

САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ ДВО РАН

Т. К. Злобин

**ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ**

Учебное пособие

Допущено УМО по классическому университетскому образованию
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направ-
лению подготовки 020300 Геология, по специальности 020301 Геоло-
гия и 020302 Геофизика.

Южно-Сахалинск
2010

УДК 551.2/.5:550,3(075.8)
ББК 26.2/3я73
З 68

*Печатается по решению учебно-методического совета
Сахалинского государственного университета, 2008 г.*

З 68 Злобин Т. К. Геодинамические процессы и природные катастрофы: учебное пособие / Т. К. Злобин. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – 228 с.

ISBN 978-5-88811-282-3

В учебном пособии рассмотрены геодинамические процессы в ядре Земли и оболочках (мантии и земной коре, гидросфере и атмосфере), вплоть до явлений в космосе, а также связанные с ними природные катастрофы. Исследованы землетрясения, извержения вулканов, оползни, лавины, сели, цунами, штормовые нагоны, кроме того, описаны тропические циклоны (тайфуны, ураганы), торнадо, падения небесных тел, инверсия магнитных полюсов, возможная история звезд, Солнца и планет и др.

Обсуждается энергия, иерархия геодинамических процессов и природных катастроф, их градация и фрактальность, периодичность, цикличность, бифуркация. Рассмотрены синергетика и нелинейная динамика.

Учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов геофизических и геологических специальностей, а также может быть использовано научными работниками, занимающимися изучением природных процессов и связанных с ними катастроф.

Рецензенты:

В. В. Адушкин, академик РАН, Институт динамики геосфер РАН;

Ф. Н. Юдахин, член-корреспондент РАН, председатель

президиума Архангельского научного центра УрО РАН;

Г. В. Шевченко, доктор физ.-мат. наук, ИМГиГ ДВО РАН;

Н. В. Шаров, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геофизики Петропавловского государственного университета.

УДК 551.2/.5:550,3(075.8)
ББК 26.2/3я73

Учебное издание

ЗЛОБИН Тимофей Константинович

Геодинамические процессы и природные катастрофы

Учебное пособие

Верстка Надточий О. А. **Корректор** Яковлева В. А.

Подписано в печать 31.03.2010. Бумага «SvetoCopy»

Гарнитура «Bukvarnaya». Формат 60х84¹/₁₆

Тираж 500 экз. Объем 14,25 усл. п. л. Заказ № 1062-8

Издательство Сахалинского государственного университета

693008, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290, каб. 32

Тел./факс (4242) 42-16-06, e-mail: polygraph@sakhgu.sakhalin.ru

ISBN 978-5-88811-282-3

© Сахалинский государственный университет, 2010

© Т. К. Злобин, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Природные катастрофы представляют большой интерес не только для ученых и специалистов самых разных направлений, но и для каждого человека в отдельности и человечества в целом, поскольку такие события происходят регулярно и даже само существование человеческой цивилизации подвержено риску глобальной катастрофы. Проявляется лишь тот или иной их вид в разных местах земного шара. Однако единой книги, в которой освещались бы все виды природных катастроф, их взаимосвязь и геодинамические процессы, являющиеся следствием катастроф, практически нет.

Что такое природная катастрофа, в принципе большинству хорошо известно. Разнообразие катастроф столь широкое, что почти все люди имеют представление о том или ином виде – будь то землетрясение, извержение вулкана, цунами, тайфуны, оползни и другие подобные явления.

Одним из наиболее ярких и известных природных катастроф являются землетрясения. Поскольку их число велико и они происходили во все времена существования планеты, в том числе и до появления человека, то любая выборка будет неполной и произвольной. В ней трудно отразить объективную картину, тем не менее приведем несколько примеров последних катастрофических событий.

В 1995 году произошло катастрофическое землетрясение в Японии (г. Кобе), погибло около 5000 человек. До этого, в 1994 году, в России имело место еще более мощное Шикотанское землетрясение с магнитудой 8,1 в районе Южных Курил, которое также сопровождалось человеческими жертвами. В сентябре 2005 года в США в г. Новый Орлеан (штат Луизиана) после урагана Катрин пострадало более 100 тысяч человек. 26 декабря 2003 года в Иране (г. Бали) от землетрясения погибло 26 тыс. человек. После землетрясения 12 мая 2008 года в Юго-Западном Китае (провинция Сычуань) погибло более 60 тыс. человек. Этот список обновляется регулярно, и он может быть продолжен. В 2001 году, например, на земном шаре было 25 тыс. природных катастроф. Кроме землетрясений огромные потери и жертвы происходят из-за ураганов, торнадо, наводнений и других видов катастроф. В 1925–1964 годах, например, в США «средние многолетние потери от всех видов природных катастроф равны 467(403) млн. долл.» [с. 494, Шебалин, 1997]. И эта цифра только растет.

К числу сейсмоопасных регионов нашей страны относят Камчатку, Курилы и Сахалин. По данным ЮНЕСКО, Сахалинская область одна из пяти регионов земного шара, где имеет место наибольшее число видов природных катастроф. Здесь происходят землетрясения, извержения вулканов, цунами (гигантские морские волны), штормовые нагоны, наводнения, ураганы, циклоны, тайфуны, снежные лавины, сели, оползни.

Достаточно назвать только последние катастрофы. Это помимо вышеупомянутого землетрясения, происшедшего 4 октября 1994 года на Южных Курилах, катастрофическое Нефтегорское землетрясение 28 мая 1995 года, имевшее магнитуду 7,1 и унесшее более 2 тыс. жизней. Оно стерло с лица земли одноименный поселок. При первом из них – Шикотанском

землетрясении на Южных Курилах «по неполным оценкам, материальный ущерб составил около 600 млрд. рублей (в ценах 1994)» [с. 55, Кайстренко и др., 1997], а ущерб Нефтегорского землетрясения – 4 трлн. 227 млрд. рублей (в ценах 1997 года) [Информационно..., 1995]. 4 (5) августа 2000 года на западном Сахалине произошло сильное Углегорское землетрясение с магнитудой 7,1. На Камчатке (в юго-западной части Корякского сейсмического пояса) 20 (21) апреля 2006 года произошло сильное землетрясение с магнитудой (M_w) равной 7,6. Полная энергия оценивается как $1,5 \cdot 10^{15}$ Дж, макросейсмическому воздействию подверглась территория порядка 400 000 кв. км, образовался сейсморазрыв 140 км, в зоне которого имели место 10–11-балльные сотрясения [Ландер и др., 2007].

В августе 2006 года на Южном Сахалине произошло Горнозаводское землетрясение, которое было лишь форшоком следующего – Невельского, произошедшего 2 августа 2007 года с магнитудой 6,2, повлекшего человеческие жертвы и сильные разрушения на юге Сахалина, включая подъем морского дна в Татарском проливе в районе Невельска [Невельское..., 2009].

Грандиозными были катастрофические землетрясения восточнее о. Симушир (на Средних Курилах) с магнитудой 8,3 и 8,1 соответственно, произошедшие 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года [Злобин, 2008; Тихонов и др., 2007]. Они вызвали цунами на Курилах, описанное в работах Б. В. Левина и др. [2008].

26 декабря 2004 года в Индонезии произошло одно из сильнейших за последние 100 лет цунами, последовавшее после Суматра-Андоманского мегаземлетрясения с магнитудой 9,3 и погубившее около 230 тыс. человек. При этом без крова осталось около миллиона человек.

Но землетрясениями, цунами и тайфунами далеко не ограничиваются виды катастроф. Что же такое природные катастрофы? Это случайность или закономерный результат природного процесса?

В. И. Арнольд *катастрофами* называет скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий [Арнольд, 2004]. По определению А. Е. Шейдеггера [1987], природная катастрофа означает нарушение стабильного состояния системы в определенном месте и в определенное время.

Можно сказать, что к природной катастрофе приводит длительное течение или резкое изменение природного процесса, которые способны вызвать в конечном счете аномальное, скачкообразное изменение природной среды, сопровождающееся человеческими жертвами.

Для изучения этих природных процессов и катастроф необходимы знания из области физики Земли (геофизики), геологии и смежных с ними дисциплин, таких, как сейсмология, электрометрия, гравиметрия, геотермия, динамическая геология, геотектоника, геодинамика, тектонофизика, физика океана и атмосферы и т. д. Важны также исследования по астрофизике (происхождение Земли, планет Солнечной системы, звезд и т. д.), образованию и строению Земли – от ядра и мантии до земной коры и самых ее верхних слоев.

