механическом вихревом (закрученном в спираль) процессе, зарождались одновременно с представлениями о пространстве и времени и на протяжении всего времени тесно соприкасались друг с другом. Видимо эти обстоятельства, совместно с большим объемом клинических наблюдений, и позволили российским ученым-медикам в 70-х гг. XX века сформулировать оригинальную концепцию, согласно которой психика человека имеет *пространственно-временную организацию*.

Время классической механики – время макромира, мира, масштабом и мерой которого служит сам человек и непосредственно окружающие его тела природы. Классическая механика действует и торжествует в рамках макромира, и только там.

Эти рамки перешагнула новая физика, созданная в начале XX века А. Эйнштейном, а также Х. Лоренцем, А. Пуанкаре, Д. Гамильтоном и другими физиками и математиками. Теория относительности открыла новые свойства времени и пространства. Было

установлено, что время теснейшим образом связано с пространством. Вместе с пространством оно составляет единый четырехмерный мир, в котором и происходят все физические явления.

Согласно теории относительности, нельзя разделить наше четырехмерное пространство-время на трехмерное пространство и одномерное время. Пространство-время порождается материей и теряет свое самостоятельное существование. Структура четырехмерного пространства-времени зависит от распределения и движения материи – частиц и полей.

В новой физике время теряет свою абсолютность. Это проявляется, прежде всего, в том, что абсолютного смысла лишается понятие одновременности. Сам темп времени зависит теперь от движения и поэтому становится относительным. Наконец, время оказывается подверженным действию тяготения, которое влияет на его темп: там, где имеются силы тяготения, время течет медленнее, чем в отсутствие этих сил. Например, вблизи черной дыры темп времени столь сильно замедляется, что оно даже как бы останавливается там в своем беге.

Неожиданный поворот произошел в развитии представлений об энергии. Раз время перестало быть абсолютным, оно утратило, строго говоря, и свою однородность. Течение времени может оказаться неравномерным, в разные моменты разным, в зависимости от происходящих во времени и пространстве физических явлений – например, перемещений тяготеющих масс. Но в неоднородном времени нет и такой сохраняющейся физической величины, как энергия. Закона сохранения энергии просто не существует. Более того, полная энергия и полный угловой момент для замкнутой Вселенной не могут быть определены – они являются бессмысленными понятиями [Уиллер, 1982]. Конечно, при движениях с малыми скоростями и в слабых полях тяготения, энергия, по-прежнему, сохраняется – хотя, как мы теперь понимаем, не строго, а с точностью до релятивистских поправок.

Квантовая теория, вторая фундаментальная физическая теория наших дней, вместе с теорией относительности, в комбинации с ней, дает возможность изучать свойства времени в микромире. «Этот квантовый вопрос так невероятно важен и труден, - писал А. Эйнштейн своему другу М. Лаубу в 1908 г., - что каждый должен им заниматься» [Уиллер, 1982, с. 156]. Настоящий синтез обеих теорий, в котором, наравне с квантовой теорией, в полную силу звучала бы теория относительности, остается пока еще делом будущего. Ряд замечательных следствий такого синтеза известен, однако, уже и сейчас.

Роль квантовых эффектов всегда велика, когда масштабы времени и пространства оказываются малыми, характерными для микромира. Так было и в первые мгновения космологического расширения после Большого взрыва – модели, предложенной в 1948 г. русским физиком Г.А. Гамовым [Шкловский, 1980], когда возраст горячей Вселенной составлял малые доли секунды. Согласно этой модели, в результате Большого взрыва, произошедшего около 15 *млрд лет* тому назад, и началось космологическое расширение Вселенной, которое продолжается до настоящего времени. В рамках квантовых представлений, как расширение, так и само течение времени в его истоке, должны быть, по-видимому, не непрерывными, а квантовыми, прерывистыми. Пусть это и не какой-то универсальный «атом времени», но это квантовая мера определенности, с которой мы можем судить о времени в самой ранней Вселенной. Видим, что «точного» нуля времени для Вселенной нет. Нет, собственно, и «точного» нуля размеров. Вселенная начиналась как квантовая система. И квантовые закономерности составляли самое существо ее исходных физических свойств.

Узловые моменты

Казалось бы, какое отношение имеют тяготение, изменяющее темп течения времени, кванты – объекты микромира и вся Вселенная, подчиняющаяся квантовым законам в момент своего зарождения и законам макрофизики в настоящее время, к макропроявлениям геологии, геодинамическим и геофизическим моделям, включая появление жизни, ее эволюцию и социум? Самое непосредственное!

Во-первых, неоднородность течения времени находит свое подтверждение в геологии, геохронологические шкалы которой, по сути, являются «неравномерными». В таком случае палеобиологическое, биохронологическое, радиометрическое, магнитометрическое, палеоклиматическое и другие [Круть, 1978, с. 86-93] времена, с помощью которых датируются хронологические периоды геологического времени, разделяемые стратиграфическими разделительными плоскостями [Флинт, 1978, с. 34-47], также являются неоднородными. Неоднородное течение геологического времени может быть связано, например, с прохождением Земли в составе Солнечной системы в разные геологические эпохи областей Галактики как с разной напряженностью гравитационного поля, так и, в соответствии с принципом Маха, под влиянием разных по величине центробежных сил.

Важность ротационного и космического факторов для геодинамики в настоящее время считается общепризнанным [Вихри, 2004; Ротационные, 2007] и обсуждается в работе [Хаин, Ломизе, 2005, с. 546-553].

В этой связи следует отметить, что история геологии располагает убедительными фактами, необходимыми для познания обратимости и необратимости, цикличности и направленности. Решение этих проблем имеет значение не только для геологии, но и для естествознания в целом. Абсолютная шкала геологического времени оказалась бы очень важной, например, для астрономов, так как существенно прояснила бы вопрос, связанный с галактической орбитой Солнца. О важности союза между геологами и астрономами писал академик Д.В. Наливкин: «Земля является частью Вселенной и поэтому крупные события, происходившие в Солнечной системе и Галактике, влияли на ее развитие и строение. Масштаб геологического времени близок к масштабу Вселенной. Геологи владеют летописью, в которой записаны события истории Земли, а также и Вселенной. Поэтому астрономы иногда обращаются к ним за справками. Жаль, что это бывает нечасто». Проблемы времени в геологии и звездной астрономии во многом идентичны, но, если первую можно решать, ограничиваясь Галактикой, то проблему времени звездных систем следует изучать, поднявшись на более высокую иерархическую ступень [Шпитальная, Заколдаев, Ефимов, 1991].

Во-вторых, последние десятилетия изучение и геологии и геофизики с точки зрения квантовых эффектов становится делом вполне обычным. Интенсивно разрабатываются квантовая геодинамика, квантовая сейсмотектоника, релятивистская геодинамика и другие направления, в основе которых, следует отметить, заложены *вихревые движения* [Вихри, 2004; Ротационные, 2007]. Проблемы нелинейной геологии, их связь с реальными физическими системами и возможность математического описания в пределах длительного временного интервала подробно обсуждается в заключительном разделе монографии Н.В. Короновского [2006, с. 493-513].

В работе [Бембель, Мегеря, Бембель, 2003] основным объектом исследования являются геосолитоны, которые, по мнению авторов, представляют собой «основные» кирпичики не только функциональной системы Земли, но и Вселенной, в целом. При этом, концепция геосолитонов, являясь основой методики, достаточно хорошо работает на практике - обеспечивает высокую надежность при геологоразведке месторождений углеводородов. Как в этой связи не вспомнить слова нобелевского лауреата автора кварковой теории М. Гелл-Мана о квантовой механике, которую мы до конца не понимаем, но на практике научились хорошо использовать!

Более того, проведенный в работе [Викулин, Мелекесцев, 2007] анализ убедительно демонстрирует тесную взаимосвязь между физическими концепциями пространства, времени и движения и протекающими на Земле геодинамическими процессами, с одной стороны, и возникновением жизни – с другой. В рамках такого подхода, фактически, становится возможным объединить описание живых (квантовый биохимический процесс в ДНК, белках и клетках) и неживых (движения геофизических квазичастиц – солитонов) проявлений в рамках единого процесса, который, по сути, является близким квантовому состоянию Вселенной сразу после Большого взрыва.

В-третьих, имеются основания полагать, что вся динамика Солнечной системы, а, значит, и ритм течения геологического времени, определяется ее *моментной структурой*. Действительно.

Ритмы (своеобразные «кванты» времени), кроме отмеченных выше в астрономии и геологии, изучаются также в биологии, социологии, политэкономии и практически во всех остальных науках. Причем интерес к ним растет. «Гармония сфер» была популярна в Древние и Средние века. В Новое время изучение связи «Космос-Земля-Человек» начал в XVIII веке Г. Гершель (влияние активности Солнца на урожайность в Англии и цены на пшеницу). Спустя век, астроном-любитель С. Швабе в 1843 г. объявил об открытии цикла солнечной активности продолжительностью около 11 лет [Ньюкирк, Фрейзиер, 1983], а У.С. Джевонс установил статистическую связь между этим циклом и погодой, сельхозпроизводством и экономическими кризисами [Черкасов, Романовский, 2003]. Влияние солнечной активности на биосферу вообще было установлено А.Л. Чижевским в 1915 г. [Беневоленский, Вознесенский, 1981].

Уникальный широкомасштабный сбор хронологических данных об аномальных явлениях в природе и социуме Сибири и Монголии позволил показать всеобъемлющее влияние солнечной активности на *все* явления (включая социум и крупные импакторы), что происходит на Земле [Леви, Задонина, Бердникова и др., 2003; Задонина, 2007; Задонина, Леви, Язев, 2007]. И, наконец, было показано, что 11-летняя цикличность солнечной активности обусловлена не собственной внутренней динамикой Солнца как звезды, а сложной моментной динамикой всей Солнечной системы. Такая вихревая динамика солнечных пятен, в основном, определяется Юпитером и Сатурном, которые в сумме «обладают» около 90% всего собственного и орбитального моментов Солнечной системы (глава 10, раздел «Новый диалог с Природой»; см. также [Пономарева, 2007]).

В-четвертых. Анализ вариаций количества комет и крупных импакторов (падений крупных космических тел на поверхность Земли) также обнаруживает корреляцию с величиной солнечной активности [Задонина, Леви, Язев, 2007]. Это позволило авторам предложить свою гипотезу, объясняющую феномен такой взаимосвязи. Согласно этой гипотезе, Солнечная система в своем движении вокруг центра Галактики периодически погружается в газопылевые облака (и, добавим, проходит вблизи других звездных систем) и подвергается воздействию распространяющихся в их пределах ударных волн (и, добавим, полей тяготения звездных систем).

Другими словами, гипотеза [Задонина, Леви, Язев, 2007], дополненная нами, позволяет предположить наличие взаимосвязи между солнечной активностью и/или моментной структурой Солнечной системы, с одной стороны, и процессами, протекающими в Галактике – с другой. Тогда становится понятным, почему, согласно учению В.И. Вернадского «жизнь вообще – а человека в особенности – есть явление космическое и что разум человека – мощная космическая сила» [Вернадский, 1991; Русский, 1993].

Резюме

Приведенные данные показывают наличие тесной взаимосвязи между концепциями пространства, времени, энергии и энтропии, с одной стороны, и геологическими процессами, включая жизнь, социум и импакторы, тесно связанными с явлениями в Галактике – с другой.

Таким образом, при построении геологических теорий, геодинамических моделей и их интерпретации необходимо четко осознавать те трудности, которые неявным образом «защиты» в концепции геологического времени – такой, на первый взгляд, очевидной и такой, на самом деле при более детальном рассмотрении, сложной и многоплановой.

Литература

Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р. Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2003. 344 с.

Беневоленский В., Воскресенский А. Почему «исчезает» влияние солнечных пятен? // Наука и жизнь. 1981. № 7. С. 8-9.

Быков Д. Ряд волшебных изменений // GEO. 2005. № 2. С. 62-74.

Вариационные принципы механики. Сборник статей. М.: Физматлит, 1959. 932 с.

Вернадский В.И. Размышления натуралиста. М., 1975.

Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1991. 271 с.

Викулин А.В. Хроника развития естественнонаучных представлений о ротационных и вихревых движениях // Вестник КамчатГТУ. 2007. Вып. 6. С. 64-77.

Викулин А.В., Мелекесцев И.В. Вихри и жизнь // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 39-101.

Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. 297 с.

Гвай И.И. О малоизвестной гипотезе Циолковского. Калуга: Книжное изд-во, 1959. 247 с.

Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра, 1978. 487 с.

Задонина Н.В., Леви К.Г., Язев С.А. Космические опасности геологического и исторического прошлого Земли. Анализ временных рядов. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 77 с.

Земля. Введение в общую геологию. Т. 1 / Дж. Ферхуген, Ф. Тернер, Л. Вейс. К. Вархавтиг, У. Файф. М.: Мир, 1974. 392 с.

Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е. и др. 500-летняя хронология аномальных явлений в Сибири и Монголии. Иркутск: ИГТУ, 2003. 384 с.

Конструкции времени в естествознании: на пути к пониманию феномена времени. Часть I. Междисциплинарное исследование. М.: Изд-во МГУ, 1996.

Короновский Н.В. Общая геология. М.: КДУ, 2006. 528 с.

Круть И. Введение в общую теорию Земли. Уровни организации геосистем. М.: Мысль, 1978. 368 с.

Ньюкирк Г., Фрейзиер К. Цикл солнечной активности // Физика за рубежом. Сборник научно-популярных статей. М.: Мир, 1983. С. 204-234.

Ньютон И. Математические начала натуральной философии. М-Л.: Изд-во АН СССР, 1936. 591 с.

Пономарева О.В. О механизме возмущения периодического движения полюса Земли планетами солнечной системы // Материалы ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 202-213.

Рейхенбах Г. Направление времени. М.: Едиториал УРСС, 2003. 360 с.

Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. 528 с.

Русский гений (Из дневников и писем акад. В.И. Вернадского) // Наука и жизнь. 1993. № 6. С. 2-5.

Симаков К.В. Введение в теорию геологического времени. Становление. Эволюция. Перспективы. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 1999. 556 с.

Тимашев С.Ф. О базовых принципах «нового диалога с природой» // Проблемы геофизики XXI века: в 2 кн. Кн. 1. / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003. С. 104-141.

Уиллер Дж. Квант и Вселенная // Астрофизика, кванты и теория относительности. М.: Мир, 1982. С. 535-558.

Флинт Р. История Земли. М.: Прогресс, 1978. 358 с.

Черкасов Р.Ф., Романовский Н.П. Ритмы природные – ритмы социальные // Геологические этюды. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. С. 85-91.

Чернин А.Д. Физическая концепция времени от Ньютона до наших дней // Природа. 1987. № 8. С. 27-37.

Хаин В.Е. Вторая молодость древней науки // Природа. 1987. № 1. С. 20-35.

15. ХРОНИКА РАЗВИТИЯ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О РОТАЦИОННЫХ И ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЯХ

[Викулин, 2007, 2008, с. 8-61]

Общий обзор

«В мире нет ничего, кроме эфира и его вихрей».
Р. Декарт. Начала философии. 1644 г.

Древний период

20 тыс. лет назад. Эпоха неолита. Для поимки зверей человеком изобретены ловушки, использующие потенциальную энергию упругих элементов (ветви, целые деревья). Дальнейшее усовершенствование автоматических охотничьих устройств происходило по пути увеличения накапливаемой энергии и уменьшения их размеров и веса, для чего использовались *скрученные сухожилия животных, лианы, лыко и др.* Создавались и «крупнокалиберные» *крутильные* ловушки, предназначенные для добычи крупных хищников [Исаков, 2004а, с. 22-28; Липс. 1999].

С очень большой долей вероятности можно считать, что, используя ловушки, человек перенес принцип *накопления* потенциальной энергии и ее преобразования в кинетическую энергию *на создание разнообразных метательных орудий*. В неолите, не владея, разумеется, математической формой этого фундаментального закона, человек, по сути, интуитивно реализовал его на практике.

8–6 тыс. лет до н. э. Ранний неолит. С появлением коловорота человек научился делать отверстия в кости и камне: *механический момент* обеспечивался оригинальной формой деревянного стержня с приспособлением для прижима рабочего микролита (резца) из кремня. *На смену вращательному движению* достаточно быстро пришло поступательно-вращательное движение с маховиком для «накопления» кинетической энергии вращательного движения и элементами автоматизации процесса. В результате опять же интуитивно изобретен способ добывания огня путем трения вращения [Исаков, 2004а, с. 23-24]. Именно с появлением искусственных («*крутильных*») *источников огня* многие исследователи и связывают *начало истории человечества* [Техника, 1979].

5 тыс. лет до н. э. В Месопотамии появился гномон – солнечные часы, которые считаются первым астрономическим инструментом [Флота, Новы, 1987]. Практически одновременно с солнечными часами были изобретены водяные, представляющие собой прозрачные сосуды с нанесенными на них временными метками. Интересно отметить, что при цилиндрической форме сосуда метки были нанесены не равномерно, а с учетом изменения гидростатического давления, определяемого высотой столба жидкости по формуле, полученной несколько тысячелетий спустя Э. Торричелли (1608–1647) [Исаков, 2004а, с. 84].

4 тыс. лет до н. э. Первые зафиксированные наблюдения за движением Солнца на фоне звездного неба [Павленко, 2005, с. 115]. На Древнем Востоке изобретено колесо в виде деревянного диска [Советский, 1985, с. 600].

35 в. до н. э. Изобретение гончарного круга, что фактически означало практическое овладение свойством трения качения [Боголюбов, 1983, с. 555].

3 тыс. лет до н. э. Шумерские астрономы определили начало нового года – день весеннего противостояния – по вступлению Солнца в созвездие Тельца [Павленко, 2005, с.

115]. Шумер – древняя страна в Южном Двуречье (ныне юг современного Ирака) [Советский, 1985, с. 1520].

Из древнекитайских летописей узнаем, что они содержали, в том числе и астрономические сведения: начиная с 2296 г. до н. э. древние ученые наблюдают и описывают кометы [Флота, Новы, 1987]. В 2137 г. до н. э. астрономы Поднебесной научились вычислять периоды затмения Солнца и Луны. Именно из этих наблюдений стало известно появление в 1301, 1145, 1066, 989 гг. до н. э. кометы, которая много позже была названа именем Галлея. Китайским астрономам первым удалось описать вспышку сверхновой звезды в созвездии Тельца в 1054 г. [Исаков, 2004а, с. 196-197].

2 тыс. лет до н. э. В Ассирии появилось колесо со спицами и гнутым ободом. Такое изобретение значительно уменьшило момент инерции колеса и тем самым существенно повысило быстроходные качества повозок, в частности колесниц, использовавшихся для военных действий в армии. Все это и предопределило «спецификацию» Ассирийского государства на ближайшие столетия, т.е. его «милитаризацию», проведение активных военных действий [Советский, 1985, с. 600].

Эллада, древние Китай и Индия

7 в. до н. э. В Китае активно начали развиваться физические учения (науки), что впоследствии позволило ему стать одним из двух научных центров мировой цивилизации. Эти два центра – Древний Китай и античная Греция – существовали практически в одно и то же время, развивались независимо друг от друга и без взаимного общения. Полученные ими научные результаты и найденные оригинальные инженерные решения являются одинаково выдающимися [Исаков, 2004а, с. 200-231].

Это поразительно, но это – факт.

7-6 вв. до н.э. *Фалес Милетский* (625-547 до н.э.) – первый из семи мудрецов при афинском архонте Дамасии, родоначальник ионийской (древнегреческой) философии. Учителей он не имел, если не считать, что ездил в Египет и жил там, у мудрецов [Диоген, 1979, с. 69-71]. Основатель Милетской философской школы, первый, как говорят, стал вести беседы о природе. Поставил вопрос о необходимости сведения всего многообразия явлений и вещей к *единой основе* (первостихии или первоначалу), которой он считал воду («влажную природу»). По Фалесу идея праматерии тесно связана с концепцией сохранения самой материи » [Ацюковский, 2003, с. 48].

С Фалеса принято отсчитывать начало истории метафизики, создаваемой на основе умозрительного метода [Исаков, 2004б, с. 45-47].

Анаксимандр (610-546 до н.э.), ученик Фалеса Милетского, автор первого философского сочинения на греческом языке «О природе». Создал геоцентрическую модель космоса, первый нарисовал очертания земли и моря – создал первую географическую карту и, кроме того, соорудил небесный глобус. Высказал мысль о происхождении человека «от животных другого вида» (рыб) [Советский, 1985, с. 53]. Ввел понятие первоначала – апейрона или эфира [Ацюковский, 2003, с. 48-50].

Апейрон порождает враждующие стихии – «холодное» и «горячее», т.е. огонь и воду. Противоборство воды и огня образовало мировой вихрь, ставший причиной появления всех веществ и тел. В мировом центре вихря оказалось «холодное», т.е. Земля, окруженная водой и воздухом, а снаружи – небесный огонь. Под действием огня верхние слои газовой оболочки превратились в твердую корку. Эта корка стала раздуваться парами кипящего земного океана, потом лопнула, оттеснив огонь от нашего мира. Так, по Анаксимандру, возникла сфера неподвижных звезд, а звезды были отверстиями в оболочке, через которые вырвался пар земного океана. ... Живые организмы появились из

воды и теплого ила и «были рождены во влаге, заключенной вовнутрь илистой скорлупы». Анаксимандр считал Вселенную живым существом, которое имеет свой срок жизни. Вселенная время от времени погибает и тут же возрождается снова. ... И никаких богов, все само по себе, естественным порядком вещей и событий [Исаков, 2004б, с. 47-49].

6-5 вв. до н.э. «Гераклит (ок. 535-475 до н.э.) заметил, что ночное движение звезд можно объяснить не только обращением небес вокруг Земли, но и вращением Земли вокруг ее оси при неподвижных звездах» [Хаин, Полетаев, 2007, с. 15].

5-4 вв. до н. э. Анаксагор (5 в. до н.э.) считал, что покоящаяся смесь семян заполняло все бесконечное пространство до момента образования стремительного вихря вследствие вмешательства организующего начала, которое содержит все знания обо всем и имеет величайшую силу. Дальнейшее развитие Вселенной Анаксагор представлял так: «Это вращение началось с малого, а сейчас оно охватывает больше пространства, а в будущем охватит еще больше...». По Анаксагору, быстрое вихревое вращение привело к тому, что в центре образовалась круглая плоская твердь – Земля, а более легкие фракции были отброшены наружу, став впоследствии воздухом. Постепенно движение уходило от центра вихря, Земля остановилась, а все остальное образование продолжало свое вращение и в какой-то момент наклонилось. Вселенную Анаксагор представлял в виде непрерывно расширяющегося пузыря с неподвижной, плоской, дискообразной Землей посередине. Вокруг Земли кружится эфирный вихрь, несущий Солнце – раскаленную металлическую или каменную глыбу. За богомерзскую «модель Солнца» в Афинах Анаксагора приговорили к смерти и выгнали из Афин [Исаков, 2004б, с. 49-50].

Левкипп (ок. 500-440 до н.э.) итальянский философ, один из создателей античной атомистики [Советский, 1985, с. 693], выдвинул идеи «первоначала» и пустоты, разделяющей все сущее на множество элементов, свойства которых зависят от их величины и формы движения [Ацюковский, 2003, с. 49]. Ввел в оборот науки три новых понятия: 1) абсолютной пустоты, 2) атомов, движущихся в этой пустоте, и 3) понятие механической необходимости. Первый установил как закон причинности, так и закон достаточного основания: «Ни одна вещь не возникает беспричинно, но все возникает на каком-нибудь основании и в силу необходимости» [Философский, 1975, с. 202].

Мнение его было, что Вселенная беспредельна, что все в ней переменяется одно в другое, что она есть пустота и полнота. Миры возникают тогда, когда тела впадают в пустоту и прилегают друг к другу; и от движения их по мере их возрастания возникает природа светил. Солнце движется по большому кругу, чем луна; земля держится в самой середине вихря, а видом она, как бубен. Это он первый принял атомы за начала. Таковы основы его учения [Диоген, 1979, с. 368].

Возникновение миров, по мнению Левкиппа, происходит следующим образом. Из беспредельности определяется и несется в великую пустоту множество разнообразных тел; скапливаясь, они образуют единый вихрь, а в нем, сталкиваясь друг с другом и всячески кружась, разделяются по взаимному сходству [Диоген, 1979, с. 368-369].

Сведения о возникновении атомной концепции носят противоречивый характер. Некоторые исследователи утверждают, что свое начало атомистика ведет от истоков китайской цивилизации, однако точно не установлено, было ли знакомо китайцам собственно атомное учение. И, тем не менее, весьма вероятно, что обоснование своих представлений о сущности мира они разработали учение об элементах. Согласно [Mabilleau, 1895], попытки обнаружить начало атомистики в Китае, Финикии, Персии и в том же Египте не представляет никакого интереса, поскольку у этих народов не было вполне обособленных философских систем. Только в Индии физика и метафизика могли получить развитие независимо от религиозной догматики. И именно здесь учение об элементах появляется в различных системах, из которых самая известная – это система Санкхьян [Martinetti, 1897; Чаттерджи, Датта, 1955]. В этой системе эфир рассматривался как вещество, составляющее основу вещей [Джуа, 1966, с. 23].

Эмпедокл (ок. 490-430 до н.э.) - итальянский философ. Учение Эмпедокла об элементах не связано с атомизмом и восходит к космогонии [Джуа, 1966, с. 22].

Демокрит из Абдери (ок 470 или 468 – ок. 370). По Демокриту существуют только атомы и пустота. Атомы - неделимые элементы материи, вечные, неразрушимые, непроницаемые; различаются формой, положением в пустоте, величиной; движутся в различных направлениях; из их «вихря» образуются как отдельные тела, так и все бесконечные миры; невидимы для человека [Советский, 1985, с. 373]. Обсуждая проблему бесконечного, Демокрит разрабатывал *учение о движении* [Боголюбов, 1983, с. 556] – как о «вихрях», создающих наблюдаемое разнообразие Природы [Савенко, 2004, с. 7].

Мнения Демокрита следующие. Начала Вселенной суть атомы и пустота, все остальное лишь считается существующим. Миры бесконечны и подвержены возникновению и разрушению. Ничто не возникает из существующего, и ничто не разрушается в несуществующее. Атомы тоже бесконечны по величине и количеству, они вихрем несутся во Вселенной и этим порождают все сложное – огонь, воду, воздух, землю, ибо все они суть соединения каких-то атомов, которые не подвержены воздействиям и неизменны в силу своей твердости. Солнце и луна состоят из таких же телец, гладких и круглых, точно так же, как и душа; а душа и ум – одно и то же. Все возникает по неизбежности: причина всякого возникновения – вихрь, и этот вихрь он называет неизбежностью. Платон, упоминая всех древних философов, Демокрита не упоминает нигде, даже там, где надо было бы возражать ему; ясно, что он понимал: спорить ему предстояло с лучшим из философов [Диоген, 1979, с. 372-373].

Демокрит перенес на атомы все свойства, которые элеаты приписывали бытию [Zeller, 1882]. Для Демокрита все атомы подобны, неделимы, несжимаемы, не имеют начала и конца [Джуа, 1966, с. 24, 29].

Одна из отличительных сторон атомистической системы Демокрита состоит в допущении существования пустоты. Как следствие отсюда вытекает понятие о непрерывности материи. Другой важной стороной этой системы является отстаивание принципа причинности. Как справедливо утверждает в [Milhaud, 1900], «из всех физиков древности Демокрит, по-видимому, наиболее твердо отстаивает обусловленность результатов причинами». Виндельбанд (Windelband), считавший Демокрита одним из основателей величайших философских систем, так объясняет исчезновение его школы: «Чисто теоретический подход к науке, которого придерживался Демокрит, не мог приобрести симпатии у его современников; его школа после него вскоре исчезла» [Джуа, 1966, с. 24].