Поскольку верхняя сфера Земли в значительной степени состоит из водной оболочки, слагающей Мировой океан и моря, необходимо иметь

представление и об этой оболочке, а также процессах и явлениях, происходящих в ней. Твердая оболочка и гидросфера покрываются атмосферой, возмущения в которой вызывают такие катастрофы и бедствия, как циклоны, тайфуны, торнадо (смерчи) и др. Но и за пределами атмосферы и ее сфер в космосе также происходят явления, которые могут быть источником и причиной бедствий и катастроф для людей и всего живого на Земле. Поэтому изучение природных катастроф требует комплексных исследований в самых различных областях естествознания – от геологии, геофизики до космологии и освещения очень многих вопросов.

Выделяя различные сферы Земли, и тем более тектоносферу, литосферу и астеносферу, имеющие отличный физический смысл и свойства, необходимо с ними связывать важнейшие процессы, влияющие на динамику нашей планеты и приводящие к природным катастрофам.

Настоящая работа даст обобщающее определение тому, что такое процесс. При этом в первую очередь рассмотрим те из них, которые происходят в глубинных сферах Земли, поскольку процессы в мантии и земной коре в значительной степени определяют динамику как этих основных оболочек, так и других сфер. Отметим, что глубинная динамика проявляется в конвекции, адвекции, в движениях масс вещества, блоков и литосферных плит, складчатости, нарушениях сплошности среды и поверхностностей, сейсмичности, вулканизме и т. п.

Для объяснения динамики Земли предлагались и разрабатываются в наше время много гипотез, теорий, концепций и парадигм, основные из которых будут кратко изложены в настоящей книге. Помимо этого, в данной работе будут рассмотрены динамика верхней оболочки Земли, экзогенные процессы, а также процессы, проявляющиеся в атмосфере, гидросфере, околоземном пространстве, и связанные с ними природные катастрофы.

Кроме того, будут затронуты вопросы иерархии геодинамических систем, классификации видов природных катастроф, энергетики природных процессов и катастроф, цикличности (закономерности) и периодичности природных процессов и катастроф, синергетики и нелинейной динамики.

При этом рассмотрение каждого вида катастроф построено по схеме: процесс – катастрофическое явление, вызванное им (ими), – причины и прогноз – последствия и меры защиты.

Настоящее учебное пособие написано геофизиком, академиком МАНЭБ, доктором геолого-минералогических наук, профессором Сахалинского государственного университета, заведующим лабораторией анализа природных катастроф Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук Злобиным Тимофеем Константиновичем. Автор более 30 лет работает в Российской академии наук, занимается изучением вулканов Курильских островов, землетрясений, геодинамикой и физикой Земли, строением земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги, Сахалина, Камчатки и Охотского моря. Помимо занятий научной деятельностью Т. К. Злобин более 10 лет является профессором Сахалинского государственного университета. На кафедре физики Института естественных наук СахГУ он читал спецкурсы: природные катастрофы, физика Земли, количественные аспекты физики

Земли, избранные главы теоретической физики, послужившие основой для настоящей работы.

Излагаемая в данной книге информация представляет интерес не только для специалистов, но и для студентов, аспирантов и широкого круга людей, интересующихся геодинамическими процессами и природными катастрофами.

Автор глубоко благодарен рецензентам – академику РАН В. В. Адушкину (Институт динамики геосфер РАН), член-корреспонденту РАН Ф. Н. Юдахину, доктору физико-математических наук Г. В. Шевченко (ИМГиГ РАН), а также всем тем, кто высказал полезные замечания и советы, способствовавшие улучшению работы: член-корреспонденту РАН Б. В. Левину, докторам наук Ю. К. Щукину (Институт динамики геосфер РАН), Р. З. Тарakanову, Б. Н. Пискунову, И. Н. Тихонову, кандидату физико-математических наук Л. М. Богомолу и геолого-минералогических наук В. Л. Ломтеву (ИМГиГ ДВО РАН).

Автор признателен ректору Сахалинского государственного университета Б. Р. Мисикову, а также администрации Сахалинской области за поддержку работ грантом и Министерству образования и науки Российской Федерации за финансирование фундаментальных исследований по темам НИР, результаты которых были использованы в работе.

ГЛАВА 1. ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ЗЕМЛИ, ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ И ИХ ВИДЫ

1.1. Процессы и динамика Земли

Поскольку процессы, происходящие в Земле, прямо связаны с природными катастрофами, проявляющимися во всех сферах планеты, дадим им определение.

Процесс (*processus* – продолжение) – это последовательная смена явлений, состоящая в развитии чего-либо; тесная связь закономерно следующих друг за другом стадий развития, представляющих непрерывное движение или совокупность последовательных действий для достижения какого-либо результата (быстрого или медленного). Именно неким конечным результатом процесса может стать та или иная природная катастрофа.

В настоящей работе коснемся процессов, которые происходят в глубинных сферах Земли, прежде всего, в мантии и земной коре, ибо они в значительной степени определяют динамику этих основных оболочек. Прежде всего эти процессы проявляются в конвекции, адвекции, движениях масс вещества, блоков и литосферных плит, складчатости, нарушениях сплошности среды и поверхностей, сейсмичности, вулканизме и т. п.

Процессы, происходящие в Земле, можно рассматривать в соответствии со сферами их проявления. Это, прежде всего, планетарные процессы (вращение Земли, дифференциация вещества, дрейф континентов). В ядре (внешнем) они проявляются в конвекции, адвекции вещества от границы ядра [Добрецов и др., 2001]. Кроме того, в мантии имеют место плюмы, конвекция, адвекция, спрединг, субдукция, орогения. При этом в астеносфере мантии могут возникать диапиры (локальные мантийные ячейки). В земной коре, это прежде всего, эндогенные процессы: вулканизм и землетрясения, гравитационная дифференциация, вертикальные и горизонтальные движения, а также генерация нефти и рудогенез, интрузивный магматизм и др. Некоторые из этих процессов имеют место и в верхней мантии. В верхних частях земной коры проявляются также экзогенные процессы (выветривание, эрозия, седиментация и т. д.). Кроме того, происходят разные по мощности и воздействию процессы во внешних оболочках (гидросфера, атмосфера, ионосфера), которые в настоящем разделе не рассматриваются.

Таким образом, есть процессы, которым подвержены все оболочки (например, вращение Земли, тепловые потоки), а есть те, которые зарождаются в конкретных сферах. Например, зарождение на границе ядра Земли плюмов и распространение их в мантии, наличие очагов землетрясений в верхней мантии и коре, вулканических очагов в земной коре и частично в верхней мантии, образование углеводородов и других полезных ископаемых в структурах осадочного слоя коры.

Явно планетарное выражение имеют пояса (сейсмические, вулканические и т. д.). Согласно классификации [Злобин, 2008], видно, что такие структуры, как сейсмофокальные зоны (СФЗ), проявляются в сфере верх-

ней и, возможно, средней мантии и земной коре, разломы – в земной коре и верхней мантии и т. д. В то же время конвекция может быть не только в мантии (верхней, средней и нижней), но и в ядре (внешнем). В земной коре в целом она не проявляется, хотя в гидротермальных системах может быть ярко выражена.

Вполне понятно, что в сторону уменьшения рангов (сфер) и объектов (сфер, доменов) можно продолжать классификацию в пределах верхнего слоя Земли. Например, в осадочном слое можно выделять толщи, свиты, слои, прослои, породы, минералы и т. д.

Необходимо отметить, что, как следует из классификации автора [Злобин, 2008], ряд процессов происходит не в одной какой-то сфере, а в нескольких из них. С одной стороны, это связано с отсутствием четкой границы между ними и недискретностью физических свойств, а также с тем, что параметры, поддерживающие процесс и необходимые для его существования, не являются непосредственно пограничными параметрами сфер.

В геодинимике выделяют три группы процессов: общепланетарные; межранговые (между геосферами), затрагивающие несколько сфер; локальные, присущие только одной сфере и ее части.

При таком подходе можно сгруппировать геодинимические процессы и оценить каждый из них, его специфику, причины, области ограничения. Как писал академик В. В. Адушкин с соавторами: «Земля с внутренними и внешними геосферами представляет собой единую открытую динамическую систему. Взаимодействие между геосферами обуславливает взаимное влияние и связи протекающих в них процессов, а также эволюционное развитие Земли в целом. Интенсивность межгеосферных взаимодействий во многом определяется динамикой эндогенных процессов, внешних возмущений в виде сил гравитационного взаимодействия в системе Земля – Солнце – Луна, а также мощных потоков солнечной энергии космического вещества» [Адушкин и др., 2005, с. 3].

Определим, что понимается под динамикой, и в том числе геодинимикой (динамика Земли), ее место среди других наук и составные части. При этом рассмотрим основные положения и особенности, дадим ее определение.

Известно, что исследованием Земли в целом и ее различными аспектами занимается геология и многочисленные науки (дисциплины), вытекающие из нее, – от тех, которые занимаются веществом (минералогия, кристаллография, петрология, геохимия и т. д.), до космической геологии, изучающей строение и происхождение планет. Они представляют направления изучения такого сложнейшего объекта, которым является наша планета.

При этом изучением глубинного строения (структуры) Земли занимается прежде всего геофизика, позволяющая методами физики выявить ее скрытое глубинное строение и физические поля. Как известно, физика по объектам исследований делится на физику элементарных частиц, атомных ядер, атомов, молекул, сплошных сред, плазмы и т. д. Физика твердого тела, в свою очередь, включает физику Земли, т. е. геофизику. При исследовании этих объектов различают ряд разделов: классическая механика, электродинамика, термодинамика, статистическая физика, фи-

зика сплошных сред, теория относительности, квантовая механика, квантовая теория поля. Одним из основных разделов теоретической физики является классическая механика. Она, в свою очередь, включает в себя *статику и динамику*.

Статика, как известно, представляет собой раздел механики, изучающий условия равновесия тел под действием сил. При этом различают статику твердых тел, статику жидкостей (гидростатика) или статику газов (аэростатика).

Динамикой же является раздел механики, в котором изучают движение тел под действием приложенных к ним сил. Для лучшего объяснения динамики используем понятие «статические и динамические модели». Так, если статические модели характеризуют состояние системы в определенный момент в определенном месте, то в отличие от них динамические модели описывают *изменение* параметров системы *во времени* под воздействием сил. Таким образом, динамической системой является совокупность взаимодействующих объектов, состояние которой *изменяется во времени*, то есть параметры такой системы изменяются во времени и пространстве. После вышесказанного становится понятнее суть динамики Земли и ее место в ряду других дисциплин.

Прежде всего, под динамикой Земли (геодинимикой) понимают механику глобальных процессов в Земле. В более узком плане можно говорить, что «геодинимика изучает движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии и ядре, и причины таких движений и деформаций» [Теркот, Шуберт, 1985, с. 7]. Таким образом, обычно под динамикой Земли (геодинимикой) понимают, прежде всего, механику глобальных процессов в Земле. Однако она, в свою очередь, связана с тепловыми (а), физико-химическими (б) и электромагнитными (в) явлениями.

Параметры геофизических полей (упругие, магнитные, электрические и тепловые) являются наиболее динамичными, то есть значительно изменяющимися во времени. Они наиболее быстро реагируют на изменения, происшедшие в Земле. Вполне понятно, что изменения в гравитационном поле будут иметь место при перемещении масс вещества в любой из ее оболочек, будь то земная кора, мантия или ядро. Также они проявляются в вариациях магнитного поля, упругом поле. Изменения полей – производное явление.

Кроме этих полей важнейшим являются тепловые поля. Причем, например, Д. Теркот и Дж. Шуберт [1985] важнейшую роль отводят именно теплу, которое считают первоисточником энергии геодинимических процессов. Оно существует в Земле со времени ее образования. Также энергия выделяется при распаде радиоактивных элементов. Тепло из недр выводится посредством конвекции, с которой связывается движение литосферных плит.

Определяя геодинимику, надо отметить, что это научная дисциплина, образовавшаяся на стыке геотектоники и геофизики. Согласно В. Е. Хаину, она «освещает методами геофизики, математического и физического моделирования характер и закономерности течения процессов, определяющих эндогенную активность и структурные преобразования Земли в целом» [Хайн, 1985, с. 6].

Различают динамику Земли как планеты в целом и динамику каких-либо ее сфер или частей. В соответствии со структурным делением Земли на геосферы выделяют динамику ядра, мантии, литосферы и земной коры, динамику гидросферы, атмосферы и динамику околоземного космического пространства. Названные геосферы могут быть объединены. Первые три некоторые ученые, по нашему мнению, объединяют не совсем корректно в динамику *внутренних* геосфер, вторые – в динамику *внешних* геосфер. Причем поскольку, по определению А. Е. Шейдеггера [1987], нарушение стабильного состояния системы в определенном месте и в определенное время может являться природной катастрофой, то, исследуя динамические процессы и их нарушения, происходящие в соответствующих сферах Земли (литосфера, гидросфера и т. д.), можно изучать природные катастрофы, такие, как землетрясения, извержения вулканов и т. п.

Таким образом, можно говорить о прямой связи процессов, динамики Земли и природных катастроф. Следовательно, изучая различные процессы и сферы Земли, можно исследовать и катастрофические явления, происходящие в них, например как это было сделано при рассмотрении природных катастроф в литосфере сейсмоактивного Сахалино-Курильского региона, часть которого (Курильская островная дуга) относится и к области активного вулканизма [Злобин, 2000].

В свою очередь, в составе названных сфер можно выделять по каким-либо признакам их части, например, динамику биосферы, разломов, литосферных плит, рифтовых зон, а также динамику различных естественных процессов (гидротермальных, метаморфизма, динамику гроз и т. п.). Причем каждый из названных разделов представляет довольно значительное направление в науке, например, динамика метаморфизма, сейсмичности и т. д. Рассматривая различные явления и их местоположение, можно, например, исследовать динамику землетрясений Тихоокеанского подвижного пояса, динамику процесса подготовки сильных землетрясений Сахалина и Курил [Злобин, 2005], динамику тайфунов и муссонов Юго-Восточной Азии и т. д.

В целом для объяснения динамики Земли предлагались ранее и разрабатываются в наше время много гипотез, теорий, концепций и парадигм. Основные из них изложены во второй главе.

С динамикой основных оболочек (геосфер), таких, как ядро, мантия, земная кора, а также тектоносферы, литосферы и астеносферы, имеющих отличный физический смысл и свойства, связаны важнейшие процессы, влияющие на динамику Земли в целом и приводящие к таким явлениям, как природные катастрофы.

Все процессы и их динамика на Земле могут быть разделены на две основные части – глубинные (внутренние) и приповерхностные процессы.

1.2. Основные сферы Земли, структуры, процессы и иерархия геодинамических систем

Назовем основные сферы Земли, структуры и процессы, а затем рассмотрим их и представим в виде единой системы.

Сферы

Основными сферами и оболочками планеты являются:

- планета в целом;
- ядро (внутреннее и внешнее, переходный слой);
- мантия (верхняя, средняя, нижняя, переходные слои);
- земная кора;
- слои земной коры, среди которых выделяют нижний (гранулитобазитовый, базальтовый), средний (гранитометаморфический, объединяющий гранитогнейсовый и гранулитогнейсовый слои) и верхний (осадочный, вулканогенно-осадочный).

В. Е. Хаин [2003] объединяет их в три еще более крупные таксономические единицы: первая – тектоносфера (земная кора и верхняя мантия – литосфера плюс астеносфера); вторая – мезосфера (нижняя мантия); третья – ядро.

Структуры

Структуры Земли можно разделить по масштабам их мест проявления:

- планетарные (континенты, океаны, зоны перехода); ядро – внутреннее, внешнее и переходный слой; в мантии выделяют нижнюю, среднюю и верхнюю, включая переходные слои. В ней имеют место: плюмы; апвеллинги; диапиры, зоны конвергенции и дивергенции (зоны коллизий, субдукции, спрединга); сейсмофокальные зоны (СФЗ), глубинные тектонические структуры (разломы) и др.;
- литосфера (верхняя мантия и земная кора); литосферные плиты (блоки), СФЗ, глубинные разломы;
- земная кора, включающая консолидированную часть и верхний (осадочный) слой. Здесь выделяют: геосинклинальные пояса, подвижные пояса, срединно-океанические хребты (СОХ), складчатые вулканогенные пояса, орогенные пояса (эпиplatformенные орогены), горные складчатые сооружения, океанические плато и глубоководные впадины, континентальные и океанические рифты. Кроме того, можно назвать сейсмофокальные зоны, глубинные тектонические структуры, региональные разломы, островные дуги и др.;
- верхний слой (осадочные бассейны, террейны, складчатые и вулканические пояса, тектонические покровные структуры (шарьяжи), складчатые (эндогенные и экзогенные) структуры, локальные структуры (ловушки углеводородов), складчатые дислокации, сейсмостектонические подвижки и инъективные дислокации (по Ю. А. Косыгину) и др.