Атомы Демокрита – *не разрезаемые*, существующие вечно материальные образования. Атомы различаются формой, порядком следования и положением в пустом пространстве, а также величиной, зависящей от тяжести. Они имеют впадины и выпуклости. Из их «вихрей» путем естественного сближения образуется весь мир. Но сами атомы состоят из а'меров, истинно неделимых частиц [Ацюковский, 2003, с. 49, 244].

Концепция современного естествознания полагает, что «у Демокрита мы сталкиваемся с двумя пространствами: *непрерывным физическим* пространством какместилищем материи, в целом, и *дискретным* пространством как масштабной единицей протяженности единицы материи – атома» [Тулинов, 2004, с.59].

Демокрит прожил более 100 лет, причем все годы его зрелой жизни были наполнены научными поисками истины. Самым главным вопросом для себя он считал вопрос о глобальном устройстве мира [Исаков, 2004б, с. 52].

Согласно [Ацюковский, 2003, с. 244], В.И. Ленин высоко ценил материализм Демокрита, обозначив его именем материалистическую традицию в истории философии («линия Демокрита»).

470-388 гг. до н.э. Философ *Филолай из Кротона* в книге «О природе», где излагалось учение Пифагора о Вселенной, привел взгляды некоего *Экфанта*: «... Земля

движется, но не поступательно, а вращаясь вокруг своей оси, подобно колесу, с запада на восток» [Хаин, Полетаев, 2007, с. 21].

Платон (428/427–347 лет до н. э.) – ученик Сократа – поставил задачу о создании модели Вселенной, которую решил Евдокс Книдский (ок. 408 – ок. 355 лет до н. э.), сконструировав модель Солнечной системы из 27 концентрических сфер, в центре которых была Земля [Боголюбов, 1983, с. 380].

В книге Платона «Тимэй» (середина 4 в. до н.э.) излагается физическое учение о теплороде и о механике фазовых превращений, которое продолжало служить в различных вариантах почти до середины XIX в. [Дорфман, 2007а, с. 49, 83].

Платон – ярчайшая звезда на научном небосклоне, он явился создателем академии, которая просуществовала более 1000 лет, до 529 г. н.э. [Исаков, 2004б, с. 54].

Аристарх Самосский (кон. 4 в. – 1-я пол. 3 в. до н.э.) др. греческий астроном, «Коперник древнего мира» (Ф. Энгельс). Первым высказал идею гелиоцентризма, утверждал, что Земля движется вокруг неподвижного Солнца, находящегося в центре сферы неподвижных звезд [Советский, 1985, с. 74]. За это он был немедленно обвинен в безбожии, и подвергнут остракизму [Хаин, Полетаев, 2007, с. 15].

Аристотель (384–322 лет до н. э.) - ученик Платона, «учитель учителей» [Лункевич, 1960а] и воспитатель Александра Македонского. Оказал значительное влияние на все дальнейшее развитие научной и философской мысли. Сочинения относятся ко всем областям знания того времени. Собрал и систематизировал огромный естественнонаучный материал своих предшественников, критически его оценил, исходя из своих философских взглядов, и сам осуществил ряд глубоких наблюдений. Взгляды на мир изложил в своей космологии, господствовавшей в науке до Н. Коперника [Храмов, 1983, с. 18-19].

По мнению Аристотеля, каждое тело совершающее «естественное» движение, стремится к «естественному» месту. Кроме того, есть «насильственные» движения, обусловленные некоторым внешним действием. Источником обоих видов движения считал силу; наиболее совершенным движением признавал круговое. Вращательное движение небесных сфер, по Аристотелю, является вечным, но оно предполагает действие некоего перводвигателя. Аристотель пользовался понятиями скорости и сопротивлением среды [Боголюбов, 1983, с. 21-22].

Считал, что внутренние движущие силы вещей неотделимы от них. Источником движения и изменчивого бытия считал вечный и неподвижный ум - перводвигатель. Различал следующие ступени природы: неорганический мир, растение, животное, человек. Полагал, что «ум», разум отличает человека от животного; человек – существо общественное [Советский, 1985, с. 75].

Аристотель об атомах Демокрита: «Атомы не имеют ни начала, ни конца, потому что первоначальные элементы вещей не могут произойти от другого элемента и ничто не может закончиться ничем. Они...неделимы, потому что разделение или сложения возможны только там, где бытие и наполненность отделены от небытия и пустоты. По тем же соображениям атомы не подвергаются никаким изменениям, относящимся к их внутреннему состоянию и их конституции. В общем, атомы по сравнению с веществом абсолютно просты и подобны друг другу» [Джуа, 1966, с. 29; Zeller, 1882].

Аристотель больше уделял анализу существования времени, затем трансформировал его в вопрос о существовании *делимого* времени. Наконец, уделяя основное внимание взаимосвязи времени и движения, он показал, что время немыслимо, не существует без движения. Аристотель не отрывал время от процессов, происходящих в реальных телах [Тулинов, 2004, с. 60].

В связи с греческой атомистикой и представлениями Эмпедокла (V в. до н.э.) и Аристотеля об элементах встает вопрос: почему возникновение таких понятий не привело к углублению химических знаний о веществе? Ответ на это вопрос заключается в том, что эти понятия не легли в основу химических представлений, так как носили слишком

абстрактный характер вследствие метафизического подхода, противоречащего научному истолкованию действительности [Джуа, 1966, с. 22].

Александр Македонский способствовал открытию в Афинах знаменитого Лицея (Ликей), в котором Аристотель реализовал свои замыслы по воспитанию философов-естествоиспытателей. Аристотелем была поддержана геоцентрическая система мира, центром которой являлась Земля, а планеты вращались вокруг нее. Аристотеля часто называют человеком, остановившим Землю. Впервые эта модель была предложена Аполлонием Пергским в III-II вв. до н.э. [Исаков, 2004б, с. 56-57].

Огромное влияние воззрений Аристотеля на развитие механики продолжается вплоть до середины XVII в. [Дорфман, 2007а, с. 83].

Эпикур (341-270 до н.э.) из Самоса основал в Афинах общину, которая на основе гедонистического принципа развила атомистическую систему, в известной мере представляющую собой, однако, лишь ухудшенную материалистическую систему Демокрита. Как Демокрит, так и Эпикур считали, что основой каждой вещи является атом, который «сам по себе по особым и вечным законам не подвержен никакому действию времени, неуничтожаем, недоступен чувствам, а потому не обладает ни одним известным свойством материи, проявляемым в телах; он постоянно в движении, постоянно побуждаем скрытой возможностью, которая высвобождается из недр и удерживает его в механических группах [Ахманов, 1947].

Эпикур положил в основу своих выводов бесконечность Вселенной и непрерывность материи, он принял существование пустоты и движения атомов, обладающих некоторыми общими свойствами материи, такими, как величина, форма и весомость. Очень спорным пунктом теории Эпикура является так называемая теория отклонения (*clinamen*), введенная для объяснения первоначала движения атомов. Согласно Эпикуру, их движение тесно связано с двумя внутренними причинами: весомостью и отклонением, по последнее – понятие совершенно абстрактное [Ахманов, 1947; Джуа, 1966, с. 24-25, 29].

В соответствии с концепцией современного естествознания Эпикуром была разработана атомистическая концепция пространства Демокрита. Он исходил из дискретного характера пространства и времени. Рассматривая равномерное движение, Эпикур считал, что в процессе перемещения атомы проходят один «атом» пространства за один «атом» времени [Тулинов, 2004, с. 59].

Учение Эпикура не сохранилось. В I в. до н.э. римский поэт Лукреций Кар (99 – 55 гг. до н.э.) написал знаменитую дидактическую поэму «О природе вещей», полностью сохранившуюся, в которой в поэтической форме изложено стройное учение Эпикура.

Приписав атомам необходимость падения, т.е. движения, и введя к тому же принцип спонтанных отклонений, Эпикур создал предпосылки для возникновения беспорядочного движения атомов. Лукреций не только подробно описал эту гипотезу, но, следуя соображениям Демокрита и Эпикура, связал это движение невидимых атомов с беспорядочным видимым движением взвешенных в воздухе пылинок. Как мы теперь знаем, видимое движение пылинок в солнечном луче обусловлено конвекционными вихревыми потоками, вызываемыми в воздухе солнечным теплом.

Как мы видим, атомное учение Левкиппа – Демокрита – Эпикура обосновано стройной цепью умозаключений, которое вплоть до XX в. сохраняло свое значение в физике. Однако остается открытым вопрос: каков был эвристический путь авторов атомизма? [Дорфман, 2007а, с. 41, 48-49, 83].

С одной стороны, именно античная физика поставила многие фундаментальные физические проблемы, которые затем изучались и дискутировались наукой на протяжении многих веков. С другой стороны, разработанные Античностью конкретные физические учения, оказались необыкновенно живучими и непосредственно влияли на все дальнейшее развитие физики [Дорфман, 2007а, с. 83].

Как видим, *идеи атомарного мира, вихревых движений и эфира* возникли в

античности одновременно как единая, по сути, концепция, являющаяся основой *диалектического метода познания окружающего нас мира*.

450-250 гг. до н.э. Китайскими философами впервые введено понятие силы, известна им была и сила тяжести, а также идея прямолинейности движения. Китайский поэт-ученый *Цзя* (200-168 до н.э.) в аллегорической стихотворной манере, фактически, изложил третий закон Ньютона (1642-1727). Поразительных успехов китайские ученые и инженеры добились и в области изучения магнетизма (сконструирован компас), медицины и техники. Они постигли многие тонкости аэродинамики полета, их змеи могли бы поднять в небо и быка, но этого не произошло, как не произошло и практического применения открытого китайцами пороха.

Это поразительно, но это - факт.

Один из основоположников европейской философии *Фрэнсис Бэкон* (1561-1626), подчеркивая исключительную значимость Китая для мировой цивилизации, сказал: «Три изобретения – бумага и книгопечатание, порох и магнитный компас – сделали больше, чем все религии, астрологические предсказания и успехи завоевателей, ибо благодаря им общество трансформировалось и полностью отошло от античности и средневековья» [Исаков, 2004а, с. 201-211; Исаков, 2005, с. 88].

4 в. до н.э. Некоторые исследователи полагают, что истоки алхимии следует искать в Китае этого периода, так как древнекитайская культура была единственной средой, где могла зародиться вера в эликсир бессмертия – высшее достижение алхимии. Две концепции – эликсира и алхимического изготовления золота – впервые объединились в Китае в 4 в. до н.э. Алхимия на Запад была завезена китайскими путешественниками. Некоторые исследователи считают, что в Индии соотношение золота и бессмертия было известно еще в 6 в. до н.э. [Эллиаде, 2002, с. 363-364].

318 г. до н.э. Император *Сюань* основал первую в Китае *академию*, где на *постоянной платной основе* работали крупнейшие мыслители того времени со своими учениками их *разных* школ [Исаков, 2004а, с. 201].

Именно в эту эпоху в Китае развивались первые физические учения [Дорфман, 2007а, с. 21].

Зарождение важнейших философских учений почти одновременно в столь удаленных географически друг от друга и столь различных по своему этническому составу странах, как Китай и Эллада, обращало на себя внимание уже сравнительно давно, но многие подробности этого поразительного факта стали известны лишь во второй половине XX века. Вряд ли можно сколько-нибудь сомневаться в том, что зарождение китайской физики было самобытным историческим явлением. Главным противником развития в Древнем Китае естествознания вообще и физики в особенности явилось философское направление *Кун-цзы* (*Конфуций*, 551 - 479 гг. до н.э.), которое впоследствии стало фундаментом официальной идеологии императорского Китая [Энциклопедия, 2007, с. 89]. И нежное растение китайской физической науки достаточно быстро засохло окончательно. В Китае эта стадия просуществовала до XX века [Дорфман, 2007а, с. 28-29].

3 в. до н.э. *Евклидом* (365-300 до н.э.) создана математическая теория пространства – *Евклидова геометрия*, которая в дальнейшем была широко использована многими поколениями ученых при построении физических картин мира [Тулинов, 2004, с. 60; Храмов, 1983, с. 109-110]. *Евклидом* написано тринадцать томов только по геометрии, ставших более чем на двадцать веков, вплоть до появления трудов *Лобачевского* и *Римана*, незыблемыми геометрическими канонами [Исаков, 2004б, с. 59].

3-2 вв. до н. э. *Архимед* (ок. 287–212 до н. э.) изобрел винт для подачи воды, получивший впоследствии его имя [Боголюбов, 1983, с. 25-26, 557].

1 в. до н. э. В Древнем Китае широкое распространение получил цепной насос, представлявший собой замкнутую цепь с прямоугольными деревянными лопатками, которые захватывали воду и сыпучие материалы [Исаков, 2004а, с. 218].

Эратосфен Киренский (ок. 276-194 до н.э.) - древнегреческий ученый заложил

основы математической географии, впервые измерил дугу меридиана [Советский, 1985, с. 1549] и определил радиус Земли [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 13].

2 в. до н. э. *Гиппарх из Никеи* ((190)180–125 лет до н. э.) в сочинении «Альмагест» создал теорию движения Луны, составил таблицы движения Солнца и Луны; применил эксцентрические круги и эпициклы для объяснения движения Солнца, Луны и планет [Боголюбов, 1983, с. 134; Хаин, Полетаев, 2007, с. 15].

Начало н.э. Древнегреческий географ и историк, автор 17-томной «Географии», являвшейся итогом географических знаний античности, *Страбон* (63/64 до н.э.-23/24 н.э.) полагал, что вращение Земли должно привести к экваториальному вздутию ее фигуры [Кондратьев, 2003, с. 15; Советский, 1985, с. 1272].

2 в. н.э. В окончательном виде *геоцентрическая система мира* с Землей в центре была развита Клавдием Птолемеем (100–178 гг.), который, исходя из шарообразности Земли и следуя Гиппарху из Никеи, применил эксцентрические круги и эпициклы для объяснения движения Солнца, Луны и планет [Боголюбов, 1983, с. 393-394; Храмов, 1983, с. 162].

Средние века

3 – 9 вв. Об атомистике средних веков можно найти сведения в работах отцов церкви и других средневековых авторов из стран, принявших христианство [Lasswitz, 1890]. Содержащиеся в этих источниках намеки, хотя и не имеют значения для атомистического учения, тем не менее показывают, что греко-восточные представления прослеживаются в произведениях писателей, не находившихся под влиянием арабской культуры [Джуа, 1966, с. 40].

7 – 14 вв. Алхимический период: греко-египетская, арабская и западная алхимии [Джуа, 1966, с. 31-57].

Центр тяжести системы Демокрита сосредотачивается главным образом на метафизической стороне проблемы атомизма; это снижает интерес к ней для истории химии, однако этот факт, что идеи Демокрита пользовались большим успехом в алхимический период [Корр, 1869; Lippmann, 1919; Stillman, 1960], заставляет обратить внимание на его труды. В учении Демокрита нет никаких указаний на природу соединений между различными веществами. Понятие о соединении в то время было сужено до понятия о превращении, т.е. ограничивалось исключительно качественной стороной проблемы. Поэтому не следует удивляться тому, что Демокрит перенес на атомы все свойства, которые элеаты приписывали бытию [Джуа, 1966, с. 24].

Не подлежит сомнению, что арабы познакомились с греческой атомистикой через египтян. Бертло [Berthelot, 1885] доказал, что в Египте долгое время существовала Абдерская школа, которая сохранила, может быть, видоизменив, традиции школы Демокрита.

Арабская атомистика, так же как и греческая, основывалась на предположении, что каждое материальное тело состоит из частиц или неделимых атомов, не имеющих величины, подобно маленьким точкам; только путем их соединения образуются материальные тела [Джуа, 1966, с. 40].

8-9 вв. Быстро, в течение всего 200 лет, таинственным образом исчезает могущественная, существовавшая не менее чем два тысячелетия, цивилизация Майя. Многие десятки тысяч (до 10 млн?) людей просто исчезли, оставив после себя развитые города.

Данных очень мало, но известно, что цивилизация была достаточно развитой, имела великолепное искусство и архитектуру, хорошее знание астрономии. Например, за 1000 лет до Коперника – Кеплера – Галилея, астрономами Майи были определены радиусы планет солнечной системы. Версий крушения цивилизации много. По одной из них (гипотеза самоуничтожения), причиной исчезновения цивилизации явился политический кризис. В результате рухнула система божественных царей и могущественных держав, была развязана война, которая за сто лет проникла во все уголки цивилизации и уничтожила ее.

В настоящее время в Центральной Америке проживает около 3 млн прямых потомков Майя.

Около 1000 г., за семь столетий до применения маятника для определения силы тяжести и фигуры Земли, арабский астроном *Ибн Юнус* (Али ибн Абд Рахман, 950-1009) измерил время с помощью маятника. Результаты его астрономических наблюдений были использованы спустя восемь веков как доказательство изменений эксцентриситета земной орбиты.

1150 г. Из-под пера настоятельницы Дзибоденбергского монастыря вышел в свет первый европейский трактат «Физика». В четырех книгах содержались сведения по механике, ботанике и зоологии [Исаков, 2004б, с. 77].

Конец 10 – начало 11 вв. *Ибн Сина* (Авиценна, 16.05.980-18.06.1037), продолжая учение Аристотеля, разрабатывал понятие движения, считал, что сила, приданная движущемуся телу, не исчезает, и если бы не было сопротивления движению, то оно длилось бы бесконечно. Вслед за Аристотелем, *Ибн Сина* считался в средневековой науке одним из главных авторитетов [Боголюбов, 1983, с. 192-193, 559].

В то же время в Европе церковные догмы почти окончательно загубили «научные ростки».

12–13 вв. В Европе появляются и распространяются ветряные мельницы – второй после водяных мельниц важный источник механической энергии [Боголюбов, 1983, с. 559].

Появление первых университетов в Европе: в Болонье (1158), в Монпелье (1180), в Париже (1200 или 1215), в Виченце (1205), в Оксфорде (1209), в Саламанке (1218), в Падуе (1222), в Неаполе (1224), в Тулузе (1229) и Кембридже (1209 или 1229) [Арутюнов, Стрекова, 2003; Дорфман, 2007а, с. 85; Грицак, 2006; Платэ, 1999].

Идея генезиса веществ, высказанная Р. Бэконом (1214-1292), является фактически попыткой синтеза сложного из простого [Ацюковский, 2003, с. 97]. Таким образом, и на этом этапе развития представлений о структуре материи сложные вещества подразумеваются состоящими из простых, обладающих минимумом качеств [Эйнштейн, 1965, с. 138-164].

13–14 вв. В Европе появляются первые отдельные сторонники атомизма. Так, например, известно [Джуа, 1966, с. 79], что живший в 1348 г. в Париже *Никола де Отрекур* (из *Отрекура*) учил, что «в явлениях природы нет ничего иного, кроме движения атомов, которые соединяются и разъединяются».

14 в. «Непобедимый доктор» Оксфордского университета *Уильям Оккам* (1270–1347) [Дорфман, 2007а, с. 101] поставил проблему движителя, отказавшись от динамической теории Аристотеля. Считал возможным вращательное движение Земли. Изложил методологический принцип научного исследования («брита Оккама»), отрицающий очевидность всего, что неизвестно само по себе, не доказано опытом или основано на авторитете [Боголюбов, 1983, с. 356, 559].

В Средние века невозможно было заниматься физикой, не затрагивая богословских проблем, и ректор Парижского университета *Жан Буридан* (1300-1358) тем более не мог пройти мимо них. Открыв, что *impetus* вращательного движения имеет «перманентный характер», Буридан обратил свое внимание на проблему вращения небесных сфер, относительно которых христианскими толкователями Аристотеля утверждалось, что их

непрерывно вращают особые «души», или «ангелы», именовавшиеся «разумами». Без них вращение небес должно было остановиться [Дорфман, 2007а, с. 105].

15 в. Один из крупнейших представителей неоплатонизма был немецкий кардинал *Николай Кребс*, прозванный *Кузанским* (1401-1464), составил пространный трактат об атомизме. Он первым указал на относительность понятия атома.

Но тем мыслителем, который детально развивал атомистику, был Джордано Бруно (1548-1600); нельзя не признать, что его вклад был действительно важен. Согласно Бруно, все тела состоят из неизменяемых и непроницаемых атомов, которые он называет также малостями или монадами. Весь телесный мир есть результат соединения этих первичных элементов. Между атомами может иметь место смешение, но не в схоластическом смысле, что Бруно отрицал, а в смысле физическом, т.е. явление, сводящееся к соединению и разъединению этих конечных частичек [Джуа, 1966, с. 79].

Эпоха Возрождения

1501 г. В Риме были изданы труды *Николая Кузанского*, которые оказали влияние на формирование революционных взглядов Коперника и его последователей. Кузанский первым в Европе высказал идею о бесконечности, в которой количественное расширение качеств, приводит к исчезновению различий между ними. Впервые появилась идея о движении Земли вокруг некоего мирового центра. Есть основания полагать, что Кузанский еще до Галилея ставил опыты с падением тел [Исаков, 2004б, с. 77].

Конец 15 – начало 16 вв. Работами *Н. Коперника* (1473–1543), *И. Кеплера* (1571–1630) и *Г. Галилея* (1564–1642) – «последнего из могикиан эпохи Возрождения» – была построена новая *гелиоцентрическая модель Солнечной системы* с Солнцем в центре, которая оказалась более удобной по сравнению с геоцентрической моделью. В определенном смысле еще дальше пошел *Леонардо да Винчи* (1452–1519), который «не считал Землю центром не только мира, но и Солнечной системы» [Лункевич, 1960а, с. 243-244].

В. Гарвей (1578–1657) создал учение о кровообращении – работе сердца и циркуляции крови «от сердца к сердцу» [Лункевич, 1960а, с. 330-331].

1543 г. Вышел в свет труд Н. Коперника «Об обращении небесных сфер», в котором изложена гелиоцентрическая система.

16 в. Наиболее заметные технические изобретения: гидравлическое колесо (1526), пресс для чеканки монет – прообраз печатного прессы (1530), гидравлические насосы в рудниках (1531), первые плотины (1570), станок для изготовления лент (1579), вязальная машина для изготовления чулок (1589) [Дорфман, 2007а, с. 114].

1592–1610 гг. *Г. Галилей* заложил основы динамики: исследовал свободное падение тел, падение тел по наклонной плоскости, движение тел, брошенных под углом к горизонту. Он сконструировал телескоп (1609) и приступил к систематическому наблюдению над планетами и звездами [Храмов, 1983, с. 71-72].

1600 г. Сожжен на костре *Джордано Бруно* (1548–1600) – «великий мученик науки» [Лункевич, 1960а, с. 314].

1609–1619 гг. *И. Кеплер* (1571–1630) выводит три закона движения планет.

1632–1638 гг. *Г. Галилеем* сначала опубликована книга «Диалог о двух главнейших системах мира», в которой в условиях инквизиции очень тонко обсуждается вопрос о взаимоотношении геоцентрической и гелиоцентрической систем: молчать уже нельзя, но и говорить на эту тему страшно. Затем им предложен и обоснован принцип относительности движения и заложены основы учения о сопротивлении материалов.

А. Эйнштейн писал о Г. Галилее: «Перед нами предстает человек незаурядной воли, ума и мужества, способный в мышлении выстоять против тех, кто, опираясь на невежество народа и праздность учителей в церковных облачениях и университетских мантиях, пытается упрочить и защитить свое положение» [Исаков, 2004б, с. 130].

Первая половина 17 в. Гассенди Пьер (22.06.1592-24.10.1655) считал, что все явления природы происходят в пространстве и времени, но они могут быть измерены лишь в связи с телами: пространство измеряется их объемом, время – их движением. Вслед за Демокритом полагал, что тела состоят из множества мельчайших атомов – неделимых (не разрезаемых [Ацюковский, 2003, с. 244]), но измеримых; атомы разделены пустым пространством [Храмов, 1983, с. 75]. Он написал специальную книгу об атомизме. Учитывая специфику времени, это был довольно смелый поступок. В 1626 г. в «просвещенном» Париже учение об атомах запретили под страхом смертной казни [Исаков, 2004в, с. 35-36]. Оказал влияние на И. Ньютона [Боголюбов, 1983, с. 121].

Работы Гассенди, в силу своего подражательного характера, не имели большого значения для прогресса корпускулярной физики, но они способствовали популяризации античных представлений [Дорфман, 2007а, с. 183].

1637 г. С выходом в свет «Диоптрики» Декартом «сформулированы законы преломления и отражения света» [Бройль, 1965, с. 34] и высказана идея эфира как переносчика света [Храмов, 1983, с. 100].

«Классическая физика, верная идеалу Декарта, изображала Вселенную в виде некоего огромного механизма» [Бройль, 1965, с. 8]. Эти представления распространяются Декартом и на *живую природу*, на мир организмов. Исходя из предпосылок своей теории, Декарт пришел к убеждению, что *биология – не больше, как усложненная физика, а организмы – в такой же мере сложные механизмы: растения – великолепно сконструированные машины, а животные – блестяще сооруженные и эффективно действующие автоматы.*

Таково учение Декарта об организмах в его обнаженном виде. Но он не был бы Декартом, если бы этим ограничивались его биологические взгляды. На самом деле, его учение о строении и деятельности организмов животных и человека много содержательнее и сложнее – оно заряжено вихревой энергией. С автоматизмом же животных не может сравниться ни одна из машин [Лункевич, 1960а, с. 409-416]!

«Рассмотрим ... свойства и происхождения главнейших ветров. Прежде всего, наблюдения показывают, что весь воздух движется вокруг Земли с востока на запад; это нам сейчас придется принять на веру, ибо причину этого можно выяснить должным образом, лишь объяснив всю механику Вселенной, что я и намерен здесь делать» [Декарт, 1953, с. 70; Погребысский, Франфуркт, 1964].

С позиции *начала XXI века* становится ясным, что роль и положение философии Декарта в истории науки определяется именно той «*вихревой энергией*», которая является, по сути, «душой» всех ее составляющих, включая и живые организмы.

1644 г. Выход в свет книги Р. Декарта (1596-1650) «Начала философии» [Кудрявцев, 1956а, б], в которой автор, по сути, предложил первую модель образования Солнечной системы [Исаков, Исакова, 2003]. Согласно модели Декарта, в соответствии с представлениями античных мыслителей, причиной возникновения системы стало *вихревое движение* – единственно устойчивая форма движения. Из первоначального хаоса (эфира [Ацюковский, 2003, с. 51]), благодаря взаимодействиям частиц, образуются *вихри*. Из первичных вихрей возникло Солнце. Более массивные частицы вытесняются к периферии, сцепляются и из вторичных вихрей образуются тела планет. Каждая планета вовлекается своим вихрем в круговое движение около центрального светила. Кометы, представители самых далеких миров, имеют такую же структуру, как и планеты, принадлежат к переходящим, пограничным вихрям, переходя из одного мира в другой [Кудрявцев, 1956а, с. 147-150]. В этой же книге Р. Декартом сформулирован принцип сохранения количества движения.

Декарт полагал, что «небеса разделены на несколько вихрей» [Хаин, Полетаев, 2007, с. 15].

В отличие от древних атомистов, Р. Декарт предполагает с самого начал, что материя потенциально делима до бесконечности и актуально разделена на разнообразные мельчайшие частицы, по сути - элементарные частицы [Дорфман, 2007а, с. 184].

1644 г. Э. Торричелли (1608-1647) произносит блестящую популярную лекцию «О ветре», из которой следует, что ему (вместе с Декартом (см. выше)? – А.В.) принадлежит заслуга открытия условий возникновения ветра и создания основ представления об общей циркуляции земной атмосферы. «Академические лекции» Торричелли оказались неизвестными в XVII в. и были опубликованы впервые лишь в 1715 г. Поэтому не исключено, что именно они способствовали возникновению теории атмосферной циркуляции в XVIII в. [Дорфман, 2007а, с. 180].

Вторая половина 17 в. Имела место в буквальном смысле слова «жестокая» борьба между последователями двух великих ученых, претендовавших на роль единственного лидера в мировой науке: ньютонианцами и картезианцами (последователями Р. Декарта). Эта борьба для первых – последователей Ньютона – окончилась полной победой. Картезианцы же были разгромлены и «истреблены» морально и физически. В результате вихревая идея Декарта была практически полностью забыта более чем на два века.