Процессы

Процессы также можно классифицировать в соответствии со сферами их проявления:

- ♦ планетарные (вращения земли, дифференциации, дрейф континентов);
- ♦ в ядре (внешнем) – конвекция, адвекция;
- ♦ от границы ядра и в мантии – плюмы [Добрецов и др., 2001];
- ♦ в мантии – конвекция, адвекция, плюмы, спрединг, субдукция, орогения;
- ♦ в астеносфере – диапиры (локальные мантийные ячейки);
- ♦ в земной коре, прежде всего, эндогенные процессы – вулканизм и землетрясения, техногенно-инициированные [Адушкин и др., 2008], а также гравитационная дифференциация, вертикальные и горизонтальные

движения, генерация нефти и рудогенез, интрузивный магматизм и др. Некоторые из этих процессов в Земле имеют место и в верхней мантии. В верхних частях земной коры проявляются также экзогенные процессы (выветривание, эрозия, седиментация и т. д.). Кроме того, происходят разные по мощности и воздействию процессы во внешних оболочках.

Природные катастрофы связаны с различными геодинамическими процессами в недрах Земли. Отмечено, что тектоносфера Земли состоит из разноранговых и разноплановых неоднородностей [Ф. Н. Юдахин с соавторами, 2003].

Рассмотрим иерархию геодинамических систем и схему геодинамики иерархически соподчиненных геосфер М. А. Гончарова и др. [2005]. Это одна из довольно стройных концепций, которая охватывает многие стороны геотектоники и геодинамики.

Их идея заключалась в совмещении, казалось бы, противоречивых представлений и разграничении по глубине и времени областей действия разных гипотез и теорий. При этом для одних процессов ими являются, согласно его иерархии, верхняя часть земной коры или осадочный чехол (глубины 5–15 км); для других – литосфера и верхняя мантия; для третьих – мантия, ядро и наконец вся Земля. Идея понятная, логичная и плодотворная. Свою модель М. А. Гончаров представил в виде таблицы иерархически соподчиненных геосфер.

Его классификацию можно принять, но, как нам представляется, есть и другие варианты иерархии структур, сфер и процессов. Так, предложенная им иерархия по глубинам уже может вызывать некоторые возражения. Например, земная кора явно существенно отличается от нижележащей мантии (по степени дифференциации, неоднородности, скорости сейсмических волн и особенно градиенту скорости и т. д.), поэтому уместно выделить ее в отдельный ранг.

Структуры верхнего осадочного слоя земной коры важны для генезиса многих полезных ископаемых, например, углеводородов. Вместе с тем достаточно хорошо выражены, изучены и имеют свои характерные особенности тектоники других слоев консолидированной коры. В классификации же М. А. Гончарова выпал диапазон глубин от 15 до 50 км (т. е. консолидированная кора), а диапазон глубин 50–100 км очень формализован, поскольку в горных системах он может включать нижние слои земной коры и подкоровый слой верхней мантии. То же относится к глубинам 100–220 км, 300–400 км и маломощному слою 660–670 км, который уместно считать пограничным. Содержание ранга ГС-0 (геосфера – вся Земля) и ранга ГС-1 (вся мантия – глубины 2900 км), безусловно, понятно и целесообразно. Однако между ними выпадает важнейшая для геодинамики сфера – ядро (внутреннее и внешнее, которые, как хорошо известно, принципиально отличаются друг от друга). Поэтому идею М. А. Гончарова и других можно считать полезной, прежде всего, благодаря градации рангов сфер, указанию циклов Вильсона, Бертрона, глубинам и процессам, разграничивающим разноранговые гипотезы. Необходимо добавить, что в схеме М. А. Гончарова фигурируют не все геосферы, а только те, в которых происходит конвекция, в том числе и двухъярусная, причем этот процесс ограничен подошвой и кровлей такой геосферы и не выходит

за ее пределы. С этой точки зрения под данный критерий подходит, например, «совокупная» геосфера – астеносфера плюс литосфера (ГС-3) с инверсией плотности, возбуждающей конвекцию.

В таблице 1.1 предлагается классификация геосфер, структур и процессов. Она построена на сходных, но несколько отличающихся критериях. Из нее видно, что практически нет сквозных структур или процессов либо рассмотреть их можно только в рамках разноранговой системы, в соответствии со сферой их проявления.

Таблица 1.1.

№ сфер	Сферы проявления (глубины, км)		Ареал, зоны, структуры	Процессы (основные)	Концепции
1	Земля в целом 6371		Повсеместно	Гравитационные, вращения, электромагнитные, тепловые, дрейф континентов	Астрономические
2	Ядро	Внутреннее 6371/5120	Повсеместно	Вращение, гравитационные, дифференциация	Астрономические
		Внешнее 5210–2900	Повсеместно	Вращение, гравитация, конвекция, тепловые	Тектоника роста
3	Мантия	Нижняя 2900–1700	Повсеместно	Созидание и распад суперконтинентов, конвекция, адвекция, диапиры, плюмы, горячие точки (субдукция [?], спрединг)	Плюм-тектоника
		Средняя 1700–670			
		Верхняя 670–33	Зоны конвергенции, дивергенции, коллизии, СФЗ***		
4	Литосфера, астеносфера	от 300–400 до 25–75	Континенты, океаны, зоны перехода, литосферные плиты, разломы, сейсмофокальные зоны	Эндогенные процессы, изостазия, сейсмичность	Тектоника плит

№ сфер	Сферы проявления (глубины, км)		Ареал, зоны, структуры	Процессы (основные)	Концепции
5	Земная кора* 70–10– 6–20**	Нижняя от 40–10 –3–10**	Платформы, пояса (срединно-океанические, складчатые, подвижные, геосинклинальные, орогенные, сейсмические). Слои, блоки, области неоднородностей, градиентные зоны, разломы	Эндогенные процессы, вулканизм, сейсмичность	Тектоника плит
		Средняя 20 до 1–3		То же	
		Верхняя 10–0,5	Бассейны, прогибы, рифты, поднятия, купола, валы, разломы, складчатые и локальные структуры	То же плюс экзогенные процессы	Тектоника плит (?)
		Осадочный чехол 15–0,5		Седиментация, деформация, метаморфизм	

*Нижний слой, по классификации В. В. Белоусова, Н. И. Павленковой, называется гранулитобазитовый (базальтовый), средний гранулитогнейсовый, верхний гранитогнейсовый.

**Первое верхнее значение относится к континентальной коре, второе – к океанической и субокеанической.

***СФЗ – сейсмофокальные зоны.

При таком подходе можно разграничить сферы действия, сгруппировать геодинамические процессы по иной схеме, адекватно отражающей геологическую и геофизическую реальность. Это позволяет оценить возможности каждого процесса, его специфику и причины, области ограничения и понять, что каждая из них применима для определенного диапазона глубин и, таким образом, не противоречит одна другой.

1.3. Фрактальность и градации систем

Фрактальность (делимость) различных структур может быть подчинена определенной закономерности. Попытки создания некоей иерархии систем в природе предпринимались давно – от Леонардо да Винчи и М. А. Садовского до В. Г. Спунгина, Д. С. Зыкова и других [Садовский, 1989; Спунгин, Зыков, 2006]. Например, закономерность чередования размеров блоковых моделей земной коры впервые применил в сейсмологии и геодинамике академик М. А. Садовский, который и предложил соответствующую иерархию [Садовский, Писаренко, 1989].

Вышеназванные в таблице 1.1 разноранговые структуры, прежде всего,

разноглубинные, то есть ранги, отвечающие разным диапазонам глубин и имеющие разные размеры. Они могут подчиняться определенной градации, фрактальности. Если измерять ее в линейных размерах, то отметим основные рубежи (глубины): до центра Земли (6371 км), до поверхности внутреннего ядра (5100 км), до подошвы нижней мантии (2900 км), подошвы средней мантии (1700 км), подошвы верхней мантии (660–670 км), а также значение в 400 км (слой Гутенберга). Заметим, что последний (400 км), как и раздел на глубине 210 км, вероятно, связан с фазовыми переходами [Хаин, 2003]. Отметим, что мантию первоначально разделяли на верхнюю и нижнюю. Ю. М. Пушаровский [2001] с учетом данных о вещественном составе и сейсмических рубежах выделяет шесть геосфер: верхи верхней мантии (до 410 км), ее низы (до 670 км); средняя мантия на глубинах 840–1700 км; нижняя мантия – 2220–2900 км. Кроме того, он выделяет две зоны раздела. Первая расположена между верхней и средней мантией (глубины 670–840 км), вторая отделяет среднюю мантию от нижней (глубины 1700–2200 км) [Пушаровский, 2001, с. 21]. Таким образом, этот автор предлагает выделять границы глубинных геосфер Земли на глубинах 5146, 2900, 2200, 1700, 840, 670 и 410 км.

На глубинах от 100 – 300 км (на континентах) до 10–80 км (в океане и морях), как известно по А. В. Бали [1979], устанавливается подошва литосферы. Также подошва земной коры, залегающая на глубине от 5–6 км (в океане) до 40–75 км на континентах, в среднем ее глубина составляет 33 км. В коре на глубине 15–20 км известна граница Конрада, разделяющая нижний (гранулитобазитовый, или базальтовый) и средний (гранито-метаморфический, или гранитный) слои. Кровля последнего располагается на глубинах до 10 км и является подошвой верхнего, осадочного или осадочно-вулканогенного слоя коры.

Суммируя все вышесказанное, получим следующий ряд: 6371, 5146, 2900, 2200, 1700, 840 (800–10000), 670 (660), 410, 210, 33, 18, 10 км. По глубине обычно классифицируют и разломы: сверхглубинные (700 км), сквозькоровые (40–50 км) и коровые (15 км и более).

Согласно представлениям М. А. Садовского [1989], иерархическая последовательность горных пород охватывает огромный диапазон масштабов – от микроскопических объектов до Солнечной системы и варьирует в пределах от двух до пяти, описывается геометрической прогрессией с коэффициентом $K=3,5 \pm 0,9$, то есть с разбросом (отклонением) коэффициента $\pm 25\%$. Таким образом, если использовать коэффициент прогрессии М. А. Садовского ($K=3,5$), то для Земли получим ряд значений глубин слоев Земли: 6371; 1820; 520; 148; 42; 12; 3,4 км.

Рассматривая фрактальность, Г. А. Соболев [2003], Е. И. Шемякин [2001] и другие пришли к выводу, что коэффициент K означает размерность пространства и для трехмерных тел он равен трем. В. И. Уломов, В. Г. Спунгин и другие получили значение $K=\sqrt{2}$ или в диапазоне от 1,26 до 2,11. Отношение соседних модальных значений были равно 1,67 и 1,4. Это соответствовало универсальной пропорции золотого деления, или золотого сечения ($S=1,63$), введенного еще Леонардо да Винчи. Мы просчитали в соответствии с этой пропорцией размеры (радиусы) частей (сфер) Земли, взяв в качестве целого радиус Земли $R=6371$ км и про-

порцию золотого сечения Леонардо да Винчи равную $S=1,63$ и получили следующие значения (с отклонением до 25 %): 6371; 3908 (2900–5100), 2397 (1897–2900); 1471; 902 (810–1001); 553 (498–608); 339 (400); 208; 127; 78; 48 км. Разделы на глубинах 29,5; 18 и 11 км относятся к консолидированной коре, а на глубинах 6,8; 4,2; 2,5; 1,5 км – к ее осадочному чехлу.

Сравнив их с глубинами основных разделов Земли, установленными по данным геофизики (см. выше), видно их принципиальное соответствие, что подтверждает и В. П. Макаров [2005]. Так, глубина раздела внешнего и внутреннего ядра равна 5100 км, то есть отклоняется на 25 %. Раздел ядро – мантия, залегающий на глубине 2900 км, отклоняется на 16 % и т. д. Глубины остальных разделов варьируют в среднем от 10 до 16–18 %. Таким образом, точного соответствия этой градации нет, но есть небольшие отличия. Граница в мантии на глубине 902 км расположена с 10-процентным разбросом в диапазоне от 810 до 1001 км. В учебнике В. А. Магницкого [1983] она выделена на глубине 1000, а в работе Ю. М. Пушаровского [2001] – 840 км. В нижней мантии не идентифицирована только граница на глубине около 1471 км. Выше на глубинах 650 и 400 км многие исследователи отмечали границы, имеющие, по-видимому, глобальное распространение. Поэтому можно сказать, что и разделы верхней мантии на глубинах 553 и 339 км, согласно расчетам по золотому сечению, отвечают реальным существующим границам с точностью до 17–18 %.

Вышележащие границы на глубинах 208, 127, 78 и 48 км выделены в литосфере. О наличии границы на глубине 210 км указывал В. Е. Хаин [2003]. Остальные границы есть на многочисленных сейсмических разрезах литосферы (А. В. Егоркин, В. З. Рябой и др.). Однако из-за изменчивости глубин их залегания в разных регионах их трудно идентифицировать.

Следующие три диапазона глубин, средние значения в которых 29, 5, 18 и 11 км, хорошо известны. Первая из них соответствует подошве земной коры (граница Мохоровичича – М), залегающей в среднем на глубине 33 км. Вышезалегающая граница расположена на глубине 18 км и соответствует разделу Конрада, выделяемому в континентальной коре на глубинах в среднем 15–20 км.

Очередная глубина (11 км) соответствует среднему положению границы в среднем (гранитометаморфическом) слое. Она, как известно, делит его на гранитогнейсовые и гранулитогнейсовые слои. Эта же граница является в ряде мест и подошвой осадочного (осадочно-вулканогенного слоя, по данным Н. И. Павленковой, А. В. Егоркина, Т. К. Злобина и др.). Заметим, что по сейсмологическим данным на глубине 10–12 км Ф. Н. Юдахин выделяет сейсмический волновод.

Залегающие выше многочисленные слои в верхнем, осадочно-вулканогенном слое расположены на разных глубинах (6,8; 4,2; 2,5 и 1,5 км) и в разных регионах могут иметь различные значения. Отметим лишь, что нашей модели (4–6, 3–5, 2,5–3,0 км) они вполне соответствуют.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод: установленное по геологическим и геофизическим данным деление Земли на сферы имеет определенную градацию и иерархическую структуру, близкую золотому сечению, хотя полного соответствия не наблюдается.

1.4. Природные катастрофы, их классы и виды

Также могут классифицироваться и катастрофические явления, обусловленные геодинамическими процессами, представленными выше. Все катастрофы на Земле можно разделить на три основных класса: I – природные, II – социальные, III – техногенные. Первому посвящается основная часть настоящей работы.

I. Природные катастрофы

Прежде чем оперировать какими-либо терминами, надо дать их определения. Итак, что же такое природная катастрофа? Напомним, В. И. Арнольд назвал катастрофами скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий.

По определению А. Е. Шейдегера [1987], **природная катастрофа** – это нарушение стабильного состояния системы в определенном месте и в определенное время. Другими словами, это резкое изменение некоего процесса в какой-либо из сфер Земли, приводящее к большим жертвам. Здесь есть два аспекта. С одной стороны, это изменение абсолютной физической величины, например, залегания горных пород при землетрясении или усиление ветра при ураганах, а с другой – степени населенности места, где произошло событие. При этом к катастрофе могут привести как быстрые процессы, так и медленные. Поэтому мы определили природную катастрофу как *природный процесс, длительное течение или резкое изменение которого может привести к аномальному изменению природной среды, способному вызвать большие человеческие жертвы*. Понятно, что пяти-, семибалльное землетрясение может вызвать куда больше жертв в густонаселенном Лос-Анджелесе или Токио, чем более сильное землетрясение на почти необитаемых Курильских островах или пустынях Монголии. Так и снежные лавины в густонаселенных Альпах несравнимы по числу жертв с тем, что где-то в безлюдной Антарктиде оторвется гигантская масса льда (айсберг). А сель, пронесшийся в ущелье Медео над бывшей столицей Казахстана Алма-Атой, – это, конечно, совсем не то, что выплеснувшееся озеро где-то далеко в горах. Таким образом, определение «*катастрофа*» имеет многофакторную характеристику. Добавим, что катастрофа – это то, чего в некоторых случаях можно было бы избежать.

Классификация природных катастроф

Для того, чтобы настоящее изложение представлялось в виде стройной и логичной системы, построим классификацию на основе последовательного рассмотрения сфер проявления природных катастроф. В твердой Земле В. Е. Хаин [2003] выделяет тектоносферу (земная кора и верхняя мантия в составе литосферы и астеносферы), мезосферу (нижняя мантия) и ядро.