Эта борьба, недостойная двух величайших личностей, навеянная, по-видимому, негативными и совсем недавними «примерами» инквизиции, а возможно, и спровоцированная ею, тем не менее, является одним из самых печальных событий в науке за всю ее историю. Эта борьба, как увидим в дальнейшем, по сути, продолжается и в настоящее время [Викулин, 2004].

Торричелли произносит блестящую публичную лекцию «О ветре», из которой следует, что ему принадлежит заслуга открытия условий возникновения ветра и создания основ представления об общей циркуляции земной атмосферы [Дорфман, 2007а, с. 180].

Исследования *Роберта Бойля* (1627-1691) вели к объяснению химических реакций на основе понятия элемента. Бойль заимствовал у древних идею об универсальной материи, общей для всех и непроницаемой. Тела возникают из этой универсальной материи, обладающей тремя основными свойствами: формой, величиной и движением. Первичные *корпускулы* суть элементы, т.е. *непосредственные начала* различных видов тел; при их объединении возникают химические соединения и смеси. Объединение происходит благодаря особого рода сродству или притяжению [Джуа, 1966, с. 92].

1673 г. Х. Гюйгенс (1629–1695) развил учение о колебаниях, решил задачу о центре качаний.

1674 г. Р. Гук (1635–1703) высказал идею закона всемирного тяготения. Впоследствии Р. Гук усовершенствовал микроскоп, первым установил клеточное строение тканей, ввел термин «клетка» и определил ее размеры.

1686 г. Х. Гюйгенс был твердо убежден в справедливости идеи эфирных вихрей как единственного пути для объяснения системы Коперника с помощью механической модели [Дорфман, 2007а, с. 169].

1687 г. Выходит в свет работа *И. Ньютона* (1643–1727) «Математические начала натуральной философии», в которой было дано строгое научное описание мира.

Согласно классической механике Ньютона, время и пространство существуют независимо друг от друга. Физические тела движутся во времени и пространстве. Время и пространство являются абсолютными категориями, которые своим существованием не обязаны чему бы то ни было в мире. Ходу времени подчиняются все тела природы, все физические явления. Время однородно. Это свойство времени, а не того, что в нем происходит. Пространство по своим свойствам – однородное, изотропное, евклидово, не зависит от всего, что в себя вмещает, и остается всегда и везде одинаковым и неизменным [Чернин, 1987].

Ньютон первый понял, что с помощью закона всемирного тяготения можно исследовать не только движение небесных тел, но и саму их форму. Он поставил знаменитую задачу о равновесной форме гравитирующей жидкой массы, имеющей вращение вокруг оси, и первым определил сжатие однородной Земли ($\varepsilon=1/229$), что явилось несомненным успехом в познании Земли и других планет. Эта задача и положила начало теории фигур равновесия, являющейся и в наше время одной из центральных задач геодинамики [Кондратьев, 2003, с. 15-37].

Ж.Л. Лагранж (1736-1813) сказал о Ньютоне: «Он самый счастливый – систему мира можно установить только один раз» [Исаков, 2005, с. 9].

Разделение натурфилософии на естественные науки

18 в. Длительный период накопления знаний об электричестве и магнетизме, начатый в XVII в., завершается великолепными исследованиями, выполненными *Б. Франклином* (1706–1790), *М.В. Ломоносовым* (1711–1765), *Г.В. Рихманом* (1711–1753), *Ш. Кулоном* (1736–1806) и многими другими учеными. Решающее значение имело как для этих, так и для последующих исследований создание *А. Вольты* (1745–1827) первого «непрерывного» источника тока [Ацюковский, 2003, с. 297-298].

1728 г. *Г.Б. Бюльфингер* (23.1.1693-18.2.1750), сторонник картезианства, предлагает свою вихревую теорию тяготения, носившую явно антиньютоновский характер [Храмов, 1983, с. 51].

1742 г. *К. Маклорен* (1698–1746) не только открывает равновесные жидкие сфероиды, носящие теперь его имя, но и доказывает, что внутри них полная сила тяжести всегда направлена по нормали к поверхности постоянного значения давления и полного потенциала [Кондратьев, 2003, с. 15-37].

1743 г. *А. Клеро* (1713–1765) на началах гидростатики создает теорию фигуры Земли [Клеро, 1947]. Он первым понял, что в задаче Ньютона о фигуре равновесия вращающейся Земли все дело заключается в существовании тесной взаимосвязи между сжатием планеты и распределением вещества внутри нее. Он фактически впервые доказал, что эллиптический сфероид является фигурой равновесия вращающейся жидкости [Кондратьев, 2003, с. 15-37].

1755 г. Выход в свет космогонической гипотезы «холодного» происхождения солнечной системы из первоначального газопылевого облака, разработанной профессором Кенигсбергского университета *И. Кантом* (1724-1804). Согласно концепции И. Канта, использовавшего законы Кеплера, планеты и Солнце образовались за счет соударений, слипания мелких космических частичек разной плотности и их последовательного разрастания. Вначале образовались более крупные тела (до 1 км), называемые планетиземалями, а затем – конкретные планеты. Процесс укрупнения частиц сопровождался заменой хаотического движения частиц упорядоченным и закономерным вращением в одном направлении всей системы крупных тел и планет.

Начало современных представлений о формировании планет было положено с выходом из печати книги И. Канта «Всеобщая естественная история и теория неба». Он, 31-летний выпускник Кенигсбергского университета, в то время был домашним учителем у детей помещиков и преподавал в университете. Весьма вероятно, что идею вихревого происхождения планет из пылевого облака И. Кант почерпнул из книги, выпущенной в 1749 г. шведским писателем-мистиком *Эмануэлем Сведенборгом* (1688-1772), который высказал гипотезу (по его словам, рассказанную ему ангелами) об образовании звезд в результате вихревого движения вещества космической туманности. Во всяком случае, известно, что довольно дорогую книгу Сведенборга, в которой излагалась эта гипотеза,

купили лишь три частных лица, одним из которых был И. Кант. Впоследствии И. Кант прославился как родоначальник немецкой классической философии. А вот книга Сведенборга о небе осталась малоизвестной, поскольку ее издатель вскоре обанкротился и почти весь тираж остался не распроданным. Тем не менее, гипотеза Канта о возникновении планет их пылевого облака – первоначального хаоса – оказалась очень живучей и в последующие времена послужила основой для многих теоретических рассуждений [Бурба, 2006].

1784 г. Дж. Уатт (1736–1819) изобрел шарнирный параллелограмм для преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное.

1796 гг. Математик и астроном П. Лаплас (1749-1827) на основе данных В. Гершеля построил свою небулярную гипотезу. Начальной субстанцией Лаплас считал вращающуюся шарообразную туманность раскаленного газа. При постепенном охлаждении туманности и ее гравитационном сжатии образовалось первичное Солнце. Вращающееся Протосолнце продолжало сжиматься, а скорость его вращения возрастать, вследствие чего от экватора начали отделяться кольца раскаленного газа, послужившие основой образования планет и их спутников.

Считается, что П. Лаплас не был знаком с космогонической гипотезой И. Канта, опубликованной в 1755 г. [Бурба, 2006].

Гипотеза Лапласа, по существу, до настоящего времени находится в центре космогонических дискуссий, развиваясь и обогащаясь новыми теоретическими идеями и наблюдательными фактами. Например, построенная в 1982 г. космогоническая модель Н.А. Шило [Шило, 1982] и работы других исследователей [Викулин, Мелекесцев, 2007; Лункевич, 1960 а]. И во всех этих моделях и работах *вихревое движение (вращение) вещества*, также как и у Р. Декарта, являлось принципиальным и важнейшим компонентом.

Как видим: история в который раз повторяется. Имеет место следующая цепочка «вихревых» идей: древнеегипетские маги - Демокрит – Средние века – Гюйгенс – Сведенборг – Кант (!!!) – Лаплас (?) – Шило.

1798 г. Г. Кавендишем (1731-1810) определено значение гравитационной постоянной и средней плотности Земли.

Конец 18 - 19 вв. Д.Ф. Араго (1786-1853) в 1811 впервые наблюдает вращение плоскости поляризации света в кварце, в 1824 г. открывает магнетизм вращения - действие вращающейся металлической пластинки на магнитную стрелку [Храмов, 1983, с. 18].

Ж.Б. Био (21.4.1774-3.2.1862) обнаружил оптическую активность некоторых жидкостей (1815), установив, что они обладают способностью вращать плоскость поляризации, установил (1836) существование право- и лево-вращательных веществ [Храмов, 1983, с. 32].

М. Фарадей (1791-1867) доказал тождественность известных тогда видов электричества: «животного», «магнитного», термоэлектричества, электричества, возникающего от трения, гальванического электричества. Выдвинул предположение о существовании силовых трубок электричества («Фарадеевы силовые линии») [Ацюковский, 2003, с. 298]. В 30-х гг. ввел понятие поля, в 1845 употребил термин «магнитное поле», в 1852 отчетливо сформулировал свою концепцию поля. По мнению А. Эйнштейна, идея поля была самой оригинальной идеей Фарадея, самым важным открытием со времен Ньютона [Храмов, 1983, с. 271].

В соответствии с [Ацюковский, 2003, с. 316], электрическое поле – это совокупность винтовых вихревых трубок эфира («трубок Фарадея») с переменным по сечению винтовым фактором.

П.Н. Лебедев (8.3.1866-14.3.1912) осуществил оригинальные эксперименты по магнетизму вращающихся тел [Храмов, 1983, с. 158].

1821–1895 гг. Выходят в свет работы, в которых в совокупности с работами Л.

Эйлера завершается формулировка основных принципов механики и сплошной среды. Л. Навье сформулировал основные уравнения математической теории упругости. У. Гамильтон (1805–1865) сформулировал принцип наименьшего действия в механике, что независимо от него в 1836 г. сделал и М.В. Остроградский (1801–1862). Г. Кориолис (1792–1843) ввел понятие полного ускорения, состоящего из суммы трех ускорений – относительного, переносного и добавочного (кориолисова). Г. Гельмгольц дал математическую трактовку закона сохранения энергии. Дж.У. Рэлей (1842–1919) изложил основы математической теории колебаний; А.П. Котельников (1865–1944) разработал основы винтового исчисления в евклидовом и других пространствах.

1834 г. Новый толчок к развитию теории фигур равновесия дал математик К.Г. Якоби (1804–1851), указавший на возможность существования однородной фигуры равновесия в форме *трехосного* эллипсоида – эллипсоиды Якоби [Кондратьев, 2003, с. 15–37].

1850 – 1865 гг. Р.У.Д.М. Ранкин (5.7.1820–24.12.1872) одним из первых понял значение атомистики для обоснования тепловых законов и в 1850 г. предложил вихревую модель атома, в 1865 г. пытался дать обоснование второму началу термодинамики [Храмов, 1983, с. 229].

1860 г. Выходит в свет работа П. Дирихле [Dirichlet, 1860]. Математик Дирихле внес настолько революционный вклад в основы теории фигур равновесия, что раздвинул границы этой дисциплины. Поставленная Дирихле проблема такова. Дана однородная несжимаемая масса гравитирующей жидкости. Допускают ли законы гидродинамики такое движение этой массы, чтобы ее форма в любой момент оставалась эллипсоидальной, а поле скоростей жидкости – линейным по координатам? Дирихле поставил задачу и получил уравнения движения такого эллипсоида.

Если до Дирихле говорили исключительно о фигурах равновесия, то теперь вопрос поставлен значительно шире: существуют ли однородные эллипсоиды с внутренними течениями? Фигуры же относительного равновесия – всего лишь частный случай стационарных фигур в проблеме Дирихле. Ключевым в этой проблеме является условие линейности внутреннего поля скоростей в эллипсоидах – только она делает решаемой трудную динамическую задачу учета сил Кориолиса. В итоге поля сил гравитации и Кориолиса, а также центробежной силы в эллипсоиде оказываются линейными. Суперпозиция этих силовых полей, без которой проблема Дирихле вообще не имела бы смысла, и порождает обширное семейство возможных конфигураций движений.

Ю.В. Дедекинд отметил особую, присущую уравнениям движения эллипсоида Дирихле симметрию, которая указывает на возможность существования во вращающихся средах вихревых течений.

Самый значительный вклад в разработку идеи Дирихле внес великий математик Б. Риман. Он впервые рассмотрел стационарные фигуры равновесия и открыл класс двухпараметрических равновесных эллипсоидов, у которых вектор угловой скорости и вектор вихря внутренних течений совпадают с одной из главных осей симметрии фигуры – *S*-эллипсоиды Римана. Еще более удивительными являются эллипсоиды Римана с наклонным вращением. У таких фигур (например, Земли) ось вращения и вихря не совпадают с главными осями эллипсоида, что значительно расширяет спектр возможных решений и их применения к задачам геодинамики: оси вращения Земли и магнитная не совпадают [Кондратьев, 2003, с. 15–37].

Как видим, задача Дирихле явилась, по сути, дальнейшим, на более высоком уровне, развитием идеи Декарта о вихревых движениях материи как системы мира.

1860 г. Международным конгрессом в Карлсруэ был узаконен термин «молекула», которая обладает всеми химическими свойствами данного вещества [Ацюковский, 2003, с. 97].

1880–1881 гг. Ф. Энгельсом (1820–1895) опубликована работа «Формы движения материи», ставшая впоследствии частью его знаменитой «Диалектики природы». В этой

работе Ф. Энгельс приходит к выводу: «Жизнь есть способ существования белковых тел, существенным моментом которого является *постоянный обмен веществ с окружающей их внешней природой*, причем с прекращением этого обмена веществ, прекращается и жизнь, что приводит к разложению белка» [Энгельс, 1975, с. 264-265].

1888 г. Академик А. Карпинский (1846/1847-1936) указал на возможную связь распределения материков и их очертаний не только с внутренним строением, но и с вращением Земли [Хаин, Полетаев, 2007, с. 15].

1889, 1905-1906, 1912-1913 гг. Н.Е. Жуковский приступил к исследованиям в области теории полета тяжелых тел, вывел формулу определения подъемной силы крыла и предложил вихревую теорию гребного винта.

Вторая половина 19 в. Ботаником Шимпером (1803-1867) создана теория листорасположения, в которой нашла свое объяснение присущая врожденная тенденция расположения листьев на стебле и ветвях, близкая к спирали. Такими закономерностями интересовались еще Плиний Старший (23/24-79) и Альберт Великий (1193-1280).

Ботаник А. Браун (1805-1877) пытался развить и углубить учение Шимпера. Спиральное расположение листьев на стебле, чешуек и листочков в почке, лепестков в бутоне, а также спиральные сосуды, открытые ботаником М. Мальпиги (1628-1694), спиралью свернутые усики и гибкие стебли некоторых растений – вот факты, на которые он опирался. Остановив свое внимание на спиральном расположении листьев, А. Браун придал ему математическую формулировку, что произвело большой фурор среди ботаников. Получилась такая картина, будто природа действует не только по эстетическим нормам, но и согласно математическим закономерностям [Лункевич, 1960б, с. 442-446].

Вторая половина 19 – начало 20 вв. Вихревая динамика. Задача прогноза погоды и, как следствие, проблема построения теории атмосферных циклонов привели в середине XIX в. к возрождению интереса к вихревой динамике. Труды Г. Гельмгольца, В. Томсона (лорда Кельвина), Г. Кирхгофа (1824-1887), П. Дирихле (1805-1859), Ю. Дедекинда (1831-1916), Б. Римана, А.М. Ляпунова (1857-1918), Ж. Пуанкаре (1854-1912) и других исследователей привели к появлению существенно новых гидродинамических результатов. Теория вихревого движения развивалась следующим образом [Ацюковский, 2003, с. 127-131; Борисов, Мамаев, Соколовский, 2003, с. 18-25, 134].

1839 г. Шведским ученым Свенбергом была доказана следующая теорема: угловая скорость вращения частицы в ее различных положениях на траектории всегда обратно пропорционально квадрату ее расстояния от траектории движения. Отсюда заключение: частица жидкости, получив в какой-либо момент угловую скорость, никогда не перестанет вращаться и, наоборот, частица жидкости не будет вращаться, если в начале движения, ее угловая скорость была равна нулю [Ацюковский, 2003, с. 127].

1858 г. Выходит в свет замечательная работа Г. Гельмгольца «Об интегралах уравнений гидродинамики, соответствующих вихревым движениям», в которой доказаны основные теоремы, положившие начало современной вихревой теории. В этой работе Гельмгольцем был обоснован во всей полноте принцип сохранения вихрей и указано правило определения скоростей движения вихревых шнуров, находящихся в идеальной несжимаемой жидкости, и тех частей жидкой массы, где отсутствуют вихри.

Все последующие работы являются, по существу, расширением и обобщением основных результатов, добытых Гельмгольцем.

1867 г. Следуя общей идее XIX в., согласно которой объяснения различных физических феноменов следует искать в подходящих механических интерпретациях, В. Томсон (лорд Кельвин) предложил теорию вихревых атомов. В этой теории мир понимается как некий эфир (аналог идеальной жидкости), в котором взаимодействуют вихри Гельмгольца, подобные атомам, образующим молекулы. Вихри в этой теории объясняли гравитацию. Идеи Кельвина так и не были реализованы и вскоре были вытеснены атомной и квантовой механикой.

Вихревая теория атомов, созданная *В. Томсоном*, не получила признания и развития. Только в 20-е гг. XX в. немецкий гидродинамик *А. Корн* попытался вновь воскресить идеи *В. Томсона*, но применительно не к атомам вещества, а к толкованию природы (спина) электрона.

Несколько позже *Н. Кастерин* сделал попытку построения вихревой теории элементарных частиц. Однако идеи *А. Корна* и *Н. Кастерина* были встречены с большим недоверием широкой научной общественностью, вследствие чего они оказались изолированными и невостребованными, хотя в работах этих ученых содержится немало интересных соображений.

1876 г. В своих «Лекциях по математической физике» *Г. Кирхгоф* вывел общие точные уравнения движения N -точечных вихрей, указал их гамильтонову форму, а также получил для них четыре интеграла (закона сохранения).

1877 г. Основываясь на уравнениях Кирхгофа, *В. Гребли* (1852–1903) в своей диссертации подробно проанализировал интегрируемую задачу о движении трех вихрей на плоскости. Он анализирует взаимодействия вихревой пары с единичным вихрем, рассматривает частные случаи четырех и $2n$ вихрей.

1876–1883 гг. *О. Рейнольдс* (1842–1912) экспериментально установил критерий перехода ламинарного течения в цилиндрических трубах в турбулентное течение и далее в вихревое.

1879 г. В работе *Koomsa (Cootes)* на основании рассмотрения вихревого кольца делается вывод, что кольцеобразная форма вихря – форма устойчивая.

1877–1878 гг. *Гринхилл* рассмотрел задачи о движении вихрей в жидкости, ограниченной цилиндрическими поверхностями. Пользуясь методом изображений, он решил задачи о плоском движении одного и двух вихрей внутри и вне поверхности круглого цилиндра, а также в пространстве, ограниченном поверхностью прямоугольной четырехугольной призмы. В это же время учеными были решены многочисленные частные задачи вихревого движения.

1894 г. *Н.Е. Жуковский* (1847–1921) решил задачу о движении вихря вблизи острия клина, погруженного в жидкость. Рассматривая траектории вихря, он показал, что вихревой шнур всегда уклоняется от подносимого к нему ножа. Впоследствии Жуковский разработал теорию так называемых «присоединенных» вихрей, имеющую фундаментальное значение для многих приложений.

Начало 20 в. С развитием авиации ученые натолкнулись на необходимость изучения вихревых образований при обтекании твердых тел. В этом отношении особого внимания заслуживают работы *Т. Кармана* (1881–1963) и *Н.Е. Жуковского*. Первый весьма подробно изучал поведение так называемой дорожки Кармана [Храмов, 1983, с. 225].

1902–1920 гг. Итальянский ученый *Бельтрами*, пользуясь теоремами, выведенными Гельмгольцем, дал правило определения скоростей частиц сжимаемой жидкости, находящейся в вихревом движении и замкнутой конечным объемом. Это правило, устанавливающее электродинамические аналогии, известно как теорема Бельтрами.

20-е гг. Немецкий гидродинамик *А. Корн* предпринял попытку воскрешения «вихревых» идей *В. Томсона* применительно не к атомам, а к толкованию природы электрона. *А.П. Кастерин* сделал попытку построения вихревой теории элементарных частиц. Однако идеи *А. Корна* и *Н.П. Кастерина* были встречены с большим недоверием широкой научной общественностью, вследствие чего они оказались изолированными и невостребованными.

1927 г. Выходит работа *С. Озеена*, в которой впервые ставится задача о движении вихрей в вязкой жидкости.

1934 г. Публикуются работы *А.А. Фридмана* (1888–1925), в которых дана постановка задачи движения вихрей в сжимаемой жидкости. Идеи Озеена и Фридмана еще ждут своего продолжения.

По-видимому, интенсивное развитие квантовой механики, использующей в своей основе концепцию спина – волчка с собственным моментом, «переключило» на себя основное внимание и силы и тем самым «затормозило» так бурно начавшееся в середине XIX в. развитие вихревой гидродинамики и эфиродинамики.

1871 г. В.Э. Вебер (24.10.1804-23.6.1891) построил первую электронную модель атома, дав его планетарную структуру [Храмов, 1983, с. 58].

1885 г. Английским физиком Дж.У. Рэлеем (D.W. Rayleigh, 1842-1919), основоположником теории колебаний, открываются поверхностные волны. Движение частиц среды в таких волнах происходит по эллипсам, ориентированным вдоль распространения волны и перпендикулярно поверхности среды, в направлении, обратном распространению волны.

1892-1897 гг. Сначала А.М. Ляпунов (1857-1918) опубликовал работу «Общая задача об устойчивости движения», которая является основополагающей работой в теории устойчивости механических систем. В теории фигур равновесия равномерно вращающейся жидкости им впервые доказано существование фигур равновесия однородной и слабо неоднородной жидкости, близких эллипсоидальным.

Через несколько лет А. Пуанкаре (1854-1912) опубликовал трактат «Новые методы небесной механики», в котором, в частности, доказал существование фигур равновесия, отличных от эллипсоида, кольцеобразных и грушевидных фигур.

Таким образом, Ляпунов и Пуанкаре независимо друг от друга открывают целый класс новых неэллипсоидальных фигур равновесия, отдаленно напоминающих по форме то груши, то рубчатые дыни, волнистые патиссоны и другие фрукты и овощи, которые, как оказалось, в виде фигур относительного равновесия существуют в окрестности определенных сфероидов Маклорена и эллипсоидов Якоби. Строгое доказательство существования неэллипсоидальных форм дано в начале XX в. Ляпуновым [Кондратьев, 2003, с. 15-37].

Все последующие астрономические наблюдения, включая и полеты космических аппаратов, доказали правильность теоретических выводов А.М. Ляпунова и А. Пуанкаре о существовании несимметричных фигур равновесия вращающихся космических тел.

1898 г. А.И. Садовский (6.12.1859-26.12.1921) впервые теоретически обосновал вращающее действие световых волн, падающих на кристалл (эффект Садовского), вычислил вращающие моменты, доказав возможность непосредственного преобразования световой энергии в механическую. Эти идеи впервые были оценены в 1911 г. П. Эренфестом (18.1.1880-25.9.1933) и получили мировое признание [Храмов, 1983, с. 241].

Революция в естествознании

В конце 19 – начале 20 вв. имело место бурное развитие производительных сил в передовых странах Европы и США, которое сопровождалось быстрым развитием науки и срастанием ее с частной промышленностью. В физике были сделаны величайшие открытия, которые связаны с именами В.К. Рентгена (1845-1923) – открытие в 1895 г. нового вида лучей, названных его именем, А. Беккереля (1852-1908) – открытие в 1896 г. явления радиоактивности, Дж.Дж. Томсона (1856-1940) – открытие первой элементарной частицы, электрона, М. Планка (1858-1947), который в 1900 г. пришел к идее квантов, А. Эйнштейна (1879-1955), в 1905 и 1916 гг. сформулировавшего теорию относительности. Основной особенностью этих открытий было то, что они требовали полного пересмотра общепризнанных в то время представлений классической физики.

1910-1912 гг. Американский геолог Ф. Тейлор и автор гипотезы «дрейфа

континентов» немецкий геофизик *А. Вегенер* (1880-1930), объясняя смещения материков, связывали их с вращением Земли [Хаин, Полетаев, 2007, с. 15].

1911 г. *Э. Резерфордом* (1871-1937) была предложена планетарная модель атома, которая существует в физике до настоящего времени. В центре атома, размером $1\text{ \AA} \approx 10^{-8}\text{ см}$, находится ядро размером около 10^{-13} см , вокруг которого, как планеты вокруг Солнца, вращаются электроны.

1915 г. *А.Л. Чижевским* (1897–1964) установлено влияние солнечной активности на биосферу. Уже во второй половине XX в. было показано, что и сама солнечная активность, а следовательно, и биологическая активность всего живого, в свою очередь, определяется моментной динамикой всей Солнечной системы, в основном динамикой Юпитера [Тимашев, 2003; Викулин, Мелекесцев, 2007; Викулин, 2008].

1919 г. *Э. Резерфорд* экспериментально наблюдал выбитые из ядер атомов частицы, которым в 20-х гг. дал название протон.

1932 г. Учеником *Э. Резерфорда Дж. Чедвигом* (1891-1974) открывается нейтрон [Ацюковский, 2003, с. 181].

1955 -1956 гг. Получены антипротон и антинейтрон [Ацюковский, 2003, с. 182]. В настоящее время открыто от 200 до 2000 элементарных частиц, в зависимости оттого, что считать элементарной частицей.

1920-е гг. *М. Боголепов* (Москва) выдвинул «идею вековых зональных движений в мантии – вихреобразного процесса, создающего тягу снизу, направленного по часовой стрелке в Южном полушарии и против часовой стрелки в Северном и возбуждаемого радиоактивным нагревом». *Б. Личков* (1988-1966) впервые в отечественной литературе начал рассматривать фактор изменения скорости вращения Земли как основной в тектоногенезе [Хаин, Полетаев, 2007, с. 15-16].

1921 г. *А.Х. Комтон* (1892-1962) пришел к идее спина [Храмов, 1983, с. 19].

1922 г. *О. Штерн* (1888-1969) совместно с *В. Герлахом* (1889-1979) доказали наличие магнитного момента атома, иначе говоря, экспериментально подтвердили пространственное квантование – опыт Штерна-Герлаха [Храмов, 1983, с. 303-304].

1922-1932 гг. *В.И. Вернадским* в ряде работ высказаны соображения о том, что пространство и время, в которых происходят биологические (и геологические) процессы, отличаются от концепций пространства и времени, принятых в физике: «... по-видимому, мы имеем дело внутри организмов с пространством, не отвечающим пространству Евклида, а отвечающим одной из форм пространства Римана. ... Удивительно, что явление «правизны» и «левизны» остались вне философской и математической мысли, хотя отдельные великие философы и математики ... к нему подходили. Пространство жизни иное, чем пространство косной материи. Я не вижу никаких оснований считать такое допущение противоречащим основам нашего точного знания» [Вернадский, 1991, с. 24-25].

Согласно [Бебель, Мегеря, Бебель, 2003, с. 60], в этом месте: «В.И. Вернадский упрекал Евклида за то, что он не ввел в основы геометрии элементов *кручения*, *свойственных вихревым явлениям*, и тем самым, обезоружил современную науку, особенно, в биологической и геологической средах».

Трудно не согласиться с таким высказыванием. Если бы Евклид ввел в геометрию «элементы кручения», если бы Декарт со своими «вихревыми» идеями победил бы Ньютона...? В свете настоящего обзора несомненно, что концепции современного естествознания вполне могли бы опираться на другие представления, в том числе и на «вихревые» [Викулин, 2008].

1923–1931 гг. *Н.Е. Кочин* (1901–1944) показал в синоптике возможность движения сжимаемой жидкости под действием консервативных сил с образованием вихрей при отсутствии притока энергии извне. Он дал решения уравнений движения сжимаемой жидкости на вращающейся Земле, определил условия образования на поверхностях раздела воздушных масс волны, переходящей в циклон – воздушный вихрь,

перемещающийся в атмосфере.