При более детальном рассмотрении можно анализировать и отдельные структуры планетарного, регионального или локального масштаба. Они могут быть планетарными (континенты, океаны, зоны перехода) или связаны с ядром (внутренним или внешним) либо мантией. При этом здесь

могут иметь место зоны конвергенции и дивергенции (зоны коллизии, субдукции, спрединга); сейсмофокальные зоны (СФЗ), глубинные тектонические структуры (разломы), диапиры и др.

В литосфере (верхняя мантия и земная кора) выделяют литосферные плиты (блоки), СФЗ и глубинные разломы. В земной коре, включающей консолидированную часть и верхний (осадочный) слой, выделяют: геосинклинальные, подвижные пояса, срединно-океанические хребты (СОХ), складчатые вулканогенные, орогенные пояса (эпиплатформенные орогены), горные складчатые сооружения, океанические плато и глубоководные впадины, континентальные и океанические рифты. Кроме того, можно назвать сейсмофокальные зоны, глубинные тектонические структуры (разломы), региональные разломы, островные дуги, а в верхнем слое – осадочные бассейны, террейны, складчатые и вулканогенные пояса, тектонические покровные структуры (шарьяжи), складчатые (эндогенные и экзогенные), локальные структуры (ловушки углеводородов), складчатые и пликвативные дислокации, сеймотектонические подвижки и дислокации, инъективные формы дислокаций и др.

Они обусловлены неизмеримо более сложными для изучения процессами. Это связано с бесчисленным количеством параметров объекта (Земли), к тому же измеряемых по времени от ничтожно малых периодов (тысячных долей секунды и наносекунд) до миллионов и миллиардов лет. Число видов также велико.

Соответственно необходимо изучать проявление процессов в Земле и прежде всего динамику литосферы (землетрясения и извержения вулканов), гидросферы (цунами, наводнения, штормовые нагоны) и гидросферы (циклоны, ураганы).

В настоящей работе мы рассмотрим основные сферы в последовательности от ядра Земли до поверхности и за ее пределами, в космосе. Первоначально определим катастрофы в целом в геосфере, затем во внутренней геосфере (ядро, мантия, литосфера) и во внешней (гидросфера, атмосфера), космосе. При этом в таблице 1.2 приведем все классы катастроф, включая социальные и антропогенные, которые происходят в ноосфере и биосфере.

Таблица 1.2.

Классы и виды катастроф

№	Класс катастроф	Сфера проявления	Вид катастроф
1	2	3	4
IA	Природные катастрофы (медленные)	Геосфера (ядро, внутреннее и внешние оболочки)	1. Катастрофы, связанные с изменением глобальных параметров Земли – скорости и наклона оси вращения Земли 2. Инверсия магнитных полюсов Земли 3. Срыв электрических токов на ядре 4. Глобальное изменение климата

№	Класс катастроф	Сфера проявления	Вид катастроф
1	2	3	4
			5. Погружение морских побережий 6. Изменение направлений морских течений
IB	Природные катастрофы (быстрые)	<i>Литосфера</i> (земная кора и верхняя мантия)	1. Землетрясения 2. Извержения вулканов
		<i>Земная кора</i> (приповерхностная часть)	1. Обвалы, горные удары, карсты 2. Оползни, осыпи 3. Сели (лахары) 4. Лавины, турбидитные потоки
		<i>Гидросфера</i>	1. Цунами 2. Штормовые нагоны 3. Наводнения 4. Паводок
		<i>Атмосфера</i>	1. Тропические циклоны 2. Ураганы (тайфуны) 3. Торнадо 4. Пылевые бури (смерчи) 5. Грозы, электрические явления в атмосфере
		<i>Стратосфера</i>	Озоновые дыры
		<i>Космос</i>	Падение небесных тел (метеоритов, астероидов, комет)
		<i>Биосфера</i>	1. Резкое увеличение популяции насекомых (саранча, термиты и др.) 2. Пандемии, эпидемии (резкое увеличение количества патогенных микроорганизмов) 3. Косвенные геоэкологические последствия (падение урожайности и др.)
II	Социальные катастрофы	<i>Ноосфера</i>	1. Войны 2. Революции (перевороты)
III	Антропогенные	<i>Биосфера</i>	1. Экологические 2. Засуха 3. Пожары
		<i>Ноосфера</i>	Техногенные

Рассматривая катастрофы, связанные с геосферой, будем также логически следовать от центра Земли к ее поверхности. При этом выделим

подклассы – медленные и быстрые катастрофы. Среди первых отметим те, которые вызваны изменением скорости вращения Земли, ее орбиты, наклона оси вращения, напряженности магнитного поля, инверсией магнитных полюсов, радиуса ядра. Отдельно следует рассмотреть срыв электрических токов на ядре. К этому же подклассу следует отнести глобальные катастрофы планеты, связанные с изменением климата Земли, погружением морских побережий и изменением направлений морских течений. Эти и другие нижеприведенные виды катастроф рассмотрим в соответствующих главах. Второй и третий классы не являются предметом настоящей работы, поэтому отметим их лишь кратко.

II. Социальные катастрофы

Среди названных катастроф самыми глобальными по числу жертв являются социальные катастрофы. К ним относятся, прежде всего, войны и революции. Вспомним число жертв Второй мировой войны (более 20 млн.), сталинских репрессий, последствия революции 1917 года и Гражданской войны (около 50 млн. человек). Об экономических последствиях революций и войн всем известно. Поэтому на первое место по тяжести последствий можно поставить социальные катастрофы.

III. Техногенные катастрофы

Техногенные катастрофы возникают вследствие горных работ, при недопустимой форме эксплуатации нефтепромыслов и нефтегазопроводов (например, на севере Сахалина) и т. д. К техногенным катастрофам относятся аварии гидро- (Саяно-Шушенская ГЭС) и атомных (Чернобыльская АЭС) станций, то есть это те трагические случаи, которые обусловлены деятельностью человека. Причем последние приводят не только к техногенным катастрофам, но и нередко способствуют возникновению природных катастроф, например, уничтожению озонового слоя.

ГЛАВА 2 ГЛУБИННЫЕ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ДИНАМИКА ПЛАНЕТЫ И ЯДРА, СВЯЗЬ С НИМИ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

2.1. Динамика глубинных процессов и ядра Земли

2.1.1. Динамика глубинных процессов

Во внутренних сферах Земли динамика ее проявляется как в эндогенных, так и в экзогенных процессах. Так, ее можно видеть в тектонических движениях, магматизме, метаморфизме, землетрясениях и др. Эти процессы бывают медленными (сотни тысяч и миллионы лет) и быстрыми (вплоть до секунд). Результаты медленных процессов выражаются прежде всего в *тектонических движениях и дислокациях земной коры*.

Движения земной коры происходят в результате напряжений, они вызывают деформацию слоев Земли. Отметим, что *напряжением* называется внешняя сила, действующая на единицу площади, а *деформацией* – изменение формы и размеров тела под действием напряжения. При этом деформирующей силе противостоит сопротивление материала (горной породы), от которой зависит помимо напряжения величина деформации. Заметим, что предельное сопротивление материала, то есть прочность, различна при растягивающих и сжимающих силах (нагрузках). При этом растяжение примерно на порядок ниже.

В результате деформации в горных породах происходят складчатые, или пликативные, и разрывные, или дизъюнктивные, *дислокации*, то есть нарушения. Ю. А. Косыгин предложил выделять еще инъективные дислокации. Возникающие в их результате складки, трещины, разрывы называются дислокациями горных пород (*лат.* «дислокатио» – нарушаю), которые изучает структурная геология.

Тектонические движения – основное проявление динамики планеты. Относительно поверхности Земли они могут быть *вертикальными* или *горизонтальными*. Соответственно они по-разному ориентированы: перпендикулярно к поверхности Земли, по радиусу (*радиальные*) или касательно поверхности (*тангенциальные*). Благодаря различным направлениям и сочетаниям движений возникают различные геологические структуры. Так, растяжение в горизонтальном плане порождает опускание, а горизонтальное сжатие слоев приводит к короблению их в складки и подъему. При изгибе слоев наблюдается растяжение и опускание [Якушова и др., 1988].

Медленные процессы могут длиться многие миллионы лет. Движения, происходившие последние 30–40 млн. лет, считаются в геологии *новейшими*. Это и не удивительно, если знать, что возраст Земли составляет около 4,45 млрд. лет [Жарков, 1983]. Новейшие движения находят свое отражение в современном рельефе Земли, выражающемся в поднятиях гор, опусканиях, создавших на суше низменности, а под акваториями – впадины морей и океанов. Величина тектонического опускания, установленная, например, по погружению рифовых известняков в атоллах Тихого

океана, превысила 1000 м. Максимально можно говорить о величине вертикальных движений в десятки километров [Якушова и др., 1988].