Полная теория смерчей, тайфунов, ураганов и циклонов в атмосфере пока так и не создана. Имеется несколько интересных подходов к проблеме вихревых движений в атмосфере, в целом достаточно полно объясняющих многие стороны явления [Наливкин, 1969]. Интересной является работа *А.Г. Иванчина* [2004], в которой, по-видимому, впервые в полном объеме решена проблема работы вихревого механизма, создающего атмосферные смерчи и ураганы с такими гигантскими энергиями. Основная идея решения сводится к тому, что при формировании газового вихря происходит самопроизвольное преобразование потенциальной энергии давления окружающего вихрь газа в кинетическую энергию вращения вихря. При этом соблюдается закон постоянства момента количества движения, и чем сильнее сжато тело вихря, тем больше в него закачивается энергии из окружающей среды. Тороидальный вихрь окружен пограничным слоем газа, в котором температура и вязкость понижены по сравнению с температурой и вязкостью окружающей среды. Это обеспечивает устойчивость вихревого тороида и длительность его существования. Винтовой тороидальный вихрь газа в процессе образования концентрирует в себе энергию окружающей среды и является, таким образом, природным механизмом по преобразованию потенциальной энергии газовой среды в кинетическую энергию вращения вихря [Ацюковский, 2003, с. 178-179].

1924-1925 гг. *Луи де Бройль* создает волновую теорию материи [Дорфман, 2007а, с. 244-246], в которой «... квант действия служит соединительным звеном между корпускулярным и волновым представлениями» [Бройль, 1965, с. 136].

Поля и частицы – это не разные объекты, а разные *способы описания* одного и того же объекта. Квантовая механика первой поставила под сомнение, казалось бы, очевидную предметность нашего мира и осознала, что немаловажную роль в процессе «опредмечивания» окружающей действительности принадлежит прибору и наблюдателю.

До недавнего времени казалось, что такое необычное поведение материи характерно только для микрочастиц. Но классики уже в момент становления квантовой механики прекрасно понимали, какое огромное значение имеют эти выводы для общей картины окружающего мира, и что они выходят далеко за рамки микромира. Например, В. Гейзенберг, говорил: Идея реальности материи, вероятно, являлась самой сильной стороной жесткой системы понятий XIX века; эта идея в связи с новым опытом должна быть, по меньшей мере, модифицирована» [Доронин, 2007, с. 41-42]. По мнению А. Эйнштейна [1966б, с. 497], такое «... волновое поле – пока еще неизвестной физической природы – в принципе должно оказывать свое влияние на движение».

Однако недостаток научных данных в начале XX века позволял ученым лишь философствовать на эту тему [Доронин, 2007, с. 42].

1925–1928 гг. Заложены основы квантовой механики: *В. Гейзенбергом* (1901–1976) разработана теория матриц, *Э. Шредингером* (1887–1961) развита волновая механика – сформулировано носящее его имя основное волновое уравнение квантовой механики.

1925 г. Американские ученые *Дж. Уленбек* (1900–1974) и *С. Гаудсмит* (1902–1979) для теоретического объяснения экспериментальных данных предположили, что электрон можно рассматривать как «*вращающийся волчок*» с собственными механическим и магнитным моментами. Таким *гипотетическим* образом в физику и был введен спин – собственный момент количества движения микрочастицы, величина *чисто* квантовой природы, не связанная с движением частицы как целого.

Как видим, во-первых, спин является одним из специфических понятий квантовой механики, отражающих саму ее суть [Ландау, Лифшиц, 1974, с. 234], и в то же время спин является таким же «первым» свойством частицы, как и ее «вполне классические» параметры (масса, заряд) [Ферми, 1968, с. 229]. Во-вторых, при таком определении спина становится несущественным вопрос о его происхождении, поэтому собственный момент может быть приписан частице вне зависимости от того, является ли она «элементарной» или «сложной» [Ландау, Лифшиц, 1974, с. 235]. В-третьих, большое количество

экспериментального материала показывает, что спиновые свойства элементарных частиц играют огромную роль как в области микропроявлений, так и в поведении *макроскопических* тел, поскольку спин непосредственно определяет статистические свойства систем [Левич, Вдовин, Мямлин, 1971, с. 236].

Такие свойства спина, с одной стороны, предопределили введение формализма квазичастиц (слабых возбуждений всего тела – «почти» элементарных частиц) [Лифшиц, 1949], с другой – позволили предположить существование *собственного момента у макроскопических по размерам частей тела* [Пейве, 1961; Седов, 1973, с. 146-148].

После того как в начале XX в. были сформулированы основные принципы и уравнения квантовой механики, физики-теоретики разделились на две группы: группу А. Эйнштейна – «детерминистскую» («Бог не играет в кости!»), в которую входили М. Планк (1858–1947), А. Эйнштейн, Л. де Бройль (1875–1960), Э. Шредингер, и группу Н. Бора – «вероятностную»: Н. Бор (1885–1962), В. Гейзенберг, М. Борн (1882–1970), П. Дирак (1902–1984). Сам факт возникновения этих групп характеризует собой глубокий кризис в понимании физической реальности, который длится вот уже более полувека.

Согласно одной из гипотез [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993; Шипов, 2002], вероятностный характер описания квантовой теории связан с тем, что материя представляет собой имеющие конечные размеры сгустки поля инерции, которые, по сути, представляют собой *поля кручения*. Итак, в очередной раз круг замыкается, и мы опять возвращаемся к идее об абсолютности вращательного движения: свободные вихри античных мыслителей, вихри Декарта, взаимодействующие вихри Гельмгольца, вихревые атомы Кельвина, квантовая механика – спин, инерционные поля кручения!

Возможно, природу спина и его связь с полем кручения удастся объяснить в рамках непотенциального вихревого решения задачи об электроны [Иванчин, 2007].

1928 г. Начало «вихревого» этапа в геологии и тектонике: выход в свет пионерской работы китайского геолога *Ли Сы-гуана* [Lee, 1928], в которой впервые были выделены и описаны *вихревые структуры* в геологических разрезах Китая. Это были преимущественно вихревые структуры с горизонтальной осью вращения. Запрет на учение о влиянии ротационного фактора на геологические и тектонические процессы был нарушен благодаря созданию к этому времени достаточно точных геологических карт, проведению детальных геологических исследований и выполнению высокоточных геодезических измерений на больших базах [Мелекесцев, 2004].

1930 г. *В. Паули* (1900–1958) с целью объяснить непрерывный энергетический спектр электронов при β - распаде вводит представление о нейтральной частице малой массы.

1932–1934 гг. *Э. Ферми* (1901–1954) строит последовательную теорию β – распада и предлагает назвать новую частицу *нейтроном*.

1953–1956 гг. Американскими физиками *Ф. Райкесом* и *К. Коуэном* экспериментально доказано существование нейтрино. Нейтрино от антинейтрино во всех экспериментах отличается знаком спиральности [Физический, 1983, с. 449].

Согласно [Шипов, 2002, с. 48] нейтрино обладает только спином и потому может играть ключевую роль при объяснении взаимодействий посредством торсионных полей (полей кручения).

1933 г. Экспериментально подтвержден вращательный характер движения блоков земной коры в работе японских исследователей [Fujiwhara, Tsujimura, Kusamitsu, 1933], которая подготовлена на основе данных результатов повторных геодезических работ в 1884–1889 и 1924–1925 гг., проведенных в японской провинции Канто в районе очага катастрофического землетрясения 01.09.1923 г. В этой работе впервые формулируется вывод о *вращательном движении блока земной коры*, в котором располагался очаг землетрясения Канто.

В последующем вывод о вращательном движении блоков земной коры, в том числе являвшихся очагами сильнейших землетрясений вблизи Алеутских островов, Колумбии,

Эквадора и других регионов планеты, подтверждается многочисленными работами других исследователей, выполненных в 1986-2003 гг. [Викулин, 2003].

1948 г. *Г.А. Гамовым* (1904–1968) предложена модель Большого взрыва – современная модель образования Вселенной. Согласно этой модели, в результате взрыва около 15 млрд. лет назад началось космологическое расширение Вселенной, которое продолжается до настоящего времени. Одним из определяющих все дальнейшее состояние Вселенной были именно спиновые, по сути, «вихревые» эффекты, что и подтверждается наблюдаемым строением галактик, большая (более 70%) часть которых имеют спиральное строение [Чернин, 1987].

Как видим, и у античных мыслителей, и у их «прямого» идейного наследника Р. Декарта были все основания в качестве основы основ предложить гипотезу вихревых атомов, «рождающих все видимое разнообразие Природы» [Викулин, 2004], включая и саму жизнь [Викулин, Мелекесцев, 2007].

1948-1952 гг. *Л. Онсагер* (27.11.1903-5.10.1976) предсказал возникновение квантовых вихрей в сверхтекучей компоненте жидкого гелия, движущейся с закритической скоростью, при температуре ниже точки фазового перехода [Храмов, 1983, с. 202, 207].

К. Херринг построил теорию спиновых волн [Храмов, 1983, с. 290].

А.С. Давыдов ввел понятие деформирующих экситонов [Храмов, 1983, с. 96].

50-70-е гг. *1954 г.* Экспериментальное изучение механизма образования тектонических разломов и нарушений геофизической среды при землетрясениях показало, что образующиеся в материале трещины при определенных условиях его нагружения испытывают вращение [Белоусов, Гзовский, 1954; Гзовский, 1975, с. 158-161].

1961 г. *А.В. Пейве* (1906-1985) приходит к выводу о блоковом строении геологической среды, движущей силой которой является собственный момент количества движения блока [Пейве, 1961].

1963-65 гг. Объединение теоретических и экспериментальных условий исследования образования трещин привело к выводу о том, что при скорости развития трещины больше $0,6 \cdot V_s$ происходит ее *закручивание* и при $0,9 \cdot V_s$ направление совпадает практически с направлением максимального скалывающего напряжения [Белоусов, Гзовский, 1954; Магницкий, 1965, 2006; Brace, Bombolakis, 1963; Yoffe, 1951].

1973 г. Выход в свет второго издания фундаментального учебника *Л.И. Седова* «Механика сплошной среды», в котором, в том числе, обращается внимание на задачи с *собственным моментом количества движения конечного объема сплошной среды*, примером которых, например, могут быть ферромагнитные материалы. Собственный макромoment такой среды складывается из собственных микромоментов (спинов) составляющих ее атомов или молекул, взаимодействие которых при наличии магнитного поля имеет дальний порядок. [Седов, 1973, с. 146-148, 504-530].

1975 г. «Устанавливается пространственная волнистость крупных разрывов. Делается вывод о том, что «представление о прямолинейности крупных разрывов, содержащиеся во многих учебниках по структурной геологии, часто не соответствуют описанным фактам. Вероятно, нужно говорить об общем, среднем направлении простирания каждого разрыва, отклонения от которого будут наблюдаться повсеместно» [Гзовский, 1975, с. 158-161, 169-178].

1950-1960-е гг. *М. Стовасом* в *1951 г.* защищается кандидатская диссертация «К вопросу о критических параллелях земного эллипсоида», а в *1961 г.* докторская – «Опыт математического анализа тектонических процессов, вызываемых изменениями фигуры Земли».

1955 г. Академик *Н. Шатский* (1895-1960) связал образование планетарной сетки разломов с напряжениями в земной коре и оболочке, возникающими в результате изменения скорости вращения Земли. На геологическую роль ротационных сил и вихревых структур указывал *Р. Зондер* (Швейцария). Профессор Вюрцбургского университета (Германия) и группа специалистов Института геологических наук Украины

под руководством *И. Чебаненко* независимо друг от друга провели эксперименты, подтвердившие влияние вращательной динамики Земли на формирование сетки ее планетарных разломов [Хаин, Полетаев, 2007, с. 16-17].

В последующем о важности ротационных движений писали многие ученые: *П.С. Воронов, В.Г. Бондарчук, О.И. Слензак, Б.Л. Личков, К.Ф. Тяпкин* и многие другие.

Сейчас можно считать общепринятой важность ротационного фактора [Ротационные, 2007].

1953 г. *Дж. Уотсон* и *Ф. Крик*, впоследствии нобелевские лауреаты, предложили модель строения основной молекулы жизни – молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) в форме *двойной спирали*. Спиральную форму имеют и некоторые бактерии (спириллы, менее скрученные и похожие на запятую, и спирохеты, сильнозакрученные и напоминающие штопор), и большое количество куколок, раковин и др. [Вили, 1968, с. 166, 271] Следует отметить, что раковины, скелеты, ветвистые растения и способность организмов строить несимметричные молекулы оказали заметное влияние на ход эволюции.

Современный период

Вторая половина 20 в. Главная особенность белков, которая имеет решающее значение для их функционирования – это способность самопроизвольно формировать пространственную структуру, свойственную только данному белку, или так называемая самоорганизация структуры [Викулин, Мелекесцев, 2007; Викулин, 2008]. Сам механизм, реализующий программу синтеза молекулы белка за 1–2 *мин.*, удивительно изыщен. При построении белков живая природа использует только 20 вполне определенных аминокислот, которые получили название канонических. Этот набор универсален. Замена одной аминокислоты в белке может полностью нарушить его функции и привести к гибели организма [Павленко, 2005, с. 709].

В «белковой» проблеме еще много неясного [Викулин, Мелекесцев, 2007; Викулин, 2008]. К примеру, все белковые соединения, входящие в состав живого вещества, имеют «левую асимметрию». Что это значит? Когда происходит лабораторный синтез такого соединения, «правые» и «левые» формы всегда присутствуют в одинаковом количестве, так как наращивание молекул путем присоединения атомов и атомных группировок происходит случайным образом. Почему же в «живых» органических соединениях всегда присутствуют только «левые» формы аминокислот и «правые» молекулы сахаров, тогда как их зеркальные изомеры в биосфере полностью отсутствуют? В каком виде белковая молекула получает команду на сворачивание «единственным и неповторимым» образом? С помощью какого поля белковой молекуле передается в буквальном смысле слова «живородящий» момент «левой» ориентации? Какую природу имеют вращательные движения, продолжением которых является такой момент?

Еще микробиолог *Л. Пастер* (1822–1895) – «герой мысли», «человек со всеохватывающим полетом мысли», как говорили о нем современники, – указал, что «асимметричный синтез» может происходить при наличии какого-нибудь природного асимметричного фактора [Шкловский, 1980, с. 182].

Одним из таких асимметричных факторов или движений, которые могли бы способствовать зарождению «молекулы жизни» – белка [Вайнштейн, 1986], может быть *вращение* [Викулин, Мелекесцев, 2007; Викулин, 2008]. Имеющиеся геохронологические ряды данных, по-видимому, указывают на *однократное* возникновение жизни на Земле. В таком случае, если предположить, что жизнь на Земле возникла *закономерно*, а не случайно (к примеру), то либо такое «асимметричное вращение» в момент зарождения

жизни должно было быть неким особым, либо механическое вращение оставалось «обычным», но сопровождалось «асимметричным» изменением другого геофизического поля (например, аномальной переполусовкой магнитного поля планеты) [Николаев, 1991].

1955 г. *Р.Ф. Фейман* (11.5.1918-15.02.1988) развил теорию квантовых вихрей в сверхтекучем гелии, показав, что при достаточно больших скоростях жидкий гелий должен быть пронизан квантовыми вихрями [Храмов, 1983, с. 274].

1958 г. Выход в свет классической книги *Ч. Рихтера* «Элементарная сейсмология» [Рихтер, 1963], в которой автор, среди много прочего, по-видимому, впервые обратил внимание исследователей на возможность направленной миграции очагов землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома в Турции со скоростью около 200 км в год (≈ 1 см/сек) [Быков, 2005].

В последующем, *Р.З. Таракановым* [1961], *С. Дудой* [Duda, 1963], *К. Моги* [Mogi, 1968] и многими другими исследователями эффект миграции очагов землетрясений был подтвержден и доказан на сейсмологическом материале других регионов планеты. Было установлено, что скорости миграции землетрясений расположены в диапазоне примерно восьми порядков по величине: от 1 км/год (10^{-2} см/с) до 10^7 км/год (1 км/с) (Викулин, 2001, 2003, 2008).

Теория явления миграции землетрясений была дана в конце 90-х гг. прошлого века *А.В. Викулиным* и *А.Г. Иванчиным* в рамках волновой ротационной модели [Викулин, 2003; Викулин, Иванчин, 1998]. Ими было показано, что миграция очагов землетрясений осуществляется упруго-ротационными волнами крутильной поляризации, являющимися солитонами и экситонами в определении *А.С. Давыдова* [Давыдов, 1982].

1961 г. Выходит в свет работа геолога *А.В. Пейве* [1961], в которой автор, во-первых, обосновывает *блоковое строение* земной коры; во-вторых, анализируя ее структуру и движение, приходит к новому, фантастическому по тем временам механизму движения коры – *собственному источнику движения блока*. При этом главной особенностью тектонических движений является то, что *каждый блок обладает как бы самостоятельной «движущей силой», заключенной в нем самом*.

Развивая эту концепцию, ученики *А.В. Пейве* [Лукиянов, 1999] пришли к выводу о том, что геологическая среда является нелинейной и самоорганизующейся. Вследствие этого ее движение может быть представлено в виде тектонического течения с неоднородными деформациями, *ненулевыми дивергенциями и вихрями*. С учетом этих данных самостоятельной движущей силой блока может быть только его *собственный момент*.

1968 г. Выходит в свет фундаментальная работа *В.В. Шулейкина* [1968], в которой автор среди прочего описал пропеллерное движение хвоста и всего тела дельфина при его движении и показал, что для компенсации вредного вращающегося момента служит асимметрия его черепа. Как видим, более совершенный движитель, позволивший дельфину (и зубатым китам) *выжить* в ходе эволюции и *подняться на более высокую ступень эволюционной лестницы*, способствовал «приобретению» асимметрии черепа, но «научил» управлять трением при движении.

Разработана теория динамики стаи рыб (и птиц), в которой пространственное расположение птиц и рыб отвечает минимуму затрат энергии, расходуемой на трение при их передвижении.

1980–1990-е гг. Установлено, что в процессе эволюции «научились управлять» трением и другие живые существа. Например, змеи, черви и моллюски движутся за счет образования дислокаций. Движение дождевого червя начинается с образования «растягивающей» дислокации вблизи шейки, тогда как движение большинства змей осуществляется путем образования «сжимающих» дислокаций у хвоста и их перемещения по направлению к голове [Ивасышин, 2003].

Такого рода комплексные приведенные выше данные показывают, что к

объяснению физики трения как процесса чисто механического можно подойти, на первый взгляд, с несколько необычной – «социальной» – точки зрения, позволяющей на макроуровне использовать «самоорганизационные» свойства вращательных (вихревых) микроскопических движений [Викулин, Мелекесцев, 2007; Викулин, 2008].

1970-е гг. Немецкий физик *Г. Хаген* предложил заложить принципы самоорганизации живой природы в основу новой науки – науки о теории самоорганизации всех явлений независимо от их природы [Павленко, 2005, с. 712].

1972 г. Выходит в свет работа геолога *О.И. Слензака* (1972), развивающая на новом качественном уровне «вихревые» представления Ли Сы-гуана. Автор в результате проведенных им в 1950–1970 гг. исследований доказал существование крупных, превышающих 1000 км в диаметре вихревых структур. Сделан вывод о «самостоятельности крупной вихревой системы как типа тектонической структуры литосферы, который не может быть создан внешними источниками движения в виде дрейфующих материков или смещений по планетарным разломам». При этом породы, слагающие вихревые структуры, формировались «в твердом состоянии на месте и за счет вещества верхней мантии и с самого начала формировались как дугообразные, а не механически изгибались из первоначально прямолинейных структур».

Отмечено, что «перекрывание вихревых систем» приводит к «образованию систем меньшего размера, соединяя в новые вихри отрезки больших дуг крупных систем», «иерархическая соподчиненность тектонических структур связывает в неразрывную цепь ... самостоятельные тектонические формы и геологические тела складчатых областей и их обрамления». Другими словами, системы вихревых структур связаны в единую иерархическую тектоническую планетарную структуру.

Обсуждение генезиса вихревых структур автор начинает знаковыми для всей этой сводки данных словами Р. Декарта: «Материя неба должна вращать планеты не только вокруг Солнца, но и вокруг собственной оси». Продолжая эту мысль, можно сказать, что А.В. Пейве [1961] и его последователи [Лукиянов, 1999], как отмечалось выше, показали, что вокруг своей оси вращаются и планетарные блоки и плиты.

Далее О.И. Слензак обращает внимание на то, что «вихревые системы литосферы в преобладающем большинстве случаев имеют симметрию циклонов Северного полушария» и имеют большое сходство с морскими и океаническими течениями, и констатирует: «Вращательное движение Земли создает вихри литосферы... расположение которых контролируется симметрией вихревой системы».

1979 г. Выходит в свет работа камчатского геолога *И.В. Мелекесцева* [1979], в которой была предложена вихревая вулканическая гипотеза и рассмотрены некоторые вытекающие из нее следствия.

1981 г. Присуждение американскому нейрофизиологу *Р. Сперри* Нобелевской премии за работу в области исследования функциональной специализации полушарий головного мозга человека и физиологического подтверждения функциональной асимметрии человеческого мозга. Асимметрия мозга выражается в раскрытой *И.М. Ягломом* [1983] «назойливо повторяющейся в истории парности разнородных исследователей одного и того же дела». Например, Платон – Аристотель, Кеплер – Галилей, Ньютон – Лейбниц и др. Поляризация мыслительного аппарата человека выражается в том, что правое полушарие мозга специализируется на так называемом образном мышлении... Тогда как левое полушарие осуществляет последовательно-логические операции, следит за причинно-следственными (временными) связями [Миллер, 2005, с. 126-136].

Среди ученых распространено мнение, что асимметрия организма и головного мозга у живых существ, включая и человека, является результатом эволюции [Викулин, Мелекесцев, 2007]. Эти данные фактически визуализируют процесс взаимодействия умов как отдельно взятых людей, так и групп людей (коллективы ученых античного мира и Древнего Китая), имеющий место вследствие асимметричного строения мозга человека.

Несимметричное строение головного мозга человек, по сути, «унаследовал» от дельфина, череп которого в связи с «жизненной» необходимостью уменьшить вихревые (турбулентные) потери при его движении в воде имеет асимметричное строение. Вместе с тем полученные в работе уникальные данные убедительно показывают, что *все* явления, происходящие в *социуме*, коррелируют с величиной солнечной активности, определяемой, в свою очередь, моментной динамикой всей Солнечной системы, в основном динамикой Юпитера, период обращения вокруг Солнца которого составляет около 11 лет. Есть что-то, не ощущаемое каждым индивидом, но проявляющееся в их самоорганизующемся (с помощью вихревых полей?) коллективном поведении, уменьшающем «социальное трение» [Викулин, Мелекесцев, 2007; Викулин, 2008].

1983 г. Получение *С. Чандрасекхаром* Нобелевской премии за цикл работ, посвященных динамике звезд и выполненных в рамках проблемы Дирихле.

Полученные данные позволили модифицировать классическую для идеальной жидкости задачу Дирихле и тем самым применить ее к движению реальных сред. Представляется, что вихревые решения модифицированной проблемы Дирихле будут в большей степени соответствовать движениям, наблюдаемым в реальных средах, включая и геофизическую среду, которая, как известно, содержит большое количество разномасштабных вихревых геологических структур и вихревых геофизических движений [Викулин, 2005; Кондратьев, 2003, с. 15-37].

08.12.1988 г. Произошло *разрушительное землетрясение с очагом вблизи г. Спитак* (Армения). Многочисленные свидетельства крутильных колебаний поверхности грунта при землетрясении отчетливо проявились массовыми поворотами архитектурных памятников, надгробных камней и характерными разрушениями торцевых и центральных частей зданий и сооружений [Клячко, 1999]. Такие же поворотные движения наблюдались и при землетрясениях в других местах планеты [Викулин, 2008; Вихри, 2004].

1995 г. *Н. Сигачева* в соавторах (МГУ) показали: «спиралевидно-скручивающее движение» может рассматриваться как «механизм самоорганизации геологического пространства» [Хаин, Полетаев, 2007, с. 17].

1999 г. Положено начало инструментальной «вихревой» сейсмологии: впервые в мировой практике приборами были *зарегистрированы* крутильные колебания грунта в ближней зоне очага землетрясения Chi-Chi на Тайване с $M_w = 7,6$ [Huang, 2001; Takeo, 1998].

2003 г. 23.03. *Начало нового витка развития вихревых представлений - вихревой геодинамики:* в Институте вулканической геологии и геохимии ДВО РАН в Петропавловске-Камчатском состоялся, по-видимому, первый тематический научный семинар «Вихри в геологических процессах». По результатам семинара в 2004 г. вышел в свет одноименный сборник научных работ [Вихри, 2004; Хаин, Полетаев, 2007, с. 19].

Выходит в свет *Геолого-геофизический атлас Тихого океана* [Международный, 2003], в котором на основании данных многолетних *детальных инструментальных исследований различных геофизических полей* показывается, что расположенные в юго-западной части Тихого океана *плиты* Пасха и Хуан-Фернандос (размеры в поперечнике составляют 300–400 км) *вращаются*. Плита Пасха за время своей жизни (около 5 млн. лет) *повернулась почти на 90°*, что позволяет такое движение плит считать *непрерывным* (в геологическом смысле). При этом изолинии всех геофизических полей, отражающих такое поворотное движение этих плит, представлены спиральными линиями.

Выход в свет монографии *В.А. Ацюковского* «Общая эфиродинамика» [Ацюковский, 2003], в которой приводится обстоятельный обзор работ по вихревым движениям и, в частности, отмечается следующее. Многие задачи вихревого движения сред не решены до сих пор. Далеко в неудовлетворительном состоянии находится теория пограничного слоя. Практически полностью отсутствуют решения в области взаимодействия винтовых газовых потоков. Никогда не рассматривались задачи, связанные с взаимопроникновением вихревых потоков в разреженных газах, с

взаимодействием сверхплотных винтовых газовых структур типа винтовых вихревых тороидальных колец и др.

Согласно [Ацюковский, 2003, с. 251-253], далеко не все предсказания квантовой механики сбылись. Например, не все микрообъекты следуют «всеобщему» принципу корпускулярно-волнового дуализма. Полностью отсутствуют представления о характере ядерных сил, о природе слабых взаимодействий и много еще о чем. Все это свидетельствует о том, что методы квантовой механики в значительной степени себя исчерпали и на этом пути вряд ли возможно дальнейшее продвижение в глубь материи. И все это связано с тем, что квантовая механика отвергла саму возможность существования каких-либо физических механизмов внутри явлений микромира, заменив физическую сущность абстрактной математикой.

Несмотря на то, что положения квантовой механики считаются экспериментально подтвержденными, она не в состоянии ответить на вопросы, почему все это так происходит, в чем заключается механизм квантования энергии и др.

Представление о физическом вакууме, т.е. не пустой пустоте, вызывает вопросы, на которые квантовая механика и квантовая теория поля не в состоянии дать ответ. Вся философия квантовой механики должна быть подвергнута ревизии.

Выход в свет монографии *Р.М. Бембеля, В.М. Мегери, С.Р. Бембеля* [2003] «Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов», в основе которой заложено утверждение: «кручение как одно из важнейших свойств Мироздания лежит в основе современной концепции спин-торсионного взаимодействия» [с. 18].

2007 г. Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова (геологический факультет) и Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН выпущен второй «вихревой» тематический сборник «Ротационные процессы в геологии и физике» под редакцией академика Е.Е. Милановского. В этом сборнике вихревые движения рассмотрены широко: анализировалась их роль в процессах, протекающих в микромире, во Вселенной, галактиках, планетах Солнечной системы, геофизике, геологии, включая зарождение жизни и развитие социума [Ротационные, 2007; Хаин, Полетаев, 2007, с. 19].