Сложнее обстояло дело с определением максимальной величины горизонтальных движений и их признанием. Многие годы еще с XVII века устанавливались горизонтальные смещения горных пород в сотни метров, а затем, буквально до 70–80-х годов XX века, многие геологи и геофизики допускали горизонтальные движения в земной коре лишь на первые десятки километров.

Однако с появлением плейттектоники перемещение плит предполагается на многие тысячи километров (спрединг или расширение океанического дна в обе стороны от оси срединно-океанических хребтов). Динамические процессы происходят и в глубоких недрах планеты, ее мантии и ядре. Так, на их границе происходят теплообмен, движение вещества, конвекция. Причем энергетика последней является главным фактором, порождающим глубинные тектонические движения и структуры, в основном выраженные пластовыми тектоническими срывами [Пущаровский, 2001].

Помимо медленных бывают и *быстрые* тектонические движения, измеряемые секундами. Они могут происходить при землетрясениях [Злобин, 2005, 2006]. Так, при Нефтегорском землетрясении 27 (28) мая 1995 года на северном Сахалине, когда был стерт с лица земли пос. Нефтегорск и погибло 2066 человек, длительность разрыва при главном толчке с магнитудой 7,2 составила 13,5 с. Второй пример: сильнейшее Шикотанское землетрясение, происшедшее у Южных Курил 4 (5) октября 1994 года с магнитудой 8,1 и превосходившее по сейсмической энергии Нефтегорское землетрясение более чем в 56 раз, длилось 42 с. Столько же примерно длилось и известное Лиссабонское землетрясение 1755 года, вызвавшее цунами и гибель 60 тыс. человек.

2.1.2. Глобальная геодинамика

Рассмотрим основные концепции глобальной тектоники, касающиеся процессов в оболочках Земли – от земной коры и литосферы до мантии и ядра (тектоника плит, плюмтектоника, тектоника роста). Вопросы глобальной тектоники, касающиеся распада суперконтинентов, в настоящей работе рассмотрены не будут, поскольку эта отдельная большая тема. Отметим лишь, что: «Формирование суперконтинентов обязано коллизии отдельных континентов вследствие возникновения центробежного восходящего мантийного потока в области Панталассы, а их распад – возникновению кольца зон субдукции по их периферии и связанного с этим появления суперплюма в подошве литосферы. С распадом суперконтинента появляются условия для возникновения вторичных циклов Бертраана, а также для раскрытия окраинных морей и частных коллизий островных дуг и микроконтинентов» [Хаин, 2005, с. 310].

Состояние мантийной геодинамики в эпоху существования суперконтинента Пангеи и суперокеана Панталассы Д. А. Астафьев [2007] считает в определенной степени экстремальным в связи с явной неустойчивостью и стремлением таких систем к распаду. Он обосновывает наличие в коромантийной оболочке в процессе формирования Пангеи и Панталассы вместо литосферных плит с тремя конвективными ячейками Бернара

g типа формирование и функционирование за счет объединения либо двух конвективных ячеек g типа, либо одной общепланетарной ячейки одновременно и g, и t типа. При этом в одном из полушарий, где сформировалась Пангея, процесс дайвинга коромантийного вещества происходит по периметру вдоль активных окраин и в пределах суперконтинента под его осадочными бассейнами и орогенами, особенно растущими. В то же время в пределах акватории Панталассы формируется пояс апвеллинга с поперечными или диагональными ответвлениями рифтов от основного.

В другом полушарии, по мнению Д. А. Астафьева, формируется геосинклинальная зона с микроконтинентами, задуговыми, междуговыми и преддугowymi осадочными бассейнами, где будет развиваться дайвинг. В этом случае по мере внедрения головных частей поперечных рифтов возможно деление двух конвективных ячеек и формирование трех и более ячейковой конвекции. В Панталассе в данном случае с единой континентальной ячейкой g–t типов формируется поперечный суперконтиненту пояс апвеллинга с ответвляющимися диагонально или поперечно океаническими рифтами. Вероятно, именно эти изменения состояния ядра и коромантийной оболочки отражаются в циклах Уилсона и Бертраана. Эти представления Д. А. Астафьева вызывают интерес и служат импульсом для дальнейшего развития новых концепций глобальной тектоники, парадигмы тектоники роста, предложенной С. Маруямой и другими японскими учеными.

Говоря о дальнейшем развитии концепции тектоники плит, изложенной в предыдущем разделе, скажем, что оно привело к принятию ее на вооружение подавляющим числом геологов и геофизиков мира. Однако некоторые ее положения продолжают подвергаться сомнению рядом геологов и геофизиков до настоящего времени.

Строение плит и областей концентрации сейсмичности, на основе которых первоначально были выделены плиты, оказалось сложнее, чем предполагалось ранее [Злобин и др., 2007]. По данным сейсмотомографии, выяснилось, что корни материков сохраняются на большую глубину в мантии, чем предполагаемая толщина плит. Несмотря на многочисленные работы, сомнение вызывает субдукция – краевой камень плейттектоники. Аппроксимация океанических плит простыми, однородными субдуцирующими телами представляется лишь первоначальным обобщением: они, видимо, были устроены более сложно, их форма отлична от простых тел, а механизм, объясняющий строение переходных зон, может иметь альтернативные решения. Далее, плейттектоника постулирует наличие под литосферой глобального пластичного слоя – астеносферы, в то время как геофизические исследования, во-первых, не показывают его повсеместного наличия на Земле, а во-вторых, установлено существование в некоторых районах нескольких подобных слоев. При этом последние обнаружены не только в мантии, но и в земной коре. Кроме того, глубинные сейсмические исследования указывают на тектоническую расслоенность литосферы (пластовые срывы).

Существуют и другие не решенные концепцией вопросы и противоречия наблюдаемым фактам. Однако отметим лишь вопрос, близкий автору как геофизику: океанические плиты местами прослежены, по данным сейсмотомографии, до глубин 660–1200 км и более, что значительно превышает

их мощность – около 100 км [Bijwaard et.al, 1998; Хаин, 2005]. Говоря о своем отношении к концепции тектоники плит, например, Н. И. Николаев сказал: «...очень настороженное: она не может считаться теорией, как это утверждают многие ее сторонники» [Николаев, 1997, с. 32].

Совершенно справедливо заметил В. Е. Хаин, что тектоника плит характеризует развитие лишь самой верхней хрупкой оболочки твердой Земли – литосферы [Хаин, 2003]. Кроме того, он пишет, что «реальность спрединга, субдукции и перемещения по трансформным разломам не подлежат сомнению, а действительно уязвимые положения тектоники плит касаются их диффузных границ и не абсолютной их жесткости и монолитности» [Хаин, Короновский, 2005, с. 310].

Для описания процессов, происходящих в более глубоких оболочках планеты, необходимо привлечение иных механизмов [Maruyama et al., 1994 и др.]. В глобальной геотектонике и геодинамике появилась необходимость разработки всеобъемлющей концепции. В нашей стране основой для этого послужили идеи В. Е. Хаина, Ю. М. Пущаровского, Н. Л. Добрецова, А. Г. Кирдяшкина, Л. П. Зоненшайна, М. И. Кузьмина, В. Е. Фадеева, В. П. Трубицына с соавторами и других. Ее разработка основывалась на данных сейсмотомографии, по изучению ложа Мирового океана, экспериментов со сверхвысокими давлениями и т. д. Они позволили японским ученым [Maruyama, 1994 и др.] создать новую парадигму развития Земли. Ниже рассмотрены основные гипотезы, теории и концепции, в том числе и глобальные, предложена их классификация.

Современные гипотезы, концепции, парадигмы динамики Земли (состояние и анализ основных)

В геотектонике известно много гипотез, теорий, концепций процессов, сфер их появления. Гипотезы прошлого, начиная с древних времен и до XIX–XX веков, рассмотрены ранее [Злобин, 2008]. В данной работе представлены современные концепции, в основном плейттекtonика, которой посвящено наибольшее число публикаций. Признавая в определенной степени эту концепцию, надо тем не менее сказать, что как догму ее принимать нельзя. Наиболее объективным будет, если мы прежде всего определим рамки (области) ее действия. При этом она уже дополняется другими, например плюмтекtonикой (текtonикой плюмов или горячих точек).