27.01–02.02.2008 г. 41-е совещание по тектонике, многие доклады которого были посвящены проблемам ротационных и вихревых тектонических движений, а также влиянию космических факторов на геодинамические процессы, протекающие на Земле.

В ряде сообщений были представлены оригинальные подходы к построению новой, по сути, вихревой парадигмы геологии.

Развитие представлений об эфире, вакууме, торсионных полях, информации и сознании

*«... то, что в физике считали пустотой,
на самом деле является некой средой.
Назовем ли мы ее по старинному «эфиром»
или же более современным словом «вакуум»,
от этого суть дела не меняется...»*

*Д.И. Блохинцев, 1952
(по [Николаев, 2002, с.3])*

*«До начала 1950-х гг. я был захвачен
идеями, что «все - это частицы»...
Второй период я называл «все – это поля» ...
Теперь я захвачен новой идеей:
«все – это информация»»*

*Д.А. Уиллер, 1998
(по [Доронин, 2007, с. 169-170])*

Обзоры и описания теорий и моделей эфира приведены в многочисленных источниках [Ацюковский, 2003; Кудрявцев, 1956а, б; Кузнецов, 1963; Уиттекер, 2004; Эйнштейн, 1965, 1966а]. Ниже приведем краткую «выжимку» основополагающих данных такого рода.

Из цитат, начинающих этот раздел, следует, что и возникновение и развитие представлений об эфире (и вакууме), по самой своей сути, неразрывно связаны с концепциями пространства, времени и материи, в первую очередь, с ее «атомным» строением. Обзор этого раздела следует рассматривать как дополнение к общему обзору, приведенному выше.

Ряд исследователей истории эфира и развития физических представлений приписывают введение в естествознание идеи эфира Р. Декарту (1596-1650), а идеи атомизма Демокриту (470-380 до н.э.). Тем не менее, следует считать, что и понятие эфира, как мировой среды, и понятие атомов – элементов вещества, были известны задолго до этого и сопровождали практически всю известную ныне историю человеческой цивилизации [Ацюковский, 2003, с. 46]. И задумываться над смыслом своего существования и над истоками «разума» человек стал очень давно, задолго до того, как он стал *Homo sapiens* [Годфруа, 1996].

Древний период

*«Единый эфир пронизывает всю Вселенную»
Древнекитайский даосизм
(по [Ацюковский, 2003, с. 46])*

400 тыс. лет назад. Черепа синантропов (*Homo erectus*, живший в Китае) располагали в могилах определенным образом, но перед этим большая их часть, очевидно,

подвергалась ритуальному каннибализму: затылочное отверстие этих черепов расширено, и это позволяет предполагать, что мозг умерших извлекали, а затем поедали. Такие обычаи наводят на мысль, что люди еще в те времена задумывались над судьбой человека после смерти; и, самое главное, это указывает на то, что они подозревали существование «разума» или «духа», который можно приобрести подобным образом [Годфруа, 1996, с. 82-83].

3 – 1 тыс. лет до н.э. Достаточно условно можно принять, что первые признаки цивилизованной жизни начались одновременно в нескольких местах: в Месопотамии по берегам рек Тигр и Евфрат, в Египте на берегу Нила, в Индии на реке Ганг и в Китае на реках Хуанхэ и Янцзы. Этапы развития этих цивилизаций во многом были сходны, несмотря на то, что Ближний и Дальний Восток разделены многими тысячами километров морских и сухопутных путей [Исаков, 2004б, с. 16].

«Вера в магию владела умами» древних египтян «с самого раннего и до последнего периода их истории». В этой связи «эмпирическая физика», слитая с магическими предписаниями, не получила дальнейшего развития. Но эти же обстоятельства и предопределили формирование «вихревой атомарной» гипотезы у Демокрита, обучавшегося у потомков древних египтян.

Памятники культурных ремесел, искусства и архитектуры, относящиеся ко II тысячелетию до н.э., свидетельствуют о том, что Китай той эпохи по уровню развития «эмпирической физики» мало чем отличался от Шумеро-Вавилона, Ассирии или Египта. До нас пока не дошло каких-либо доказательств существования в Китае того времени физических учений [Дорфман, 2007а, с. 17-21].

Получают свое развитие физические воззрения в древней Индии [Дорфман, 2007а, с. 29-34].

Все техники гадания имели целью обнаружение «знаков», дешифровка которых производилась по некоторым традиционным правилам. Т.о., *мир открывался уже структурированным и управляемым законами*. Расшифровав знаки, человек достигал знания будущего, или, иначе говоря, «овладевал» *временем*, поскольку он предвидел события, которые должны были произойти. ... Похоже, что приблизительно к 1500 г. до н.э. творческая эпоха месопотамской мысли завершилась. В течение последующих десяти веков интеллектуальная деятельность сводилась, по всей видимости, к упражнению эрудиции и компиляции [Эллиаде, 2001, с. 81].

Эллада, древние Китай и Индия

*«Материя не отлична от пустоты.
Пустота не отлична от материи.
Материя – это и есть пустота.
Пустота – это и есть материя»
Будда Гаутама (623 – 544 гг. до н.э.)
(по [Заречный, 2007, с. 9])*

7 – 6 вв. до н.э. Возникшая в некоторых мелких государствах Китая и Индии «эмпирическая физика» начала переходить в натурфилософские и отчасти физические учения [Дорфман, 2007а, с. 34; Исаков, 2004б, с. 34-42].

7 – 2 в. до н.э. Как в древнеиндийских, так и в древнегреческих натурфилософских учениях, атомное строение материи мотивировалось чисто логическими абстрактными

аргументами. Однако надо полагать, что сама догадка об атомном строении вещества ведет свое начало не от отвлеченных рассуждений, а от какого-то конкретного материально-производственного опыта, возможно, весьма сходного у обоих этих народов в их первобытном существовании.

Принципы атомизма появляются в более поздние времена также в таких неортодоксальных индийских философских учениях, как «джайнизм» и «буддизм», но здесь речь идет уже не об атомизме вещества, а об атомизме силы, энергии и т.д. [Дорфман, 2007а, с. 29-32].

В Древнем Китае и Античных Греции и Италии практически в одно и то же время существуют и развиваются явно не зависимо друг от друга и без взаимного общения два научных центра мировой цивилизации. Объектом исследования является природа, которая древним представлялась *единой* и не делилась на живую и неживую [Исаков, 2004а, с. 200 – 231].

6 – 5 вв. до н.э. *Анаксимандр* (610-546 до н.э.), ученик Фалеса. В своем сочинении «О природе» Анаксимандр сформулировал проблему, получившую название «Анаксимандров вопрос». Он исходил из идеи о высшем начале (архе) всех вещей. Это архе порождает их всех из себя, содержит их всех в себе и объемлет со всех сторон. Задавшись вопросом о том, каким же должно быть такое высшее начало всего и всех вещей, Анаксимандр пришел к убеждению, что таковым может быть только самое беспредельное нечто во Вселенной, названное им «апейрон» [Бембель, Мегеря, Бембель, 2003, с. 10]. Или в позднейшем наименовании *эфир* – вечная неопределенная материя, порождающая бесконечное многообразие сущего [Ацюковский, 2003, с. 48-50].

Как видим, эфир имеет достаточно древнюю историю, восходя к самым началам известной истории человечества.

Анаксимен (585-525 до н.э.), ученик Анаксимандра, этим первоначалом считал газ («воздух»), путем сгущения и разряжения которого возникают все вещи [Ацюковский, 2003, с. 49].

Пифагор (570 – 497 до н.э.) - древнегреческий мыслитель, религиозный и политический деятель [Энциклопедия, 2007, с. 45-46], родоначальник итальянской философии. Он первым назвал небо мирозданием. Фаворин говорил, что Пифагор стал употреблять определения для математических предметов. Говорят, он первый заявил, что душа совершает круг неизбежности, чередой облекаясь то в одну, то в другую жизнь. Живет все, что причастно к теплу, поэтому живыми являются и растения; душа, однако, есть не во всем. Душа есть отрывок эфира, как теплого, так и холодного. Душа не то же, что жизнь: она бессмертна, ибо то, от чего она оторвалась, бессмертно. Живые существа рождаются друг от друга через семя – рождение от земли невозможно [Диоген, 1979, с. 332-346, 449-461]. Главным достижением созданной Пифагором теории было то, что он впервые, хотя и на мистической основе, понял, что мир может быть описан количественно [Исаков, 2004б, с. 53].

Пифагор высказал мысль о том, что Земля имеет форму шара [Трухин, Показеев, Куницын, 2005, с. 13].

Ксенофан (ок. 570 - после 478 до н.э.) итальянский философ, учил о единстве, вечности и неизменяемости сущего [Советский, 1985, с. 661]. Он утверждал, что есть четыре основы сущего, что миры бесчисленны, но неизменны. *Сущность бога шаровидна* и нисколько не схожа с человеком; он весь – зрение и весь – слух, но дыхания в нем нет; и он весь – ум, разумение и вечность. Он же первый сказал, что все возникающее подвержено гибели и что душа есть дыхание [Диоген, 1979, с. 463].

Парменид (вторая половина 6 в. – начало 5 в. до н.э.) итальянский философ, мир представлял в виде неподвижного и сплошь заполненного шара [Философский словарь, 1975, с. 306-307]. Критерием истины называл он разум, в чувствах же, - говорил он, - точности нет. Он первый заявил, что земля шаровидна и что место ее в середине. Существует две основы, огонь и земля, и первый служит творцом, вторая веществом. Род

человеческий первое начало свое имеет от солнца, но жар и холод, из которых все состоит, сильнее и солнца [Диоген, 1979, с. 365-366].

Гераклит из Эфеса (ок. 535 – 475 гг. до н.э.) – древнегреческий философ-материалист, один из крупнейших представителей новой ионийской школы философии. Первоначалом всего считал огонь. Ему принадлежит знаменитое изречение: «Нельзя дважды войти в одну и ту же реку». Главный труд философа – книга «О природе». Основная идея книги заключается в том, что в природе нет ничего постоянного. Все подобно течению реки, в которую нельзя войти дважды [Энциклопедия, 2007, с. 39-40].

Лао-цзы (579 – 499 гг. до н.э.) – древнекитайский философ-мудрец, автор классического даосского трактата «Дао де цзин» («Книга о Пути и благой силе»). Основное понятие трактата – Дао – недоступное познанию и невыразимое в словах начало, в котором воплощено единство бытия и небытия и разрешаются все противоречия [Энциклопедия, 2007, с. 45-46].

5-4 вв. до н.э. *Анаксагор* (5 в. до н.э.) - древнегреческий философ. Выдвинул учение о неразрушимых элементах – «семенах» вещей (позже названных гомемериями). Движущим принципом мирового порядка считал ум, организующий элементы [Советский, 1985, с. 53].

Мелисс (5 в. до н.э.) - итальянский философ. Его мнение было, что Вселенная беспредельна, неизменна, недвижна, едина, подобна самой себе и полна; движения нет, лишь кажется, будто оно есть. Даже о богах, по его словам, высказываться не подобает, ибо познание их невозможно [Диоген, 1979, с. 366].

Демокрит из Абдери (ок 470 или 468 – ок. 370) - итальянский философ, сначала был учеником каких-то (потомков древнеегипетских) магов и халдеев, потом учеником Левкиппа [Ацюковский, 2003, с. 49, 243-244; Диоген, 1979, с. 369]; один из основателей античной атомистики. Сам Демокрит не приписывал себе авторства атомизма, упоминая, что атомизм заимствован им у мидян, в частности у магов – жреческой касты, одного из шести племен, населявших Мидию, северо-западные области Иранского нагорья [Ацюковский, 2003, с. 49, 244].

Платон (428/427-347 до н.э.) - древнегреческий философ, ученик Сократа, заявлял, что есть два начала всего – бог и вещество; Бога он называл также умом и причиной. Мир состоит из огня, воды, воздуха, земли; из огня – чтобы быть видимым, из земли – чтобы быть твердым, из воды и воздуха – чтобы быть связным (ибо твердые силы связуются двумя промежуточными, чтобы из Всего возникло Единое), и, наконец, из всех вместе – чтобы быть завершенным и безущербным.

Время порождено как образ вечности. Но вечность пребывает вечно, время же есть обращение неба: частицы времени суть ночь, день месяц и прочее, и поэтому вне природы мира нет и времени, но вместе с миром существует и время. Для порождения времени порождены солнце, луна и планеты. Чтобы число времени года было явно для глаза и чтобы живые существа были причастны числу, Богом возможен свет солнца. На кругу, ближайшем к земле, находится луна, на следующем – солнце, на дальнейших – планеты.

Мир всецело одушевлен, ибо он связан с одушевленным движением. А для того чтобы мир, порожденный наподобие умопостигаемого живого существа, нашел свое завершение, была порождена природа всех остальных живых существ, ибо если она есть в том мире, то должна быть и в небоздании.

Вещество движется, ибо сила в нем неравномерна, и движет оно в свою очередь свои порождения. Движутся они сперва бестолково и нестройно, но когда начинают составлять мир, то принимаемое от бога делает их движение расширенным и стройным [Диоген, 1979, с. 150-181].

Диоген Аполлонийский (4 в. до н.э.) древне греческий философ-физик, пользовавшийся большой известностью. Мнения его таковы. Основую является воздух; миры беспредельны и пустота беспредельна; воздух, сгущаясь и разряжаясь, порождает миры. Из несуществующего ничто не возникает и в несуществующее ничто не

разрушается. Земля кругла и утверждена посередине, составлялась она из теплого круговращения, а затвердела от холода [Диоген, 1979, с. 377].

Аристотель (384-322 до н.э.). В физике Аристотель особенно превзошел всех изысканиями о причинах вещей: даже для самых малых вещей он открывал причины. Стихий существует четыре, а кроме них – пятая, из которой состоят эфирные тела; и движение у нее особенное, а именно кругообразное [Диоген, 1979, с. 205-215].

Опыт познания духовной жизни первым обобщил Аристотель, систематически изложивший накопленные факты в трактате «О душе». Систематизируя науки, он прежде всего выделил среди них физику, а психологию с прочими «второстепенными» науками отнес к метафизике, что означало «после физики» [Перевозчиков, 1989, с.38].

Зенон из Китиона (336 или 332 – 264 или 262 до н.э.), древнегреческий философ, основал около 300 г. в Афинах школу стоиков. Стоицизм возродил учение Гераклита: мир – живой организм, пронизанный творческим первоогнем; вещи и события повторяются после каждого периодического воспламенения и очищения космоса [Советский, 1985, с. 461, 1270].

Рассуждения о физике стоики подразделяют на: тела, начала, основы, боги, пределы, пространство и пустота. Это деление видовое, а родовое деление физики – на три области: о мире, об основах и о причинах.

Основа есть то, из чего первоначально возникает все возникающее и во что оно, в конце концов, разрешается. Четыре основы составляют бескачественную сущность – вещество. Огонь есть горячая основа, вода – влажная, воздух – холодная, земля – сухая. Самое верхнее место занимает огонь, называемый эфиром, и в нем прежде всех возник круг неподвижных звезд, потом – круг планет, затем – воздух, потом – вода и в основание всего – земля, середина всего.

Вещество есть то, из чего возникает все. Вещество поддается изменению – будь оно неизменяемо, из него ничего не могло бы возникнуть. По этой причине оно делимо до бесконечности (*Хрисипп* (3 в. до н.э.) говорит не о «делимости до бесконечности», а о «бесконечной делимости»).

Мир един и шарообразен с виду, потому что такой вид удобнее всего для движения. Мир, по учению стоиков, подвержен гибели, как все, имеющее начало. Начало мира было тогда, когда сущность из огня через воздух обратилась в воду, самые плотные части которой сгустились потом в землю, самые тонкие образовали воздух, а истончаясь еще того более, - огонь. А потом уже из смешения этих основ явились растения, животные и прочие породы.

Мир – это живое существо, разумное, одушевленное и мыслящее. Живое – это значит: сущность одушевленная и чувствующая; в самом деле, живое лучше, чем неживое; но лучше мира нет ничего; стало быть, мир есть живое существо. Одушевленное – это ясно из того, что наши души представляют собой его осколки.

Мир конечен, пустота бесконечна.

Среди светил, иные неподвижны и совершают оборот вместе со всем небом; иные же (а именно планеты) движутся собственными движениями. Солнце совершает путь по кривой через зодиак; подобным же образом и луна движется по спирали. Солнце есть чистый огонь; оно больше земли; оно шарообразно, как и весь мир.

Звезды тоже шарообразны, как и Земля, но Земля неподвижна. Луна своего света не имеет, а принимает солнечный, который на нее светит.

Расположение мира стоики принимают такое. Земля находится посередине, соответственно средоточию; следом за нею – вода, шарообразно облегающая землю, как свое средоточие, так что земля находится в воде; следом за водою – воздух, тоже шарообразно расположенный. Небесных кругов имеется пять. Первый – полярный, видимый всегда. Второй – летний тропик. Третий – равноденственный. Четвертый – зимний тропик и пятый – противоположный, невидимый. Круги эти называются

параллельными, потому что наклона друг к другу не имеют, а очерчены вокруг общей середины.

Такова у стоиков физика [Диоген, 1979, с. 281-317].

2 в. н.э. В одном из гностических папирусов описываются приемы гипнотизирования, известные жрецам Египта и Греции [Перевозчиков, 1989, с.38].

Средние века

*«Все в мире повторяется»
Бэкон Роджер (1214-1294)
(по [Энциклопедия, 2007, с. 221])*

*«Природа едина и материальна...
Жизнь царит повсюду во Вселенной...
Природа и ум – едины»
Джордано Бруно (1545-1600)
(по [Лункевич, 1960а, с. 298-302])*

8 – 13 вв. Согласно [Lasswitz, 1890], лидер одной из арабских сект Майонид (1135-1204) отстаивал учение, в котором арабская атомистика «отличается от теории Демокрита ... атомы – это чистые вещества; их величины и свойства суть случайности, определяемые богом. Реальное вещество здесь исчезает» [Джуа, 1966, с. 40], превращаясь, по сути, в эфир.

1417 г. Поэма *Лукреция Кара* (1 в. до н.э.) «О природе вещей» была вновь открыта для европейских читателей.

15 в. Относительно делимости вещества Джордано Бруно (1548-1600) в противоположность аристотелевской теории утверждал, что оно не может продолжаться до бесконечности. Для обоснования этого Бруно ввел представление о существовании между атомами *вакуума* или *эфира*, мирового духа, проникающего в каждое тело. Эфир Бруно есть небо, бесконечное пространство, неизменное и неразрушимое, как и атом.

Вакуум (от латинского *vacuum* - пустота) – состояние газа при давлении меньше атмосферного. Однако, введенное Д. Бруно понятие, по сути, близко *вакууму физическому* [Физический, 1983, с. 61].

Джордано Бруно, подобно Кузанскому (1401-1464), утверждал относительность познания, и его атомистические труды не погибли полностью, а послужили тропинкой, ведущей от античности к научному возрождению в XVII в. [Джуа, 1966, с. 79-80].

1608 г. Последователи *Парацельса* (Филипп Ауреол Теофраст Бомбаст фон Гогенгейм, 1493-1541), по словам Герцена – первого от сотворения мира профессора, *У. Гельмонт* и *Ф. Флюид* утверждают, что человек может оказывать влияние на организм и психику посредством таинственной «жизненной силы», истекающей якобы из рук, глаз и других органов тела. Влияние флюида на живое, по их мнению, сродни действию магнита. Впоследствии флюид был переименован в «животный магнетизм», а лиц, передающих пациентам целительный магнетизм, назвали магнетизерами.

1646 г. Немецкий ученый *А. Кирхер* положил начало учению о «животном магнетизме».

1775 г. Венский врач *Ф.А. Месмер* впервые сформулировал концепцию «животного магнетизма» и применил ее на практике [Перевозчиков, 1989, с.38].

1632-1638 гг. Немецким военным инженером *Отто фон Герике* (1602-1686) открыта новая область экспериментальных исследований – пневматика. Герике пытался с помощью ручного водяного насоса удалить всю воду из наполненной до отказа бочки и создать в ней таким образом «пустое пространство». Постепенно в результате собственных опытов, независимо от Торричелли и Паскаля, Герике пришел к открытию атмосферного давления [Дорфман, 2007а, с. 172-174].

1638 г. В учебнике *Иоганна Шнерлинга* «Наставления физики» появилось решительное утверждение: «Учение об атомах не столь ужасно, как это кажется многим ... Ничего не стоит сказать, что Эпикур бредил, что Демокрит безумствовал, что древние были дураками. Истина зависит от вещей, а не от человеческих мозжечков» [Дорфман, 2007а, с. 181].

1654 г. *Робертом Бойлем* (1627-1691) предпринята попытка доказать присутствие эфира в пустом сосуде. Никакого эфира не существует, сделал вывод Бойль. Пустое пространство он решил назвать вакуумом, что по латыни означает «пустой» [Исаков, 2004б, с. 151].

1669 г. Следующий выдающийся шаг в области пневматики был сделан замечательным английским физиком *Робертом Бойлем*. Р. Бойль осуществил опыт по изучению падения легких тел в воздухе и вакууме, отметив их отличие. Впервые исследовал колебание маятника в вакууме и вопрос о прекращении звучания колокольчика с понижением давления воздуха. Попытался выяснить, остается ли в вакууме некая «тонкая материя», т.е. эфир. Разумеется, этот опыт оказался безрезультатным.

Рассматривая полемику между «вакуистами» (т.е. сторонниками пустоты) и «пленистами» (сторонниками заполнения пустоты эфиром), Бойль подчеркивает, что «пленисты» (картезианцы) утверждают невозможность существования пустот не на основании экспериментов или явлений природы, которые бы отчетливо и непосредственно доказывали справедливость их гипотез, а на основании своего собственного понятия о теле, природа которого заключается, по их мнению, только в протяжении. Но сказать, что пространство освобождено от тела, это значит, по воззрениям картезианцев, допустить логическое противоречие между определяемым словом и самим определением. Такой подход к вопросу о вакууме скорее метафизический, чем физиологический, т.е. физический, заключает Бойль.

Таким образом, изучение вакуума (и пневматических явлений) привело к исключительно важным научным результатам: идея о «боязни пустоты» в результате многочисленным экспериментальных исследований, фактически, полностью рухнула уже к середине XVII века [Дорфман, 2007, с. 174-178].

Эпоха Возрождения

*«Материя неба должна вращать планеты не
только вокруг Солнца, но и вокруг собственной оси»*

Р. Декарт, 1644
(по [Слензак, 1972])

« ... и все-таки, она вертится»
Галилео Галилей, 1633

1672 г. Впервые *И. Ньютон* (1643-1727) высказывает гипотезу эфира в ответе на полемические замечания Гука на «Теорию света и цветов Ньютона» [Ацюковский, 2003, с. 411].

1673 г. *Х. Гюйгенс* (1629-1695) развил учение о колебаниях, решил задачу о центре качаний. «Гюйгенс предложил другую (отличную от Декарта и Ферма) интерпретацию оптических явлений, основанную на понятиях волны и волновой поверхности» [Бройль, 1965, с. 34]. В 1658 г. Гюйгенс получил патент на маятниковые, невиданно точные часы [Дорфман, 2007а, с. 169], в которых использовался принцип изохронности колебаний Галилея [Исаков, 2004б, с. 139].

1679 г. *И. Ньютон* в письме к Р. Бойлю уточняет свои пять представлений об эфире. Представляется, что по всему пространству рассеяна эфирная субстанция, способная к сжатию и расширению и чрезвычайно упругая «во всех отношениях похожая на воздух, но только значительно более тонкая». Предполагается, что эфир проникает во все тела, но в порах тел он реже, чем в свободном пространстве. Предполагается, что разреженный эфир внутри тел и более плотный вне их, переходят друг в друга постепенно. Предполагается, что при сближении тел эфир между ними становится реже, чем прежде, и область постепенного разрежения простирается от поверхности одного тела к поверхности другого. Из предыдущего предположения следует, что при сближении тел и при разрежении эфира между ними при тесном сближении должно появиться сопротивление этому и стремление тел отойти друг от друга.

Как видно, ньютоновские представления об эфире носят чисто качественный и во многом противоречивый характер. Это можно объяснить тем, что, правильно предположив структуру эфира газоподобной, Ньютон не имел возможности развить эту идею, поскольку свойства газов в те времена были не изучены. Результатом стали разные противоречия и Ньютон отказался от самой идеи попытаться найти физические основы тяготения [Ацюковский, 2003, с.449-450].

1686 г. *Х. Гюйгенс* был твердо убежден в справедливости идеи эфирных вихрей как единственного пути для объяснения системы Коперника с помощью механической модели [Дорфман, 2007а, с. 169].

1687 г. Выход в свет работы *И. Ньютона* «Математические начала натуральной философии», в которой было дано строгое научное описание Мира.

Обычно думают, что физика Ньютона не знала эфира и что только волновая теория света ввела вездесущую среду, обуславливающую физические явления. Однако это не так. В указанном смысле механика Ньютона имела свой «эфир», который назывался, разумеется, «абсолютным пространством» [Эйнштейн, 1966а, с. 154].

Нужно заметить, что *И. Ньютон* многое предвосхитил на качественном уровне в определении свойств эфира, хотя и путал плотность эфира (разряжение) с давлением в нем [Ацюковский, 2003, с. 51-52].

1690 г. В работе *Х. Гюйгенса* «Трактат о свете, в котором объяснены причины того, что с ним происходит при отражении и преломлении и, особенно, при странном преломлении в исландском кристалле» впервые детально разработана теория продольных волн. Этот трактат замечателен еще и тем, что в нем впервые в истории физики вся совокупность известных в ту эпоху оптических явлений последовательно объяснялась с единой точки зрения – с позиции волновой природы света. Гюйгенс полагает, что световые волны распространяются в чрезвычайно тонкой материи, пронизывающей все тела, именуемой «эфиром». Частицы эфира должны быть по этой гипотезе много мельче атомов. Эфирные частицы состоят из материи, которая обладает «совершенной твердостью» и высокой упругостью [Дорфман, 2007а, с. 201].

1704-1706 гг. *И. Ньютон* фактически отказывается от попыток объяснения описания оптических явлений с помощью эфира. Если в первом издании «Оптики» в 1704 г. эфир просто замалчивается, то в издании 1706 г. он резко отрицается [Ацюковский, 2003, с. 412].

1717 г. На 75-м году жизни *И. Ньютон* вновь ставит вопрос эфире - об его атомистическом строении [Ацюковский, 2003, с. 51-52].

Как видим, о самом факте существования эфира и о его структуре *И. Ньютон*

много раз менял свою точку зрения [Вавилов, 1943]. Как и А. Эйнштейн, как мы увидим далее.

Разделение натурфилософии на естественные науки

*«... механика Ньютона имела свой «эфир»,
который назывался «абсолютным пространством»
«Об эфире», 1920, А. Эйнштейн [1966а]*

18 в. Характерной особенностью, фундаментальным отличием физики XVIII в. является ее эмансипация и превращение в самостоятельную, самодовлеющую науку [Дорфман, 2007а, с. 263].

Первая половина 18 в. Эфир *М.В. Ломоносова* (1711-1765). М.В. Ломоносов, будучи ученым-материалистом, не мог представить себе дальное действие тяготения без материального посредника. Он не мог представить движения без материи и материи без движения и с этих позиций попытался высказать гипотезу о механизме тяготения. Он предложил, что всю Вселенную наполняет некая «тяготительная» материя, которая находится в постоянном движении, ее частицы движутся во всех направлениях. На данное тело они попадают равномерно со всех сторон. Если в среде такой материи представить два тела, то они будут взаимно экранировать поток частиц, направленный на них, давление со стороны экранирующего тела уменьшится и, значит, тела начнут сближаться, толкаемые частицами. Ломоносов считал, что «познав причину тяготения, можно будет расчленивать различия удельного веса тела» и объяснить явления и поныне непонятные: действие на расстоянии, мгновенность распространения [Грушинский, 1976, с. 134].

1736 - 1760 гг. Физические исследования *Л. Эйлера* (1707-1783) посвящены механике, оптике, акустике, теплоэлектричеству, математической физике. Он пытался построить единую картину мира и физических процессов. По Эйлеру все явления – это взаимодействие «грубой» материи и более «тонкого» вещества, менее плотного, но более упругого – эфира. Механические перемещения эфира создавали, по мнению Эйлера, все разнообразие явлений природы. По мнению *С.И. Вавилова* (1891-1951), Эйлер первый написал уравнение плоской гармонической волны. Эйлер установил закон сохранения момента количества движения, развил теорию моментов инерции, заложил основы преобразования механики из геометрической в аналитическую. Занимался теорией теплоты, считая, что «теплота является некоторым движением мельчайших частиц тел», исследовал природу электричества и пытался объяснить электрические явления, развил теорию магнетизма, основанную на вихрях [Храмов, 1983 с. 308].

1755 г. Выход в свет космогонической гипотезы «холодного» происхождения солнечной системы из первоначального газопылевого облака, разработанной профессором Кенигсбергского университета *И. Кантом* (1724-1804).

1796 гг. Математик и астроном *П. Лаплас* (1749-1827) строит небулярную гипотезу, фактически, являющуюся продолжением вихревых эфирных гипотез древних магов – Демокрита – Декарта – Гюйгенса – Канта.

19 – начало 20 вв. Длительный период накопления знаний об электричестве и магнетизме, начатый в 16-17 вв., завершается великолепными исследованиями, выполненными *Б. Франклином* (1706-1790), *М.В. Ломоносовым* (1711-1765), *Г.В. Рихманом* (1711-1753), *Ш. Кулоном* (1736-1806), *А. Вольты* (1745-1827) и другими. Эти работы получили многочисленные практические внедрения во многих разработках,

которые, в том числе, нашли широкое применение в промышленности. И при всем этом практически никто не знал, какова суть электричества и магнетизма, *что* они собой представляют, в чем заключается их физическая природа. Так или иначе, все исследователи этих явлений вынуждены были привлекать к рассмотрению представления об *эфире*, движения которого, по их мнению, и лежали в основе электромагнетизма [Ацюковский, 2003, с. 297-298].

Согласно [Ацюковский, 2003, с. 53-73] развитие представлений об эфире происходило следующим образом.

По *О.Ж. Френелю*, одному из основоположников волновой оптики, создателю теории дифракции света, эфир представляет собой сплошную упругую среду, в которой находится вещество частиц атомов, в общем, никак не связанных с этой средой. Роль эфира – передача механических колебаний и волн [Советский, 1985, с. 1426].

Майкл Фарадей (1791-1867), уверенный в существовании эфира («мирового эфира»), представлял его как совокупность неких силовых линий. Фарадей категорически отрицал возможность действия на расстоянии («action in distance») через пустоту – точка зрения многих физиков того времени. По мнению Фарадея, магнетизм является более универсальным явлением, нежели электричество, при этом криволинейность магнитных силовых линий он считал признаком того, что сила является результатом процесса [Низовцев, Бычков, 2007].

Джеймс Максвелл (1831-1879), создатель классической электродинамики, один из основоположников статистической физики, в своих работах делает вывод о распространении возмущений от точки к точке в мировом эфире, по сути - о близкодействии. При этом «в каждой точке среды существует нечто такое, что имеет природу *угловой скорости* относительно оси, направленной вдоль магнитной силы» [Максвелл, 1989, с. 821].

1808 г. *Эмалюсом* предложен термин «поляризация света» [Ацюковский, 2003, с. 412].

1818 г. *О.Ж. Френель* (1788-1827) занялся важной проблемой влияния движения Земли на распространение света. На основании этих наблюдений Френель создал теорию о частичном увлечении светового эфира движущимися телами [Ацюковский, 2003, с. 412-413].

1826 г. В Париже вновь создана медицинская комиссия для исследования месмеризма. Комиссия подтвердила эффект ясновидения и замечательных исцелений, достигнутых месмеризмом. Однако после резкого возражения медицинского факультета отзыв был опубликован лишь неофициально.

1843 г. Английский хирург *Дж. Брайт* описывает процесс принуждения чужой воли и называет его гипнозом, от греч. «гипнос» - сон [Перевозчиков, 1989, с.39].

1845 г. *Д.Г. Стоксом* (1819-1903), автором фундаментальных работ по гидродинамике, была высказана мысль об увлечении Землей окружающего эфира.

Г.Р. Герцем (1857-1894), экспериментально доказавшим существование электромагнитных волн, была выдвинута идея о полном захвате эфира материей [Советский, 1985, с. 296].

Эфир Френеля – это абсолютно неподвижный эфир. Эфир Герца обладает свойством быть абсолютно захваченным движущимся телом. Эфир Максвелла – это идеальная жидкость, в которой действуют законы вихрей Гельмгольца. Максвелл не обратил внимания на то, что, по Гельмгольцу, вихри, а у Максвелла магнитное поле – это вихревые образования эфира, они не могут ни образовываться, ни исчезать в идеальной жидкости, что явно противоречит опытам. Таким образом, идеализация свойств эфира сразу же обрекает все подобные теории на противоречия и, тем самым, на поражение.

1824-1830 гг. Параллельно с описательными концепциями эфира развивались и некоторые гипотезы, пытавшиеся «нащупать» *строение эфира*.

1824-1830 гг. Теория эфира как упругой среды предложена *Л.М.А. Навье* (1785-1836), *С.Д. Пуассоном* (1781-1840) и *О.Л. Коши* (1789-1857). Навье рассматривал эфир как несжимаемую жидкость, обладающую вязкостью. Коши рассматривал эфир как сплошную среду и оперировал напряжениями и деформациями в каждой точке пространства.

Д. Грин (1793-1841) считал эфир сплошной упругой средой, на основании чего, исходя из закона сохранения энергии, он рассмотрел отражение и преломление света в кристаллических средах. В своих работах *К.Г. Нейман* (1832-1925) исходил из предположения о постоянстве плотности эфира во всех средах.

В математических работах *Мак-Куллаха* (1809-1847) эфир рассматривался как среда, в которой потенциальная функция является квадратичной функцией *углов вращения*. Хотя теория Мак-Куллаха является теорией упругой среды, и ни о каком электромагнетизме в ней нет ни слова, полученные им уравнения, как отмечает *Х.А. Лоренц* (1853-1928), по существу, совпадают с уравнениями электромагнитной теории Максвелла.

В. Томсоном (лордом Кельвином, 1824-1907) было предложено несколько моделей эфира. Модель квазиабильного эфира требует закрепления граничных условий, что противоречит представлениям о беспредельном и безграничном пространстве Вселенной. Кроме того, Кельвин пытался рассмотреть эфир как жидкость, находящуюся в турбулентном движении; он показал, что турбулентное движение сопровождается колебательным движением.

В. Томсоном была сделана попытка построить вихревую модель фотона. Однако его модель не отвечала даже элементарным требованиям объяснения поляризации. В настоящее время удалось фотон представить в виде вихревой винтовой структуры, составленной из линейных расходящихся вихрей эфира – дорожки Кармана. Вихри, составляющие фотон, имеют винтовую структуру, следовательно, вдоль осей этих вихрей имеется ток эфира. По отношению к этому потоку вихри выступают дуплетами [Ацюковский, 2003, с. 416-418].

1849-1867 гг. Дальнейшее развитие теория получила в работе *Кельвина* «О вихревых атомах» (1867), где эфир представлен как совершенная несжимаемая жидкость без трения. Кельвин показал, что атомы являются тороидальными кольцами *Г.Л.Ф. Гельмгольца* (1821-1894). Эта идея несколько ранее выдвигалась *Р. Ранкиным* (1820-1872) в его работе «О молекулярных вихрях» (1849-1850), где автором рассматривались некоторые простейшие взаимодействия.

1865-1867 гг. «Вихревая теория *Г. Ганкелем* разработана в духе старых картезианских теорий. По Ганкелю, процесс заряжения тела заключается в возбуждении на его поверхности молекулярных вихрей: знак заряда тела определяется направлением вращения этих вихрей. Эти вихревые движения сообщаются частицам окружающего эфира, в котором возникают напряжения, приводящие в результате к притяжению и отталкиванию наэлектризованных тел. ... Именно в связи с теориями типа теории Ганкеля *Энгельс* писал, что «вихри старого Декарта снова находят свое почетное место во всех новых областях знания»» [Кудрявцев, 1956б, с. 182-183].

1871 г. «Опубликована работа *Э. Эдлунда* (1819-1888) «О природе электричества». Важным пунктом теории является допущение конечной скорости распространения электрических действий... Эдлунд все электрические явления объясняет с помощью гипотезы существования одной всепроникающей среды, которая, вероятно, является эфиром. Частицы эфира отталкиваются друг от друга, отталкивательные силы центральные, подчиняющиеся ньютоновскому закону расстояния» [Кудрявцев, 1956б, с. 183].

1875 г. Впервые обнаружена электрическая активность мозга.

1924 г. *Бергер* (*Berger*) зарегистрировал ее в виде электроэнцефалограммы [Годфруа, 1996, с. 154].

1876 г. Английский физик *У. Баррет* (1851-1925) на заседании Британской ассоциации ученых выступил с докладом о «непосредственной передаче мысли». Им положено начало систематическому исследованию случаев так называемой спонтанной телепатии.

1882 г. Группа видных ученых из Кембриджа – химик *У. Крукс* (1844-1919), физики *У. Баррет* и *О. Лодж* (1851-1940), математик *А. Морган* (1806-1871) и биолог *А. Уоллес* (1823-1913) - создают общество психических исследований [Перевозчиков, 1989, с.40].

1880-1928 гг. Школа *Дж.Дж. Томсона* (1856-1940) продолжила линию «электричество – эфир». В работах «Электричество и материя», «Материя и эфир», «Структура света», «Фарадеевы силовые трубки и уравнения Максвелла» и других Дж.Дж. Томсон последовательно развивает вихревую теорию материи и взаимодействий. Он показал, что при известных простых предположениях выражение квантового вихревого кольца совпадает с выражением известного закона Планка, связывающего энергию с частотой: $E = h\nu$. Томсон, исходя из вихревой теории эфира, показал, что $E = mc^2$. Авторство этой формулы приписывается А. Эйнштейну, хотя Дж.Дж. Томсон получил ее в 1903 г., задолго до А. Эйнштейна, а, главное, из совершенно других предпосылок, чем А. Эйнштейн, исходя, в частности, из *наличия* эфира.

Дж.Дж. Томсон, основываясь на теореме сохранения вихрей, выдвинул особую атомистическую гипотезу. Он предположил, что все пространство Вселенной заполнено эфиром – идеальной жидкостью, в которой атомы материи представляют собой бесконечно малые замкнутые вихри, зародившиеся в этой жидкости. Единственным, пожалуй, недостатком этой теории является идеализация свойств эфира, представление о нем как о сплошной идеальной несжимаемой жидкости, что привело эту теорию к некоторым существенным противоречиям.

Таким образом, В. Томсон (лорд Кельвин) и Дж.Дж. Томсон рассматривали единую материю – эфир, а различные ее проявления обуславливали различными формами ее кинетического движения.

Ряд теорий эфира был создан в России.

1854 г. Идеи *Л. Эйлера* (1707-1783) о свойствах мирового эфира оказали влияние на *Б. Римана* (1826-1866), который в своей лекции «О гипотезах, лежащих в основаниях геометрии» (1854) изложил концепцию мирового пространства, разрешив некоторые затруднения с которыми встретился Л. Эйлер.

М.В. Ломоносов (1711-1765) отвергал все специфические виды материи – теплоту, свет, признавал лишь эфир, с помощью которого он, в частности, объяснял тяготение как результат подталкивания планет частицами эфира за счет разности давлений.

Большой интерес представляла попытка *Д.И. Менделеева* (1834-1907) определить химические свойства эфира. Д.И. Менделеевым эфир был включен в таблицу химических элементов в «нулевую» строку и назван «ньютонием», впоследствии эта строка из таблицы была изъята.

1870-1880 гг. *И.О. Яровским* была предложена теория газоподобного эфира.

1890 г. *Г.Р. Герц* исходя из гипотезы, что эфир полностью захватывается движущимися телами, построил общую теорию электромагнитных явлений в движущихся телах – электродинамику движущихся сред [Храмов, 1983, с. 82].

1882 г. Выход в свет работы *Ф. Энгельса* «Диалектика природы», в которой: «Электричество – это движение частиц эфира и молекулы тел принимают участие в этом движении. ... Различные теории по-разному изображают характер этого движения, ... опираясь на новейшие исследования о вихревых движениях, видят в нем – каждая по-своему – такое вихревое движение. ... Эфирная теория ... дает надежду выяснить, что является собственно вещественным субстратом электрического движения, что собственно за вещь вызывает своим движением электрические явления» [Ацюковский, 2003, с. 305].

1897 г. Дж.Дж. Томсон открывает первую элементарную частицу – электрон. В соответствии с [Ацюковский, 2003, с. 319], электрон – винтовое вихревое кольцо уплотненного эфира.

1900 г. Монография Д. Лармора (1857-1942) «Эфир и материя» сыграла значительную роль в развитии электродинамики [Храмов, 1983, с. 155].

Революция в естествознании

*«...мы не можем в теоретической физике обойтись без эфира,
т.е. континуума, наделенного физическими свойствами»
Об эфире. 1920 г, А. Эйнштейн [1966а]*

1890-1912 гг. Имел место значительный рост авторитета науки. В этот период в физике были сделаны величайшие революционные открытия. В 1895 г. В.К. Рентген (1845-1923) открывает новые лучи, в 1896 г. А. Беккерель (1852-1908) обнаружил явление радиоактивности, за которым последовало открытие радия. В 1897 г. Дж.Дж. Томсон (1856-1940) открыл первую субатомную (элементарную) частицу – электрон, в 1900 г. М. Планк (1858-1947) пришел к первой формулировке теории квантов, в 1905 г. А. Эйнштейн (1879-1955) сформулировал специальную теорию относительности. Основной особенностью этих крупнейших новых открытий было то, что они требовали, по существу, полного пересмотра общепринятых представлений классической физики [Дорфман, 2007б, с. 157-159].

Начало 20 в. В более поздние времена, когда теория относительности была уже широко известна, некоторые советские и зарубежные ученые отстаивали механическую теорию эфира, становясь при этом на точку зрения вихревой модели. Среди этих работ необходимо отметить работы К.Э. Циолковского (1857-1935), З.А. Цейтлина, Э.Т., носящие преимущественно обзорный характер, работы Э. Уайтекера (1873-1956), Н.П. Кастерина, В.Ф. Миткевича (1872-1951) и др. [Ацюковский, 2003, с. 53-73].

1901-1929 гг. Экспериментальные данные, полученные в 1901-1905 гг. Э. Морли, в 1921-1925 гг. Д.К. Миллером и в 1929 г. А.А. Майкельсоном (1852-1931), свидетельствуют не только о факте существования в природе эфира, но и об его газоподобной структуре.

О.Д. Лодж (1851-1940) показал, что движущая материя увлекает эфир [Храмов, 1983, с. 167].

1905 г. Теорией относительности А. Эйнштейна окончательно утверждается справедливость формулы $E = mc^2$. Из этого вытекает, что масса и энергия эквивалентны и могут превращаться одна в другую. Таким образом, тело – это не только совокупность частиц, обладающих массой, которые определяют его положение в трехмерном пространстве, но также и энергия.

Вторая половина XX в. Поскольку Вселенная построена из волн и частиц, находящихся в непрерывном движении и взаимодействии, во второй половине XX в. сложилась точка зрения, согласно которой в природе существует некий всеобщий интеллект, который возрастает по мере усложнения материи – от камня до самых высокоорганизованных существ. Что касается человека, то он – всего лишь одно звено в этой огромной совокупности [Годфруа, 1996, с. 84, 205-208].

1910-1930 гг. Выходит в свет серия из пяти статей А. Эйнштейна [Эйнштейн, 1965, с. 138-164; 682-689; 1966, с. 154-160, 275-282; 283-285]. В этих работах он предпринимает попытку увязать концепцию эфира со свойствами пространства, времени, материи и поля,

как в свое время И. Ньютон, несколько раз меняет свои позиции и так не приходит к какому-то окончательному выводу. Однако некоторые из оппонентов А. Эйнштейна говорят о его рекомендации «совершенно забыть об эфире и никогда не упоминать о нем» [Николаев, 2002, с. 4]. Приведем несколько выдержек из этих работ А. Эйнштейна.

1910 г. Работа «Принцип относительности и его следствия в современной физике»: «Мы видели (из совместного анализа электродинамики Герца-Лоренца и опыта Физо – А.В.), что, допуская существование эфира, мы экспериментальным путем пришли к необходимости рассматривать эту среду как неподвижную. Затем мы видели, что обоснованная таким образом теория позволяет предсказывать основные экспериментальные факты. Тем не менее, она имеет один пробел: она не признает принципа относительности, что находится в противоречии с экспериментальными данными» [Эйнштейн, 1965, с. 145].

1920 г. Работа «Эфир и теория относительности»: «Гипотеза об эфире приобрела новую поддержку в первой половине XIX столетия, когда стало очевидным глубокое сходство между свойствами света и свойствами упругих волн в материальных телах. Стало несомненным, что свет можно представить себе как колебательный процесс в упругой среде, обладающей инертной массой и заполняющей Вселенную. Далее, из явления поляризации света с необходимостью вытекало, что эта среда – эфир – должна быть подобна твердому телу, поскольку только в твердом теле, но не в жидкости, возможны поперечные колебания. Таким образом, пришли к теории «квазиупругого светового эфира», частицы которого могут совершать лишь небольшие деформационные движения, соответствующие световым волнам» [Эйнштейн, 1965, с. 683].

1924 г. Работа «Об эфире»: «Обычно думают, что физика Ньютона не знала эфира и что только волновая теория света ввела вездесущую среду, обуславливающую физические явления. Однако это не так. В указанном смысле механика Ньютона имела свой «эфир», который назывался, разумеется, «абсолютным пространством». Чтобы ясно осознать это и вместе с тем уточнить понятие эфира, мы должны начать несколько издалека. ...

В динамике Ньютона «пространство» обладает физической реальностью – в противоположность геометрии и кинематике. Мы будем называть эту физическую реальность, входящую в закон движения Ньютона наряду с наблюдаемыми весовыми телами, «эфиром механики». Появление центробежных сил при вращении тела, материальные точки которого не изменяют взаимных расстояний, показывает, что этот эфир следует понимать не только как некое воображаемое представление теории Ньютона, но что ему соответствует в природе нечто реальное» [Эйнштейн, 1966а, с. 154-156].

1930 г. Работа «Проблема пространства, эфира и поля в физике»: «Поскольку физикам XIX столетия казалось совершенно абсурдным приписывать физические функции или состояния самому пространству, то по образцу весовой материи была придумана пронизывающая все пространство среда – эфир, предполагаемый носитель электромагнитных и световых процессов. Состояния этой среды, которые должны были отвечать электромагнитному полю, строились сначала чисто механически по образцу упругих деформаций в твердых телах. Однако полностью построить механическую теорию эфира не удавалось, и постепенно все привыкли отказываться от выяснения природы эфирных полей. Так эфир превратился в субстанцию, обладающую единственной функцией, - служить носителем электрических полей, природа которых не поддавалась дальнейшему анализу. Возникла следующая картина: пространство заполняется эфиром, в котором плавают материальные частицы или атомы весовой материи; атомистическая структура последнего уже была с достоверностью установлена наукой как раз к концу века» [Эйнштейн, 1966а, с. 278].

1930 г. Работа «Проблема пространства, поля и эфира в физике»: «Кроме понятия пространства, времени, материи, Фарадеем и Максвеллом было введено в физику новое понятие – понятие поля, которое скоро разорвало рамки механистического понимания

природы. Поля – это непрерывные образования, которые могут находиться в пустом пространстве. Различают электромагнитное и гравитационное поля: поле, образующее свет, оказывается электромагнитным. Сначала преобладало стремление понимать поле как механическое состояние некой материи, существующей всюду, - эфира. Когда это стремление потерпело неудачу, то хотя эфир и продолжал еще считаться особым веществом, состояния которого должны образовывать поле, однако механическая интерпретация его состояний была отброшена. К концу прошлого столетия Г.А. Лоренц показал, что эфиру нельзя приписывать никакого движения относительно пространства, если стремиться к правильному количественному описанию электромагнитных явлений. Конечно, к этому времени уже можно было бы отождествить пространство с эфиром, если бы не бессознательное предубеждение, что пространство должно быть абсолютным, т.е., что оно само не подвержено никаким изменениям» [Эйнштейн, 1966а, с. 284-285].

Вакуум Эйнштейна в соответствии с [Шипов, 2002, с. 22-23]: «В теории Эйнштейна имеется две реальности: пространство-время и материя. Материя выступает на фоне пространства-времени, искривляя его. Таким образом, пространство-время наделяется упругими свойствами, которые проявляются через искривление его геометрии. ... Можно теперь утверждать, что согласно теории Эйнштейна физический вакуум – это пустое (без материи) пространство-время, обладающее упругими свойствами. Эти свойства проявляются тогда, когда в пустое пространство помещается некая масса. Вакуумные уравнения Эйнштейна являются чисто геометрическими и *не содержат никаких физических констант*».

1911 г. Газета «Дейли ньюс» публикует воспоминания *Блэкберна* о первом эксперименте по передаче мыслей, поставленном на научной основе и официально засвидетельствованном.

1912 г. Русский ученый *М.В. Погорельский* пишет об универсальности физиологической энергии, которая может быть сравнима лишь с невесомым мировым эфиром, если только она не есть одно из свойств последнего [Перевозчиков, 1989, с.41].

1920 г. Ленинградский физиолог *В.М. Бехтерев* (1857-1927) приступил (вместе с дрессировщиком *В.Л. Дуровым* (1863-1934)) к исследованию экстрасенсорного восприятия. Исследования, которые до сего времени были предметом веры, становятся предметом науки и знания.

1922 г. В Москве выходит книга академика *П.П. Лазарева* (1878-1942), в которой делается вывод: «Всякое ощущение, всякий акт движения должны образовывать волны, и голова человека должна излучать волны большой длины (до 30 тыс км) в окружающую среду».

1923 г. Профессор *А.А. Гуревич* устанавливает поразительный факт, что отдельные фотоны, падая на покоящуюся клетку, могут привести ее к делению. Делящаяся клетка с помощью биополя (митогенетического излучения), в свою очередь, побуждает соседние клетки к делению.

1928 г. Итальянский невролог и физик *Ф. Кацамали* публикует результаты многолетних опытов, претендующих на открытие в пространстве вокруг головы испытуемого сантиметровых электромагнитных волн. Значимая разница контрольной и экспериментальной серий позволило предположить доказанным факт существования мысленного внушения на расстоянии.

1932 г. В Ленинградском Институте мозга профессор *Л. Васильев* начал эксперименты с целью установления физической основы телепатии [Перевозчиков, 1989, с. 41-43].

1927-1928 гг. *П. Дирак* (1902-1984) сформулировал описывающее движение электрона во внешнем силовом поле уравнение, которое стало одним из основных уравнений релятивистской квантовой механики. Уравнение описывает рождение и уничтожение электронов и позитронов в «виртуальном» состоянии – в состоянии «электронно-позитронного вакуума». Рождение и исчезновение электронов и позитронов

происходит парами. Вакуум Дираком определен как *фотонный* - как низшее энергетическое состояние электромагнитного поля. Одна из главных трудностей такого представления вакуума состоит в том, что «электронное желе» должно плотно заполнять геометрическое пространство, а это в какой-то мере воскрешает гипотезу эфира, что входит в противоречие с положениями Специальной теории относительности А. Эйнштейна [Ацюковский, 2003, 249; Павленко, 2005, с. 816].

В квантовой теории поля, в соответствии с современными представлениями [Физический, 1983, с. 61], определен *физический вакуум* – низшее энергетическое состояние квантовых полей, характеризующееся отсутствием каких-либо реальных частиц. Понятие физического вакуума является одним из основных в том смысле, что его свойства определяют свойства всех остальных состояний. В ряде случаев вакуумное состояние оказывается не единственным (т.е. вырожденным) – существует непрерывный спектр таких состояний.

Вакуум Дирака в, соответствии с [Шипов, 2002, с. 23-24], «представляет собой некоторое *латентное* (скрытое) состояние электронов и позитронов. В среднем физический вакуум не имеет ни массы, ни заряда, ни каких-либо других физических характеристик. Однако в малых пространственных областях (порядка 10^{-33} см) вакуума значения физических характеристик могут отличаться от нуля – на малых расстояниях вакуум спонтанно флуктуирует. В вакууме постоянно происходят процессы рождения и уничтожения частиц и античастиц разного сорта. Образно говоря, в малых пространственно-временных областях вакуум похож на «кипящий бульон», состоящий из элементарных частиц. Поэтому в квантовой теории и возникло представление о физическом вакууме как о «квантовой жидкости», находящейся в вечном движении. Такая жидкость, естественно, обладает упругими свойствами подобно вакууму Эйнштейна. Для физиков важным оказался вопрос, как объединить уравнения, которые описывают вакуум Эйнштейна и вакуум Дирака с тем, чтобы иметь более правильное представление о нем».

1930-1950 гг. По вопросу признания или отрицания эфира в 30-е, а затем в 50-е годы в советской науке состоялись дискуссии, выплеснувшиеся на страницы партийной печати. Эти дискуссии коснулись не только собственно эфира, но и проблем теории относительности А. Эйнштейна, а также старой проблемы «действия на расстоянии», точке зрения, согласно которой для передачи энергии взаимодействия на любое расстояние никакой промежуточной среды вообще не нужно [Ацюковский, 2003, с. 22-23].

Точку зрения существования в природе эфира, некорректности теории относительности А. Эйнштейна и непригодности принципа «действия на расстоянии» без промежуточной среды в 30-е годы отстаивали профессора МГУ *А.К. Тимирязев* (1843-1920) и *З.А. Цейтлин*, академики *А.А. Максимов* (1891-1976) и *В.Ф. Миткевич* (1872-1951). Точку зрения релятивистов, т.е. сторонников теории относительности А. Эйнштейна, категорически отрицавших эфир и признававших возможность действия на расстоянии, выражали физики *О.Д. Хвольсон* (1852-1934), *А.Ф. Иоффе* (1880-1960), *В.А. Фок* (1898-1974), *Е.И. Тамм* (1895-1971), *Л.Д. Ландау* (1908-1968), *Я.И. Френкель* (1894-1952).

В работах советского академика *В.Ф. Миткевича* не только отстаивается необходимость признания факта существования эфира, но и предлагается модель, в которую, фактически, заложены идеи Дж.Дж. Томсона. Он писал: «Абсолютно пустое пространство, лишенное всякого физического содержания, не может служить ареной распространения каких бы то ни было волн. ... Построение физической теории, охватывающей весь материал, накопленный наукой, немыслимо без признания особого значения среды, заполняющей все трехмерное пространство. ... На языке прошлых эпох, пережитых физикой, эта универсальная среда называется эфиром». В.Ф. Миткевичем было также введено представление об электроны как о вихревом кольце с переменным радиусом [Ацюковский, 2003, с. 312].

Советский академик *Я.И. Френкель* категорически отрицал существование мирового эфира, сравнивая поиск свойств эфира с «богоискательством и богостроительством», и отстаивал принцип дальнего действия посредством поля. «Но если наличием процесса, именуемого электромагнитным полем, не удовлетворяется, а требует сохранения носителя этого процесса, каким является у Фарадея и Максвелла эфир, то современная физика на это отвечает решительным – нет».

Следует с прискорбием отметить, что точка зрения сторонников теории относительности и отсутствия в природе эфира победила и до настоящего времени является в отечественной и мировой физике превалирующей [Ацюковский, 2003, с. 22-23].

Современный период

«...все предметы, все неживые и живые системы имеют свой собственный «торсионный портрет», созданный вращением частиц, из которых они состоят»
Г.И. Шипов [2002, с. 104]

1947 г. Американский физик-теоретик *Г. Бете* (р. 1906) интерпретировал большую часть лембовского сдвига как уменьшение энергии электрона в результате взаимодействия с так называемыми нулевыми флуктуациями электромагнитного поля вакуума [Павленко, 2005, с. 816].

1948 г. Шведский физик *Х. Казимир* теоретически рассчитал силу притяжения металлических незаряженных разведенных на небольшое расстояние макропластин под действием ненаблюдаемого поля физического вакуума (*эффект Казимира*).

1958 г. Эффект Казимира экспериментально доказан [Павленко, 2005, с. 816-817].

Эти данные следует рассматривать как экспериментальное подтверждение существования физического вакуума.

Вторая половина 20 – начало 21 вв. В многочисленных работах приведены обзоры по истории развития эфирных концепций и современных взглядов на природу «физического вакуума», а также построение его теории.

Описанная выше дискуссия есть, фактически, спор о том, нужно ли искать материальную основу внутреннего механизма явлений или достаточно найти подходящий математический аппарат для внешнего описания явлений. Это спор между динамикой и феноменологией.

1955 г. *Л. Эссен* (р. 1901) определил предел для скорости «эфирного ветра» - не более 0, 24 м/с [Храмов, 1983, с. 325].

60-е гг. Возникновение когнитивной (от лат. *cognoscere* – знать) психологии. С когнитивной точки зрения разуму человека доступно нечто большее, чем информация, поступающая извне. Когнитивный подход состоит в основном в стремлении понять, каким образом мы расшифровываем информацию о реальной действительности и организуем ее, с тем, чтобы проводить сравнения, принимать решения или разрешать проблемы, встающие перед нами каждую минуту.

Человек – существо общественное, которому, для того чтобы выжить, необходим целый ряд социальных связей. Социальная психология изучает в числе прочего тот факт, что большая часть наших социальных восприятий больше зависит от *истолкования* данной ситуации, чем от самой ситуации. Социальная психология пытается показать,

каким образом наши чувства и наши мысли формируются в результате влияний, оказываемых людьми друг на друга [Годфруа, 1996, с. 73-74].

1962 г. В психологической лаборатории Нижнетагильского педагогического института у больной слабой формой эпилепсии *Р. Кулешовой* обнаружен эффект кожно-оптического зрения [Перевозчиков, 1989, с. 44].

1967 г. *Дж. Райн* подводит итоги первых 20 лет парапсихологических исследований. Показано, что «пси-способности широко распространены, пси-феномены не связаны ни с болезнью, ни с патологией личности [Перевозчиков, 1989, с. 44].

70-е гг. В результате экспериментов на ускорителях получены данные о свойствах протонов, нейтронов и ядер атомов.

Полученные данные в настоящее время открывают возможность интерпретации протона как винтового тороидального вихря эфира, а нейтрона – как того же вихря, но окруженного дополнительным пограничным слоем. При этом магнитное поле протона может быть интерпретировано как тороидальный поток эфира, создаваемый протоном в окружающем его пространстве. Разработанные эфиродинамические модели протона, нейтрона и атомных ядер позволяют выяснить структуру самих нуклонов, структуру атомных ядер и физическую сущность внутриядерных взаимодействий [Ацюковский, 2003, с. 241].

Эксперименты, проведенные в 60-70 гг. на животных и человеке показали наличие альфа- и тета-волн, посредством которых мозг синхронизует свою электрическую активность и путем внешней обратной связи получает возможность управлять своими мозговыми волнами. Эти данные лежат в основе объяснения эффекта медитации [Годфруа, 1996, с. 142-143, 160-161].

1972 г. Государственный комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР зарегистрировал научное открытие *В.П. Казакевича, С.П. Шурина и Л.П. Михайловой*, установивших электромагнитную связь живых клеток друг с другом. Было доказано, что клетки, изолированные друг от друга, могут обмениваться информацией [Перевозчиков, 1989, с. 44-45].

80-е гг. Работами *А.П. Дубова* в нашей стране закладываются основы «Когнитивной психофизики» [Дубов, 2006].

1982 г. В Институте радиотехники и электроники АН СССР организована лаборатория (ныне отдел) физических методов исследования биологических объектов.

1983 г. Отделением теоретических проблем АН СССР и американским институтом *Бэй Рисерч* совместно проведены два эксперимента по демонстрации телепатического зрения с участием *Джуны*.

1988 г. «Тайны неба и Земли» - под таким названием в Италии собрался очередной конгресс магов и астрологов [Перевозчиков, 1989, с. 45] – и через 2500 лет мы «через тернии» снова, но на другом уровне, пришли к тому, с чего начинал Демокрит.

1987-1988 гг. *Г.И. Шиповым* разработана физическая теория полей инерции, в основе которой заложен всеобщий принцип относительности, позволяющий расширить общерелятивистскую механику Эйнштейна до механики ориентируемой точки и связать поля инерции с кручением пространства. При этом в вакуумной квантовой механике роль волновой функции играет поле инерции (поле кручения), а на месте постоянной Планка $\hbar$ стоит произвольная константа размерности момента импульса [Дмитриевский, Володин, Шипов, 1993, с. 40-41; Шипов, 2002].

1991 г. Эксперимент, проведенный с двумя пучками фотонов, показал, что, получая в результате измерения *информацию* о состоянии одного фотона, нарушающего волновые свойства, можно восстановить их, «стирая» полученную информацию. Это явление назвали «квантовым ластиком».

1994 г. Процесс передачи информации от фотона к фотону не зависит от расстояния между ними. Это и есть *телепортация* фотона, предсказанная американцем *Ч. Беннетом*.

Эксперимент показал, что квантовая корреляция фотонов наблюдается на расстояниях свыше 10 км. Такое странное поведение называется *нелокальным взаимодействием*. Существенное отличие квантовой информации от классической состоит в том, что квантовой информацией можно обмениваться, но ее нельзя дублировать. Явление квантовой телепортации можно использовать для телепортации частиц ненулевой массы, для переноса информации от фотонов на захваченные в электромагнитную ловушку ионы, передачи информации в условиях сильных помех и в квантовых вычислениях.

1997 г. Эксперимент австрийских физиков подтвердил теоретическое предсказание эффекта телепортации фотона. Передача информации при этом осуществляется благодаря «спутыванию» состояний пары фотонов – переходу в состояние Белла (А.Г. Белл (1847-1922) – один из создателей телефона) [Павленко, 2005, с. 814-816].

Здесь есть некоторые тонкости. В соответствии с [Доронин, 2007, с. 60-61] «сами термины «передача сигнала» или «передача информации» в данном случае не очень удачны – ничто никуда здесь не передается и не перемещается из одного места в другое. Более правильным является представление, что система по одним степеням свободы может быть сепарабельна (например, по пространственным координатам) и разделена на части, находящиеся в разных пространственных областях, а по другим (спиновым) – нет. В последнем случае система будет составлять единое целое, и спины станут изменяться согласованно. При этом никакие сигналы никуда не передаются. Спины частиц в случае запутанного состояния не разнесены в пространстве и не существуют самостоятельно в качестве отдельных элементов реальности, они как бы находятся в одном месте. Поэтому о каком-либо перемещении информации говорить бессмысленно. ... Противоречие здесь скрывается в самой постановке вопроса, например, когда речь идет о передаче информации при помощи квантовых корреляций. Квантовые корреляции – это те степени свободы, которые являются общими для всей системы. Это та часть системы, которая объединяет ее, те степени свободы, которые меняются как одно целое. Поэтому говорить о передаче информации при помощи квантовых корреляций не совсем корректно: никакой «передачи», по сути дела, здесь нет, поскольку квантовые корреляции не разделены на отдельно отстоящие части».

1994 г. Статья П. Шора стимулировала работы по созданию квантового компьютера, основная идея которого сводится к следующему.

Биты 0 и 1, представляющие два электрических состояния в цепях ЭВМ, напоминают состояние двухуровневой квантовой системы. Квантовую единицу информации – суперпозицию двух состояний – назвали квантовым битом или «кубитом». Квантовый объект существует *одновременно* в виде суперпозиции всех возможных состояний. Переходы между состояниями реализуются в результате взаимодействия *спина* с радиочастотными импульсами. Каждый кубит может находиться в двух состояниях одновременно. Следовательно, квантовый компьютер может оперировать одновременно на комбинациях кажущихся несовместимыми входов и производить параллельные вычисления, позволяющие повысить быстродействие на несколько порядков.

1999 г. В августе фирма IBM объявила о создании квантового компьютера из 5 атомов [Павленко, 2005, с. 814-815].

Объединяя данные по элементной базе квантового компьютера с данными биологии об эпифизе и структуре мозгового песка, можно сделать очень интересное предположение: *эпифиз головного мозга является составной частью квантового компьютера в нашей голове, а «мозговой песок» – физической основой квантового процессора* [Доронин, 2007, с. 257].

1994-1997 гг. Выход в свет фундаментальных работ Б.Б. Кадомцева «Динамика и информация», сначала в журнале «Успехи физических наук» [1994], впоследствии в виде монографии [1997]. Работа посвящена обсуждению вопросов динамического и информационного аспектов поведения сложных физических систем. В классической

физике информационная связь появляется при взаимодействии сложных нелинейных систем со стохастическим поведением, когда малое внешнее воздействие может приводить к сильному изменению траектории классической системы в фазовом пространстве. В квантовых системах информационная связь с окружением проявляется в процессах измерения, когда у квантового объекта происходит разрушение когерентности волновой функции, а во внешнем окружении появляется соответствующая информация.

1999-2001 гг. Такие представления об информации позволяют в буквальном смысле слова «перевернуть» с ног на голову все наши знания об окружающем мире. Действительно, в своей статье *П. Дэвис* говорит: «Но возможно, что все наоборот: похоже, что Вселенная на самом деле – шалость первичной информации, а материальные объекты являются ее сложными вторичными проявлениями. ... Если информация действительно должна заменить материю как самая первейшая субстанция Космоса, то нас ожидает еще большая награда. ... С современной точки зрения, мозги (материя) рожают мысли (ментальную информацию). ... Но если материя является формой организованной информации, то тогда и сознание уже не так таинственно, как нам казалось» [Доронин, 2007, с. 170].

На существование *мирового информационного пространства* и его *первичность* указывают и результаты многолетних медико-физических практических наблюдений и исследований, полученных с помощью так называемых альтернативных способов [Гобчанский, Ефимов, 2007].

Из курьезов (из серии психологи и физики шутят): «Психофизиологии просят физиков: «Помогите найти в электроне корни сознания!», а те все более склонны ответить: «А мы сами готовы искать корни электрона в сознании. До конца изучив связь субъекта и объекта, мы ее не обнаружили» [Годфруа, 1996, с. 181].

1997-2000 гг. Ученые приходят к выводу, что «биологические системы обладают материальной основой для реализации механизма Сознания на полевом уровне. Исходящие от них излучение несет сложную информацию и имеет, по-видимому, торсионную природу. ... Настало время говорить о вездесущности сознания. Иными словами, нужно готовиться к тому, чтобы подойти к построению сверхъединой теории поля, описывающей как физические, так и семантические проявления мира». Основопологающей основой при этом может являться понятие о физическом вакууме – особой форме материи, не вещественной по своей структуре и не содержащей элементарных частиц, а имеющей полевую, информационную структуру, способную порождать элементарные частицы [Дубов, 2006, с. 107-113].

2001-н.в. Проблема Времени и Пространства, в котором живет человек, была и остается самой актуальной и спорной в естествознании. Получены следующие данные [Дубов, 2006, с. 156-161].

1930-1940-е гг. В.И. Вернадский в своих работах подчеркивал фундаментальные различия Пространства и Времени в живой и косной материи. Он отмечал, что живые организмы представляют собой особую пространственно-временную форму существования материи, особую функционирующую систему.

1964 г. Философ-физик *Дж. Уитроу* в качестве одной из причин специфичности биологического времени полагал, что оно «является внутренним временем, связанным с областью пространства, занимаемого живыми клетками, которое относительно изолировано от остальной Вселенной»

1982 г. Астрофизиком *Н.А. Козыревым* сделано фундаментальное открытие; мировое время имеет свой ход, направление и «... в силу этой направленности время может совершать работу и производить энергию. ... Время является активным участником мироздания»

2002-2004 г. Украинским ученым-темпорологом *А.М. Бичем* сделаны следующие выводы. «Вопросы, связанные с физической сущностью времени, необходимо изучать совместно с проблемами психофизических феноменов...с обязательным привлечением

наряду с учеными (физиками, философами, медиками, биологами, психологами) также и людей, с выдающимися экстрасенсорными способностями.

Многие пси-явления все еще требуют для научного объяснения нового углубленного понимания и физического вакуума, и допущения существования за пределами наших тел некоторого сознания».

2003 г. Выход в свет фундаментального труда В.А. Ацюковского «Общая эфиродинамика». Обзор *всего* материала, позволил автору сделать следующие выводы.

Учитывая, что эфир предполагается мировой средой, т.е. средой, заполняющей все пространство, для определения его свойств необходимо проанализировать наиболее характерные свойства, как *вакуума космического пространства*, так и *элементарных частиц вещества и их взаимодействий*.

Совместное рассмотрение всех свойств реального мира позволяет прийти к однозначному выводу о том, что эфир – мировая среда, заполняющая все мировое пространство, образующая все виды вещества и ответственная за все виды взаимодействий, представляет собой реальный, т.е. вязкий и сжимаемый газ. Этот газ состоит из существенно более мелких, чем элементарные частицы вещества, частиц, которые целесообразно назвать так, как они назывались в древности Демокритом, - *а'мерами*, т.е. физически неделимыми частями материи.

Эфир должен обладать большой упругостью, что характерно для любого тела при условии, что энергия взаимодействия между его частицами носит *реактивный характер* и не переходит в тепло [Ацюковский, 2003, с. 103-106].

Все известные электромагнитные явления можно интерпретировать с позиций газовой динамики эфира: электрический заряд - как циркуляция кольцевой скорости плотности эфира по всей поверхности винтового тороидального вихря - протона или электрона; полярность – как знак винтового движения эфира вокруг заряда; электрическое поле - как набор разомкнутых вихревых трубок эфира, в которых эфир вращается вокруг оси трубки и поступательно движется по оси трубки от заряда, а по периферии – к заряду; магнитное поле - как поступательное движение эфира в вихревых трубках. При этом разработанные модели электромагнитных явлений с привлечением представлений об эфире позволяют естественным образом избавиться от парадоксов электродинамики [Ацюковский, 2003, с. 408-409].

Структуру фотона можно представить в виде двухрядной цепочки линейных винтовых вихрей эфира. Такая структура естественным образом объясняет корпускулярно-волновой дуализм [Ацюковский, 2003, с. 446].

Разработана модель возникновения магнитного поля у вращающихся небесных тел. В рамках модели показана возможность интерпретации причин возникновения магнитного поля, как результат поглощения ими эфира и собственного вращения [Ацюковский, 2003, с. 480].

Эфиродинамические представления о сути физических явлений позволили разработать модель стационарной динамической Вселенной с устойчивым кругооборотом эфира. В рамках этой модели разработаны модель устойчивой спиральной галактики с местным кругооборотом эфира и модель обмена эфира между двумя галактиками – вновь образуемой и распадающейся. На этой основе предложен принцип функциональной классификации галактик, учитывающий кругооборот и преобразование форм движения эфира во Вселенной. Энтропия Вселенной сохраняется на постоянном уровне, и существование Вселенной вечно.

Разработана эфиродинамическая модель возникновения и развития у звезды планетной системы. В рамках такой модели естественным образом объясняются основные особенности Солнечной системы. А именно: сосредоточение основной массы в Солнце, а орбитального момента системы в планетах; совпадение плоскостей орбит планет с экваториальной плоскостью Солнца; прямое направление вращения Солнца, планет и их спутников вокруг своих осей [Ацюковский, 2003, с. 554].

2003 г. Выход в свет монографии Р.М. Бембеля, В.М. Мегери, С.Р. Бембеля «Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов», в основе которой заложены представления о «геосолитонах – космических квантах» [2003, с. 16-18].

2006-2007 гг. Полученные более чем за столетний период исследований данные психологии и психофизики в корне меняют существующие в современной науке взгляды на пространственно-временные взаимоотношения в самом человеке и во Вселенной [Дуров, 2006, с. 157].

И дискуссию по поводу теорий эфира и вакуума в настоящее никак нельзя считать законченной. В соответствии с выводами С.И. Дорониной [2007, с. 22]: «Теории эфира не смогут ничего объяснить, если не сумеют выйти за рамки классического описания и не введут в рассмотрение суперпозиционные состояния. ... Подобная ситуация сложилась и с понятием физического вакуума, о котором в современных научных публикациях тоже все чаще говорят в терминах нелокальных суперпозиционных состояний».

«Неизбежность странного мира»

(название книги Д. Данина [1962])

Проведенный обзор иллюстрирует 2500-летнюю историю развития представлений о вихревых движениях и пустоте по спирали: от вихревых атомов Левкиппа – Демокрита – Эпикура через вихревую материю Декарта, эфир Ньютона – Гюйгенса – Максвелла, теорию вихревых движений Гельмгольца – Кирхгофа, вихревую эфирную теорию материи Дж. Дж. Томсона – лорда Кельвина до современных представлений об эфире – вакууме (физическом вакууме), информации и сознании. Как видим, имеющиеся данные в настоящее время на более высоком уровне, по сути, возвращает нас к представлениям древних мыслителей, для которых Природа представлялась единой, неделимой на живую и неживую и состоящей из вихревых атомов и пустоты.

Изложенные выше данные и материалы показывают, что *все* вещественные объекты Вселенной - от флуктуаций физического вакуума ($R \sim 10^{-35}$ м) и элементарных частиц ($R \sim 10^{-15}$ м), до звездных систем ($R \sim 10^{15}$ м) и галактик ($R \sim 10^{21}$ м), а также *все* «живые» образования от клетки ($R \sim 10^{-6}$ м) до социума ($R_{\text{Земли}} \sim 10^9$ м) содержат вихревые структуры и вращательные движения. И, наоборот, полагая, что в основе движения заложены представления о первоначальном вихре, оказывается возможным дать разумное объяснение *всему* разнообразию явлений во Вселенной от «рождения-умирания» элементарной частицы до галактики, и от спиральной структуры ДНК – основы любой клетки, до социальных явлений в обществе, включая связи типа «влияние солнечной активности на социум».

Как видим, вихревые движения и структуры являются такими состояниями, которые «пронизывают» *все* многообразие объектов и явлений. Другими словами, вихревые движения являются «необходимым и достаточным» условием, которое, в принципе, позволяет дать описание Вселенной в рамках *единого* подхода.

Завершить этот обзор можно словами Аркадия и Бориса Стругацких: «Я не претендовал на ясность на своем уровне, это мое право, и я его исчерпал. А там, где кончаются права, там начинаются обязанности...» [Стругацкие, 2007, с. 146].

Литература

- Арутюнов В.С., Стрекова Л.Н.* Социологические основы научной деятельности. М.: Наука, 2003. 299 с.
- Ахманов А.С.* Эпикур // Лукреций. О природе вещей. II. Статьи, комментарии, фрагменты Эпикура и Эмпидокла / Сост. Ф.А. Петровский. М.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 493-516.
- Ацюковский В.А.* Общая эфиродинамика. М.: Энергоатомиздат, 2003. 584 с.
- Белоусов В.В., Гзовский М.В.* Тектонические условия и механизм возникновения землетрясений // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1954. № 2 (152).
- Бембель Р.М., Мегеря В.М., Бембель С.Р.* Геосолитоны: функциональная система Земли, концепция разведки и разработки месторождений углеводородов. Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2003. 344 с.
- Боголюбов А.Н.* Математики. Механики. Библиографический справочник. Киев: Наукова Думка, 1983. 640 с.
- Борисов А.В., Мамаев И.С., Соколовский М.А.* Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 704 с.
- Бройль Л.* Революция в физике. М.: Атомиздат, 1965. 232 с.
- Бурба Г.* Оазисы экзопланет // Вокруг света. 2006. № 9 (2792). С. 38-45.
- Быков В.Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176-1190.
- Вавилов С.И.* Исаак Ньютон. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1943. 216 с.
- Вайнштейн Б.* Строение белковых молекул // Наука и жизнь. 1986. № 8. С. 37-45.
- Вернадский В.И.* Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1991. 271 с.
- Викулин А.В.* Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. I Российско-Японский семинар, Хабаровск, 25-29 сент. 2000, Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 205-224.
- Викулин А.В.* Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 150 с. <http://www.kscnet.ru/ivs/monograph/vikulin/index.html>.
- Викулин А.В.* Взгляд физика: вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. С. 8-19.
- Викулин А.В.* Ротационные упругие поля в твердых телах и вихревые решения проблемы Дирихле: тождественные системы? // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2005. № 2. Вып. № 6. С. 86-95. http://www.kscnet.ru/kraesc/2005/2005_6/2005_6.html.
- Викулин А.В.* Хроника развития естественнонаучных представлений о ротационных и вихревых движениях // Вестник КамчатГТУ. 2007. № 6. С. 64-77.
- Викулин А.В.* Мир вихрей. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2008. 320 с.
- Викулин А.В., Иванчин А.Г.* Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 6. С. 94-102.
- Викулин А.В., Мелекесцев И.В.* Вихри и жизнь // Ротационные процессы в геологии и физике. М.: ДомКнига, 2007. С. 39-101. www.kscnet.ru.
- Вилли К.* Биология. М.: Мир, 1968. 808 с.
- Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин.* Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. 297 с. http://www.kscnet.ru/ivs/publication/whirlwinds/kniga_2.htm.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Гобчанский О.П., Ефимов В.Н.* Альтернативные способы получения информации: Эксперименты с использованием электроаппаратуры по Р. Фоллю и аппарата квантовой терапии. М.: ООО «ТИД Русское слово - РС», 2007. 136 с.

- Годфруа Ж.* Что такое психология. Т. 1. М.: Мир, 1996. 496 с.
- Грицак Е.Н.* Саламанка. М.: Вече, 2006. 224 с.
- Грушинский Н.П.* Теория фигуры Земли. М.: Наука, 1976. 512 с.
- Давыдов А.С.* Солитоны в квазимолекулярных структурах // УФН. 1982. Т. 138. Вып. 4. С. 603-643.
- Данин Д.* Неизбежность странного мира. М.: Молодая гвардия, 1962. 368 с.
- Диоген Лаэртский.* О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. М.: Мысль, 1979. 622 с.
- Декарт Р.* Рассуждения о методе с приложениями. Диоптрика, Метеоры, Геометрия. М.: Изд-во АН СССР, 1953.
- Джуа М.* История химии. М.: Мир, 1966. 452 с.
- Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И.* Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 154 с.
- Доронин С.И.* Квантовая магия. СПб: ИГ «Весь», 2007. 336 с.
- Дорфман Я.Г.* Всемирная история физики. С древнейших времен до конца XVIII века. М.: ДомКнига, 2007а. 352 с.
- Дорфман Я.Г.* Всемирная история физики. С начала XIX до середины XX вв. М.: ДомКнига, 2007б. 320 с.
- Дубов А.П.* Когнитивная психофизика: Основы. Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. 301 с.
- Заречный М.* Квантово-мистическая картина мира. Структура реальности и путь человека. СПб: ИГ «Весь», 2007. 224 с.
- Иванчин А.Г.* Движущие силы смерча // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2004. С. 269-273.
- Иванчин А.Г.* Непотенциальное вихревое решение задачи об электроде // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 211-218.
- Ивасышин Г.С.* Управление трением на основе закономерности аддитивности упругого последствия // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения. Труды V Международной конференции 14-17 октября 2003 г. СПб: СПбГПУ, 2003. С. 201-202.
- Исаков А.Я.* Пионеры цивилизации. Очерки по истории естествознания, техники и технологии. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2004а. 232 с.
- Исаков А.Я.* Концепции современного естествознания. Часть 1. Древние цивилизации. Античный период. Эпоха Возрождения. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004б. 165 с.
- Исаков А.Я.* Концепции современного естествознания. Часть 3. Естествознание нового времени. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004в. 174 с.
- Исаков А.Я.* Концепции современного естествознания. Часть 2. Классический период естествознания. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2005. 171 с.
- Исаков А., Исакова В.* Физические величины. Справочник. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2003. 137 с.
- Кадомцев Б.Б.* Динамика и информация. УФН. 1994. Т. 164. № 5. С. 449-530.
- Кадомцев Б.Б.* Динамика и информация. М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 1997. 400 с.
- Клеро А.* Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики. М.: Изд-во АН СССР, 1947.
- Клячко М.А.* Землетрясения и мы. СПб: РИФ «Интеграф», 1999. 234 с.
- Кондратьев Б.П.* Теория потенциала и фигуры равновесия. Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных технологий, 2003. 624 с.
- Кудрявцев П.С.* История физики. Т. 1. М.: Учпедгиз, 1956а. 564 с.
- Кудрявцев П.С.* История физики. Т. 2. М.: Учпедгиз, 1956б. 487 с.

- Кузнецов Б.Г. Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 512 с.
- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974. 752 с.
- Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Т. II. М.: Наука, 1971. 936 с.
- Липс Ю. История древних цивилизаций / Ред. И.А. Задоя. СПб: Полигон, 1999. 480 с.
- Лифшиц Е.М. Сверхтекучесть (теория) // Гелий / Ред. А.И. Шальников. М.: Изд-во «Иностран. лит-ры», 1949. С. 385-429.
- Лукьянов А.В. Нелинейные эффекты в моделях тектогенеза // Проблемы геодинамики литосферы / Ред. А.В. Лукьянов. М.: Наука, 1999. С. 253-287.
- Лункевич В.В. От Гераклита до Дарвина. В двух томах. Т. 1. М.: Госуд. учебн.-педагог. изд-во мин-ва просвещения РСФСР, 1960а. 480 с.
- Лункевич В.В. От Гераклита до Дарвина. В двух томах. Т. 2. М.: Госуд. учебн.-педагог. изд-во мин-ва просвещения РСФСР, 1960б. 548 с.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 380 с.
- Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли / Ред. А.О. Глико. М.: Наука, 2006. 390 с.
- Максвелл Дж.К. Трактат об электричестве и магнетизме. Т. II. М.: Наука, 1989.
- Миллер М. Всякая и не всякая всячина. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. 480 с.
- Мелекесцев И.В. Вихревая вулканическая гипотеза и некоторые перспективы ее применения // Проблемы эндогенного магматизма. М.: Наука, 1979. С. 125-155.
- Мелекесцев И.В. Взгляд геолога: вращательные движения и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли // Вихри в геологических процессах / Ред. А.В. Викулин. Петропавловск-Камчатский: Наука для Камчатки, 2004. С. 20-23.
- Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана. М-СПб.: Межправительственная океанографическая комиссия, 2003. 120 с.
- Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Л.: Наука, 1969. 487 с.
- Низовцев В.В., Бычков В.Л. Сдвиговые течения в земной коре и вихревая природа геомагнетизма // Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. С. 383-401.
- Николаев Г. Магнитное поле Земли слабеет. Опасны ли последствия этого? // Наука и жизнь. 1991. № 1. С. 44-50.
- Николаев Г.В. Тайны электромагнетизма и свободная энергия. Томск: ООО «НТЦ НЭД», 2002. 150 с.
- Павленко Ю.Г. Начала физики. М.: ЭКЗАМЕН, 2005. 864 с.
- Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР, сер. геологическая, 1961. № 3. С. 36-54.
- Перевозчиков А.Н. Экстрасенсы – миф или реальность? М.: Знание, 1989. 48 с.
- Платэ Н.А. Академия Наук и развитие образования в России // Вестник РАН. 1999. Т. 69. № 12. С. 1063-1069.
- Погребский И.Б., Франфуркт У.И. Галилей и Декарт // Галилей. Избранные труды в двух томах. Т. 2. М.: Наука, 1964. С. 504-508.
- Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. М.: ДомКнига, 2007. 528 с. www.kscnet.ru
- Савенко В.С. Что такое жизнь? Геохимический подход к проблеме. М.: ГЕОС, 2004. 203 с.
- Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1973. 536 с.
- Слензак О.И. Вихревые системы литосферы и структуры докембрия. Киев: Наукова Думка, 1972. 182 с.

- Советский энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия. 1985. 1600 с.
- Стругацкие А. и Б.* За миллиард лет до конца света. М.: Эксмо; СПб: Terra Fantastica, 2007. 624 с.
- Тарakanов Р.З.* Повторные толчки землетрясения 4 ноября 1952 года // Труды СКНИИ СО АН СССР. 1961. Вып.10. С.112-116.
- Техника в ее историческом развитии / Ред. С.В. Шухардина. М.: Наука, 1979. 411 с.
- Тимашев С.Ф.* О базовых принципах «нового диалога с природой» // Проблемы геофизики XXI века: в 2 кн. Кн. 1. / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 2003. С. 104-141.
- Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е.* Общая и экологическая геофизика. М.: Физматлит, 2005. 576 с.
- Тулинов В.Ф.* Концепции современного естествознания. Учебник. М.: ЮНИТА-ДАНА, 2004. 416 с.
- Уиттекер Э.* История теорий эфира и электричества. Современные теории. 1900-1926 гг. М.- Ижевск: Ин-т компьютерных технологий, 2004. 464 с.
- Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.
- Философский словарь / Ред. М.М. Розенталь. М.: Изд-во «Политической литературы», 1975. 496 с.
- Ферми Э.* Квантовая механика. М.: Мир, 1968. 368 с.
- Флота Я., Новы Л.* История естествознания в датах: хронологический обзор / Ред. А.Н. Шамина. М.: Прогресс, 1987. 495 с.
- Хаин В.Е., Полетаев А.И.* Ротационная тектоника Земли // Наука в России. 2007. № 6. С. 14-21.
- Храмов Ю.А.* Физики. Библиографический справочник. М.: Наука, 1983. 400 с.
- Чаттерджи С., Датта Д.* Введение в индийскую философию. М.: Иностранная литература, 1955. С. 47.
- Чернин А.Д.* Физическая концепция времени от Ньютона до наших дней // Природа. 1987. № 8. С. 27-37.
- Шило Н.А.* О механике образования Солнечной системы // Тихоокеанская геология. 1982. № 6. С. 20-27.
- Шипов Г.И.* Теория физического вакуума. М.: Кириллица-1, 2002. 128 с.
- Шкловский И.С.* Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1980. 352 с.
- Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: Наука, 1968. 1084 с.
- Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т. 1. М.: Наука, 1965. 600 с.
- Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т. 2. М.: Наука, 1966а. 632 с.
- Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т. 3. М.: Наука, 1966б. 632 с.
- Элиаде М.* История веры и религиозных идей. Т. 1. От каменного века до элевсинских мистерий. М.: КРИТЕРИОН, 2001. 464 с.
- Энгельс Ф.* Диалектика природы. М.: Изд-во Политической литературы, 1975. 360 с.
- Энциклопедия Мудрости. М.: РОССА, 2007. 814 с.
- Яглом И.М.* Почему высшую математику открыли одновременно Ньютон и Лейбниц? (Размышления о математическом мышлении и путях познания мира). М.: Знание, Число, Мысль. 1983. № 6.
- Berthelot.* Les origines de l'Alchimie. Paris, 1885. P. 127, 147, 250.
- Brace W.F., Bombolakis E.G.* A note on Brittle crack growth in compression // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. N 2.
- Dirichlet G.L.* Untersuchungen uber ein Problem der Hydrodynamik // J. Rein Angew. Math. 1860. V. 58. P. 801.
- Duda S.J.* Strain release in the Circum-Pacific belt, Chile 1960 // J. Geophys. Res. 1963. 68. P. 5531-5544.
- Fujiwhara S., Tsujimura T., Kusamitsu S.* On the Earth-vortex, Echelon Faults and allied Phenomena // Gerlands Beiträge zur Geophysik, zweite Supplementband. 1933. P. 303-360.

Huang B.S. Evidence for azimuthal and temporal variations of the rupture propagation of the 1999 Chi-Chi Taiwan, earthquake from seismic data recorded by a dense array // *Geophys. Res. Lett.* 2001. 28. P. 3370-3380.

Kopp. Beitrage zur Geschichte der Chemie, I. Branuschweig, 1869. S. 108.

Lasswitz. Geschichte der Atomistik vom Mittelalter bis Newton. I. Leipzig: Voss, 1890. 350 s.

Lee J.S. Some Characteristic Structural Types in Eastern Asia and Their Bearing upon the Problems of Continental Movements // *Geol. Mag.* LXVI. 1928. P. 422-430.

Lippmann E.O. Entstehung und Ausbreitung der Alchemie. Berlin. 1919. S. 27.

Mabilleau Leopold. Histore de la philosophie atomistique. Paris. 1895.

Martinetti Piero. Il sistema Sankhya: studio sulla filosofia. Torino: Lattas, 1897.

Milhaud. Les philosophes de la Grece. Paris, 1990. 153 p.

Mogi K. Migration of seismic activity // *Bull. of the Eathquake Res. Inst.*. 1968. V. 46. P. 53-74.

Stillman J.M. The story of alchemy and early chemistry. New York: 1960. 153 p.

Takeo M. Ground rotational motions recorded in near-source region of earthquakes // *Geophys. Res. Lett.* 1998. 25. P. 789-792.

Zeller. La philosophie des Grecs. Trad. Boutroux. II. Paris, 1882. 289 p.

Yoffe E.H. The moving Griffith crack // *Phil. Magaz.* 1951. V. 42. N. 330.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: 20 тыс. лет истории развития и вихревых движений

Именно использование *крутильных ловушек* для зверей и «освоение» *механического момента* для получения огня и предопределило формирование из *Homo sapiens человека*: из десятков видов гоминидов выжил и отстоял свое право на существование лишь один из них - *Homo sapiens sapiens*.

Вихревые движения, «зашитые» в спиральных структурах раковин и крутильных движениях тел зубатых китов и рыб, впоследствии «перешедшие» в асимметрию черепа сначала дельфина, а затем строения мозга человека, «позволившие» социуму развиваться с минимальным «социальным» трением, интуитивно воспринимались человеком как основные движения окружающего нас мира. Именно такая («вихревая») интуиция и позволила античным философам-мыслителям перенять у магов и халдеев представления о вихревых движениях *как основных* (атомарных, «неразрезаемых») процессах, протекающих в окружающем нас мире. Именно «перманентный характер» вращения небесных сфер, на который обратил внимание Жан Буридан, позволил христианским натурфилософам-толкователям Аристотеля утверждать, что их непрерывно вращают ангелы. Именно такая интуиция подсказала сначала философу И. Канту, а впоследствии и механику и математику П. Лапласу большое научное будущее гипотезы вихревого движения первоначального газово-пылевого облака, позаимствованной И. Кантом из книги писателя-мистика Э. Свендеборга, которому во время сна такой сюжет подсказали ангелы. Именно такая интуиция «двигала» философом и математиком Р. Декартом, позволила математике и физику Г.Л.Ф. Гельмгольцу создать основы вихревой динамики, физику лорду Кельвину построить теорию вихревых атомов, физикам-теоретикам Дж. Уленбеку и С. Гаудсмиту выдвинуть гипотезу существования у электрона спина и, тем самым, «спасти» закон сохранения энергии, а физику-теоретика русского происхождения Г.А. Гамову сформулировать представления о существовании вихревых движений *до* Большого взрыва, т.е. *до* образования Вселенной.

Проведенный обзор показал, что представления о вихревых движениях развивались по «сложной» спирали, «острые» изгибы которой фиксировались «победами» соответствующей частью социума. Действительно, такие *интуитивные вихревые* представления, активно подхваченные в середине XVII в. философом и математиком Р. Декартом, были побеждены несомненными *научными* успехами и практически важными техническими достижениями физической теории И. Ньютона, а сторонники Р. Декарта «истреблены» ньютонианцами, большая часть которых к науке имела весьма отдаленное отношение. Уже научно обоснованная Г. Гельмгольцем и другими учеными идея важности вихревых движений, начавшая бурно развиваться в середине XIX в., была вновь «побеждена» достижениями квантовой механики и опять забыта, так как в то время наука стала уже производительной и достаточно высоко оплачиваемой отраслью общества.

Видим, что именно вихревые движения являлись и являются для человека своеобразным маяком, позволившим ему «на интуиции» выжить как виду, и освещавшим путь научного развития и технического совершенства в течение всей истории его существования.

В настоящее время наблюдается очередное, по большому счету, уже четвертое в истории и второе в науке увеличение интереса к проблеме вихревых движений. При этом имеющиеся научные данные убедительно показывают, что *вихревые движения* являются *основными движениями*, наблюдаемыми в природе в различных по физическому составу средах и на разных масштабных пространственно-временных уровнях: от Вселенной в целом до элементарных частиц, включая жизнь, ее возникновение и социум.

Особый интерес нынешнего этапа, на наш взгляд, связан с «геологической» стороной проблемы, в рамках которой «пересекаются» все наиболее интересные ее составляющие. Узловые моменты такого пересечения можно сформулировать следующим образом. Во-первых, вихревые и вращательные движения являются *основными*

геодинамическими движениями, наблюдающимися на разных масштабных уровнях в течение всей 4.2 млрд. летней геологической истории, в том числе и в «твердой» литосфере. Во-вторых, проблема возникновения жизни и развития социума является одновременно и квантовомеханической спиновой, по сути, и макроскопической геофизической вихревой, по содержанию.

Поэтому дальнейший прогресс в развитии научных представлений о вихревых движениях возможен, по-видимому, при условии объединения в рамках геодинамики усилий и квантовой механики и макрофизики. Можно ожидать, что новый наступивший этап развития представлений о вихревых движениях станет последним, заключительным, «переломным» этапом, после которого проблема будет развиваться по «обычной» плавной эволюционной спирали. Представляется, что именно с успешным развитием в дальнейшем представлений вихревой геодинамики будут связаны и новые достижения в Физике Земли.

Гипотеза

Приведенные в книге данные, материалы, обзоры и научные построения показывают, что ротационная вихревая геодинамика является, по сути, таким разделом наук о Земле, в рамках которого естественным образом объединяются представления геологии и законы физики, включая гипотезы зарождения и развития жизни и социума на планете.

На рис. 3.1 приведены данные о положении раскручивающейся из северного географического полюса Земли (N) линии максимальных касательных упругих напряжений (a) и вихревая структура с центром в северном полюсе Марса (b). Видно, что оба образования и геометрически и топологически подобны друг другу.

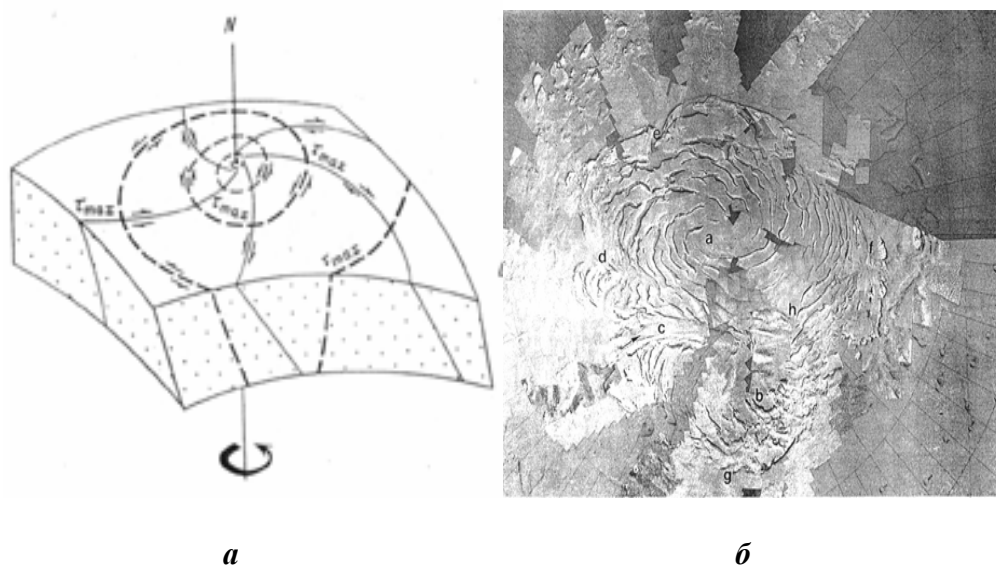


Рис. 3.1. Линия максимальных касательных напряжений, определенных по механизмам очагов землетрясений Северной Евразии (a) [Гущенко, 1979] и вихревая структура на полюсе Марса (b) [Whitney, 1979]. N – Северный полюс Земли.

Интуитивно ясно, что топологическое подобие таких разнесенных и находящихся в разных (и «геофизических» и «геодинамических») условиях структур «выражает коренное свойство пространства и времени и имеет, следовательно, фундаментальное значение для познания» заключенного в них физического содержания [Математический..., 1988, с. 582-583]. Земля и Марс вращаются вокруг своих осей с одинаковыми угловыми скоростями: продолжительности дней для этих планет

практически одинаковы и составляют 24 часа. Еще большую циклоническую (вихревую) активность имеют планеты-гиганты Юпитер и Сатурн, продолжительности дней для которых составляют около 10 часов. В то же время, отсутствуют данные о циклонической активности атмосферы и вихревых структурах на твердой поверхности планет, вращающихся с малыми угловыми скоростями. Например, Меркурия и Венеры, для которых периоды обращения вокруг своих осей составляют около одного земного месяца и 243 земных дня соответственно (табл. 1.3).

Приведенные данные показывают: интенсивность существующих на планете вихревых движений пропорциональна продолжительности периода ее обращения вокруг своей оси, что позволяет принять следующую гипотезу. Источником «собственного движения» блоков и плит на Земле [Пейве, 1961] или «собственного момента силы» (глава 11, [Викулин, 2003, 2008; Викулин, Иванчин, 1998]) как упругого поля на Земле, так и тектонического поля на Марсе, является их вращение вокруг своих осей. Или, перефразируя уже цитированную выше фразу из работы [Сэффмэн, 2000, с. 17], можно сказать, что интенсивность завихренных движений на планете пропорциональна ее собственному моменту количества движения.

Литература

Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2003. 150 с.

Викулин А.В. Мир вихревых движений. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2008, 230 с.

Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса. Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 6. С. 94-102.

Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 26-59.

Математический энциклопедический словарь / Ред. Ю.В. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988. 847 с.

Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1961. № 3. С. 36-54.

Сэффмэн Ф.Дж. Динамика вихрей. М.: Научный мир, 2000. 376 с.

Whitney M.I. Aerodynamic and vorticity erosion of Mars: Part II. Vortex features, related systems, and some possible global patterns of erosion // Geol. Soc. America Bull. 1979. Part I. V. 90. P. 1128-1143.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ (Введение к первому изданию 2004 г.)	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Литература	6
ЧАСТЬ I. Классические разделы «Физики Земли»	9
1. МАТЕРИЯ. ДВИЖЕНИЕ	11
Единство природы	11
<i>Иерархия объектов в природе</i>	11
<i>Четыре вида фундаментальных взаимодействий</i>	15
<i>Пространство и время</i>	17
<i>Торсионные поля</i>	19
Вселенная, Галактика, Солнечная система, планеты. Основные гипотезы происхождения и эволюции	21
Основы «холодной» модели происхождения Солнечной системы	27
Модель горячей Земли	30
Вихревая материя Декарта и звездные системы	33
Модель образования Солнечной системы из эндо-галактического вихря	34
Геосолитоны как функциональная система Земли	34
Предмет физики Земли	35
Литература	40
2. ФИГУРА ЗЕМЛИ И ЕЁ ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ	43
История вопроса развития представлений о фигуре Земли и ее размерах	43
История развития гравиметрии и теории фигуры Земли в России и предшествовавшие и сопутствующие ей важнейшие открытия	45
О фигуре реальной Земли	51
Понятие об истинной фигуре Земли – геоиде и его геометрическое представление	52
Геофизическое обоснование геоида. Сфероид Клеро	54
Фигура и распределение массы внутри Земли	56
Референц-эллипсоид. Эллипсоид Красовского. Международный эллипсоид	57
Понятие о периодах Эйлера и Чандлера, нутации и прецессии, динамическое сжатие	58
Колебания Чандлера и сеймотектонический процесс	60
Геоид по спутниковым данным. Квазигеоид	61
Земля как 3-осный эллипсоид	64
Литература	65
3. ФИЗИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ	67
Определение науки сейсмологии. Классификация землетрясений по происхождению, глубине очага и силе. Географическое распределение землетрясений	67
Способы оценки интенсивности колебаний при землетрясениях: макросейсмические шкалы и 12-балльная шкала MSK-64	69
Прогнозирование землетрясений, сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство	74
Землетрясение, его очаг, гипоцентр, эпицентр, эпицентральное расстояние	76
Землетрясения Луны и Марса	79
Характер деформаций в очаге по теории упругой отдачи и за ее пределами	80
Энергия землетрясения	82

<i>Магнитуда землетрясения</i>	83
<i>Упругая энергия, выделяющаяся в очаге</i>	84
<i>Энергетический класс</i>	85
<i>Зависимость между размерами очага и количеством выделившейся в нем энергии</i>	86
<i>Сейсмический момент</i>	87
<i>График повторяемости землетрясений</i>	88
<i>Магнитуды</i>	89
Магнитуда – энергия очага – сейсмический момент	89
О повторяемости землетрясений	90
Дислокационные теории очага землетрясения	92
Модели сейсмического процесса	96
Литература	99
4. СТРОЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИИ	103
Основы теории упругости	103
<i>Тензор деформации</i>	103
<i>Основное допущение классической теории упругости</i>	104
<i>Тензор напряжений</i>	105
<i>Энергия деформирования</i>	106
<i>Закон Гука</i>	107
<i>Однородные деформации</i>	108
<i>Адиабатические процессы</i>	110
<i>Продольные и поперечные упругие волны в изотропной среде</i>	110
<i>Поверхностные упругие волны</i>	112
<i>Законы Ферма, Гюйгенса и Снеллиуса</i>	115
Упругие волны в твердых телах и сейсмические волны	115
Развитие сейсмометрических наблюдений	119
<i>Сейсмическая станция</i>	119
<i>Сети сейсмических станций</i>	120
<i>Годографы</i>	122
Траектории волн внутри Земли	123
Определение скорости распространения сейсмических волн в Земле с помощью уравнения Гертлоца-Вихерта	125
Анализ данных о скоростях распространения продольных и поперечных волн по радиусу Земли	125
Проявление внешнего и внутреннего ядер Земли в особенностях выхода объемных сейсмических волн на поверхность Земли	126
Состояние слоев вещества Земли по данным сейсмологии. Распределение скоростей и сейсмических волн в земной коре (континентов и океана), типы земной коры (по данным сейсмологии)	126
Земная кора	128
<i>Океаническая кора</i>	129
<i>Континентальная кора</i>	130
Литосфера и астеносфера	131
Сейсмология и глобальная тектоника	132
Литература	133
5. ПЛОТНОСТЬ, СИЛА ТЯЖЕСТИ И ДАВЛЕНИЕ ВНУТРИ ЗЕМЛИ	135
Обзор развития представлений о моделях Земли	135
Предпосылки создания теории определения плотности	137
Упругость и плотность Земли	138
Определение плотности вещества внутри Земли с помощью схемы расчета Буллена и условий Роша, Молоденского и Адамса-Вильямсона;	

соответствующие им плотностные модели	138
Распределение упругих модулей с глубиной	144
Давление и ускорение силы тяжести с глубиной	145
Мантия Земли	145
Земное ядро	147
Распределение плотности, температуры, давления и ускорения силы тяжести в современной Земле и модели Сорохтина	148
Литература	148
6. ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ	149
Аномалия силы тяжести	149
Отклонение Земли от состояния гидростатического равновесия	149
Волны геоида	150
Изостазия	152
Отклонение от принципа изостазии	154
Изостазия и колебательные движения земной коры. Проблема вековых изменений силы тяжести, ее современной состояние	155
Редукция силы тяжести	156
О моментной природе волн геоида	160
Литература	162
7. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ	163
Геомагнетизм и физика Земли	163
История развития представлений о магнитном поле Земли и о магнитных явлениях	163
Элементы магнитного поля Земли	174
Магнитные поля планет	176
Методы исследования магнитного поля Земли	177
Миграция магнитных полюсов	179
Вариации значений магнитного момента Земли	180
Вековые вариации геомагнитного поля	181
Главное магнитное поле Земли. Аномалии геомагнитного поля	185
Магнитные свойства пород. Палеомагнетизм	189
Новая глобальная тектоника	191
Происхождение главного магнитного поля Земли	196
Электрические эффекты	199
Электромагнитные зондирования	200
Геомагнетизм и жизнь. Диапазон магнитных явлений	201
Глобальные магнитные аномалии как самоорганизующаяся система токовых контуров в ядре Земли	202
Литература	203
8. ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ	205
Развитие представлений о тепловом состоянии Земли, тепловых явлениях и возрасте Земли	205
Общие сведения о тепловом балансе Земли	215
Определение теплового потока и геотермического градиента на континентах и в океане	217
Связь теплового потока с основными структурами земной коры	220
Особенности тепловых полей перехода от континента к океану	224
Механизмы переноса тепла в Земле	225
Способы оценки температуры в земной коре	227
Температура в мантии	229
Температура в ядре Земли	232
Обобщенная температура по радиусу Земли	234

Новые данные о тепловом поле Земли	235
Литература	236
9. РЕОЛОГИЯ ЗЕМЛИ, ПРИРОДА ЕЕ ОСНОВНЫХ СЛОЕВ И РАЗДЕЛЯЮЩИХ ИХ ГРАНИЦ	239
Хроника появления и развития основных представлений физики вязкоупругих тел и их применение к веществу Земли	239
Среда в физике Земли	247
Процесс ползучести и его феноменологическое описание	247
Зависимость между напряжением и деформацией для некоторых реологических сред	251
Реология Земли	254
Вещество Земли в условиях высоких давлений и температур	258
Природа и характер границы Мохоровичича между земной корой и мантией ..	262
Происхождение земной коры, гипотезы дифференциации, зонной плавки и океанизации	263
Строение мантии	264
Ядро Земли	265
Литература	267
ЧАСТЬ II. Введение в «вихревую» геодинамику	269
10. РОТАЦИИ ВО ВСЕЛЕННОЙ	271
Вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной	271
<i>Вращательное движение в геологии</i>	<i>271</i>
<i>Вращательные движения в физике. История вопроса</i>	<i>271</i>
<i>Вращательное движение как характерное свойство пространства-времени Вселенной</i>	<i>273</i>
<i>Структура пространства-времени</i>	<i>278</i>
<i>Вихри – так что же это такое?</i>	<i>280</i>
Вращательное движение и вихри как фактор формирования литосферы и геолого-географической среды Земли	281
Новый диалог с Природой	285
Литература	287
11. ЭЛЕМЕНТЫ ВИХРЕВОЙ ГЕОДИНАМИКИ	291
О терминологии	291
Геология и время	291
<i>Время и энтропия</i>	<i>292</i>
<i>Хронология фанерозоя</i>	<i>293</i>
<i>Резюме</i>	<i>293</i>
Еще раз о вихрях в геологии	294
Моментная природа геодинамического процесса	295
<i>Взаимодействие землетрясений</i>	<i>295</i>
<i>Эффект Доплера</i>	<i>297</i>
<i>Элементарный сейсмофокальный блок</i>	<i>302</i>
<i>Колебания Чандлера</i>	<i>303</i>
<i>Расщепление скорости «широтной» миграции фор-афтершоков</i>	<i>303</i>
<i>Землетрясения и их очаги как квазичастицы</i>	<i>305</i>
Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений – закономерность сейсмического процесса	306
<i>Сейсмичность Средних Курильских островов</i>	<i>306</i>
<i>Землетрясения-дуплеты</i>	<i>307</i>
<i>Пары землетрясений</i>	<i>308</i>
<i>Структура тихоокеанского сейсмического пояса</i>	<i>309</i>

Ротационно-упругие волны	311
Физическая модель геологической среды	311
Задача об упругом поле блоковой геофизической среды	313
Дальнодействие	315
Уравнение движения однородной цепочки взаимодействующих блоков (на примере окраины Тихого океана)	316
Свойства решений	317
Характерная скорость процесса	318
Энергия сейсмического процесса	319
Волновая природа вулканизма окраины Тихого океана	320
Исходные данные	320
О периодичности вулканического процесса	321
Миграция вулканических извержений	324
О связи вулканизма и сейсмичности	327
Волновая геодинамика	328
О вращательном движении тектонических плит	328
Энергия тектонического процесса	330
Тектонические волны	334
Сейсмичность, вулканизм и тектоника как составные части волнового геодинамического процесса	336
Циркулярная поляризация ротационно-упругих волн	336
Ротации и Глобальная тектоника	337
Что же такое землетрясение и его очаг?	339
Литература	344
12. ГЕОЛОГИЯ И МЕХАНИКА	353
Форма Земли и геодинамика	353
Парадокс Эверндена	353
Оценки М.В. Стоваса	354
Ответ на вопрос Дж. Эвердена	356
Форма Земли и ее строение: новые подходы	357
Новая модель геоизостазии	357
Принцип минимизации – основной закон эволюции планет	360
Роль землетрясений в минимизации гравитационной энергии	361
Высота геоида	363
Замечание по поводу сжатия Земли	363
Принцип минимизации энергии	364
Механизмы реализации принципа минимизации	365
Процесс самоорганизации	366
Гидростатическое равновесие (на примере гравитационного поля планет)	367
Распределение плотности	368
Вихревые структуры	370
Новые данные и нестыковки	374
Фигура равновесия вращающихся тел. Вихревая задача Дирихле	375
Начальный ньютоновский этап	376
Этап Якоби	376
Этап Дирихле	377
Современный этап	378
О новой парадигме геологии	378
Поплавковые колебания Е.М. Линькова	380
Литература	381
13. ПРОБЛЕМА № 1 В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ	385

Суть проблемы геомагнетизма	385
Нестыковки	387
Бароэлектрический эффект и электромагнетизм планет	388
Резюме	391
Литература	391
14. ГЕОЛОГИЯ И ВРЕМЯ (продолжение)	393
Геология и жизнь	393
Суть проблемы	394
Обзор представлений о развитии концепции времени	395
Узловые моменты	397
Резюме	399
Литература	399
15. ХРОНИКА РАЗВИТИЯ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ	
О РОТАЦИОННЫХ И ВИХРЕВЫХ ДВИЖЕНИЯХ	401
Общий обзор	401
<i>Древний период</i>	401
<i>Эллада, древние Китай и Индия</i>	402
<i>Средние века</i>	408
<i>Эпоха возрождения</i>	410
<i>Разделение натурфилософии на естественные науки</i>	413
<i>Революция в естествознании</i>	418
<i>Современный период</i>	423
Развитие представлений об эфире, вакууме, торсионных полях,	
информации и сознании	428
<i>Древний период</i>	428
<i>Эллада, древние Китай и Индия</i>	429
<i>Средние века</i>	433
<i>Эпоха Возрождения</i>	434
<i>Разделение натурфилософии на естественные науки</i>	436
<i>Революция в естествознании</i>	440
<i>Современный период</i>	444
«Неизбежность странного мира»	449
Литература	450
ЗАКЛЮЧЕНИЕ: 20 тыс. лет истории развития вихревых движений	455
Гипотеза	456
Литература	457
ОГЛАВЛЕНИЕ	458

Учебное издание

Викулин Александр Васильевич

ФИЗИКА ЗЕМЛИ И ГЕОДИНАМИКА

Директор издательства Рязанцев А.Е.

Ответственный за выпуск Рязанцев А.Е.

Верстка, оригинал-макет А.В. Викулин
Редактор Е.А. Сиваев

Издательство Камчатского государственного университета
имени Витуса Беринга.
683032 Петропавловск-Камчатский, Пограничная, 4
тел. (415) 41-13-22

Подписано в печать 08.10.08 г.
Бумага типографская. Печать офсетная.
Гарнитура «Times New Roman».
Формат 61*86/8.
Авт. л. 45,35. Уч.-изд. л. 46,14. Усл. печ. л. 57,61.
Тираж 450 экз. Заказ № 333