Анализ вопросов, предъявляемых к тектонике плит, показывает, что они связаны в основном с соотношением небольшой толщины литосферных плит и их значительной протяженностью (размерами), а также дальностью перемещения. Рассмотрев ее теоретические основы, Н. Л. Добрецов [2001], как и многие другие, приходит к выводу, что большинство из них можно считать доказанными. Это положение о спрединге; наличие полосовых магнитных аномалий, определенный по которым возраст пород совпал на 95 % с данными глубоководного бурения; существование трансформных разломов, перемещение по которым движущихся плит подтверждено сейсмическими и геологическими данными; кинематика вращения плит, все более подтвержденная для океанических плит, а наличие сейсмичности внутри континентов и в широкой полосе во многих активных зонах объясняют выделением более мелких плит, усложняя кинематику их

движения. Даже механизм, объясняющий миграцию вулканизма горячими точками типа Гавайской, увязывается с тектоникой плит [Wilson, 1973; Molnar, Atwater, 1973; Irvine, 1988, 1991]. Поэтому можно заключить, что, несмотря на эмпиричность и «механистичность» многих положений тектоники плит, в ее рамках удастся объяснить большинство (но, заметим, не все) из наблюдаемых геологических и геофизических фактов [Зоненшайн и др., 1976, 1990; Зоненшайн, Кузьмин, 1983].

Краеугольным камнем плейттекtonики наряду со спредингом является субдукция. Она же вызывает наибольшие сомнения. Наши детальные исследования внутреннего строения Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны (СФЗ) показали, что у нее более сложное строение, чем в моделях тектоники плит: имеет определенную зональность и встречную фокальную зону [Злобин, 2007]. Н. Л. Добрецов также отмечает, что «...механизм и процессы в зонах субдукции остаются самыми сложными и дискуссионными» [Добрецов и др., 2001, с. 34].

Ю. М. Пущаровский [1994] в рамках развиваемой им нелинейной геодинамики указывает на большое значение спрединга в эволюции тектоносферы, но подвергает критике ведущую роль субдукции.

В. Е. Хаин [1994] определяет следующие основные типы латерального перемещения океанических литосферных плит: расхождение (дивергенция), схождение (конвергенция) и сдвиговые перемещения по трансформным разломам. Однако в зонах субдукции он допускает и другие виды схождения плит (обдукция, коллизия, выжимание масс по латерали).

Возможно, имеют место и другие типы взаимодействия плит или блоков земной коры и верхней мантии, например, как это предполагалось нами, путем их послойно-ступенчатого смещения [Злобин, 1986]. При этом допускается образование наклона Курило-Камчатской СФЗ не только путем субдукции, но также в результате наклона границы между двумя гигантскими морфоструктурами (Евразией и Тихим океаном), образовавшегося на месте субвертикальной, сверхглубинной разломной зоны, смещавшейся ступенчато. Ее последующий наклон объясняется суммарным следствием вертикальных и горизонтальных смещений слоев и блоков в земной коре и верхней мантии Земли.

Очень интересно замечание В. Е. Хаина на XL Тектоническом совещании в январе 2007 года. Касаясь явного противоречия между стационарной регматической сетью разломов на континентах, сложившейся за длительное (около трех млрд. лет) время, и непрерывным перемещением океанических плит, он заключил: «Думается, не следует преувеличивать масштабы относительного перемещения литосферных плит и при интерпретации геологических и палеомагнитных данных предпочтительно принимать минимальные значения в оценке величины их смещения. ...Иначе говоря, следует отдать предпочтение «глобальному фиксизму», по выражению М. А. Гончарова [2005], перед «глобальным мобилизмом», допускающим хаотическое, незакономерное «блуждание» литосферных плит по поверхности Земли» [Хаин, 2007, с. 327].

Другие многочисленные спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы изложены, например, в сборнике трудов ИФЗ РАН [Спорные ..., 2002].

Конвекция в мантии и на ее границе

Большая роль среди разнообразных процессов в Земле и в формировании геотектонических гипотез принадлежит конвекции. В физике под словом «**конвекция**» (от лат. *convectiv* – принесение, доставка) понимается *перемещение частей среды (газа, жидкости), приводящее к массо- и теплообмену, вследствие разницы температуры, плотности в отдельных местах среды*. При этом различают естественную (свободную) конвекцию, вызванную неоднородностью среды с градиентами температуры и плотности, и вынужденную конвекцию, вызванную внешним механическим воздействием.

Свободная конвекция давно известна в тропосфере Земли, например, при формировании мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков. В недрах Земли при высоких температурах и давлениях, когда даже твердое вещество ведет себя как высоковязкая жидкость, способная течь, также проявляются процессы конвекции с переносом масс и тепла. В плиттекtonике считалось, что именно благодаря конвекции литосферные плиты движутся по горизонтальным ветвям конвективных течений, перемещаясь от осей спрединга к зонам субдукции, а затем по нисходящим ветвям погружаясь в мантию.

Рассматривая механизм конвекции в недрах планеты, необходимо сказать о структуре конвективных ячеек на глубине. Согласно данным сейсмотомографии, распределение восходящих и нисходящих ветвей конвективных ячеек в верхней мантии в общем соответствует схеме литосферных плит Земли. Однако надо иметь в виду, что с глубиной этот план более соответствует распределению границ плит в прошлом, возможно, восходящем к началу распада Пангеи.

Конвекция является движущей силой геодинамических процессов в мантии, с ней связаны движения плит. «Конвекция в мантии нашла свое подтверждение в данных сейсмической томографии, указавших на существование крупных плотностных неоднородностей, т. е. областей разогрева и охлаждения на всех уровнях в мантии. О конвекции свидетельствует и интенсивное тепловыделение вдоль осей спрединга срединно-океанических хребтов и меньше – вдоль рифтовых зон континентов. Общая величина теплового потока, поступающего на поверхность Земли из глубоких недр, оказалась настолько значительной, что при отсутствии конвективного теплопереноса и осуществления последнего лишь в кондуктивной форме наша планета должна была бы достаточно быстро расплавиться» [Хаин, 2003, с. 279].

Экспериментальные и теоретические исследования позволяют предполагать одно- и двухъярусную модели конвекции. Первая (общемантийная) в нашей стране активно разрабатывается В. П. Трубицыным с соавторами [2000], вторая – Л. И. Лобковским и другими [2000] (рис. 2.1).

Для рассмотрения возможной картины течений и распределения температур было проведено численное моделирование стационарной двухъярусной термической конвекции (рис. 2.2). На рис. 2.2, а, б показан случай (сектор 90°), когда в верхней мантии наблюдаются вытянутые по горизонтали конвективные ячейки, длина которых соответствует ячейкам в нижней мантии, направление вращения верхних и нижних – противополо-

ложно (при этом вещество по разные стороны границы раздела движется в одном направлении). В другом случае (рис. 2.2, в, г) в секторе мантии 150° размеры конвективных ячеек в верхней мантии не совпадают с размерами нижнемантийных ячеек.

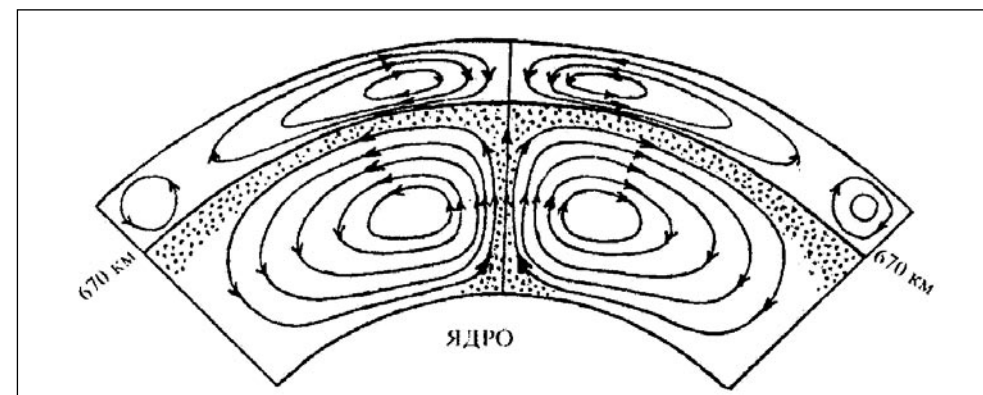


Рис. 2.1. Схема образования химически стратифицированного слоя между верхней и нижней мантией в рамках двухъярусной термической модели конвекции [Лобковский, Котелкин, 2000].

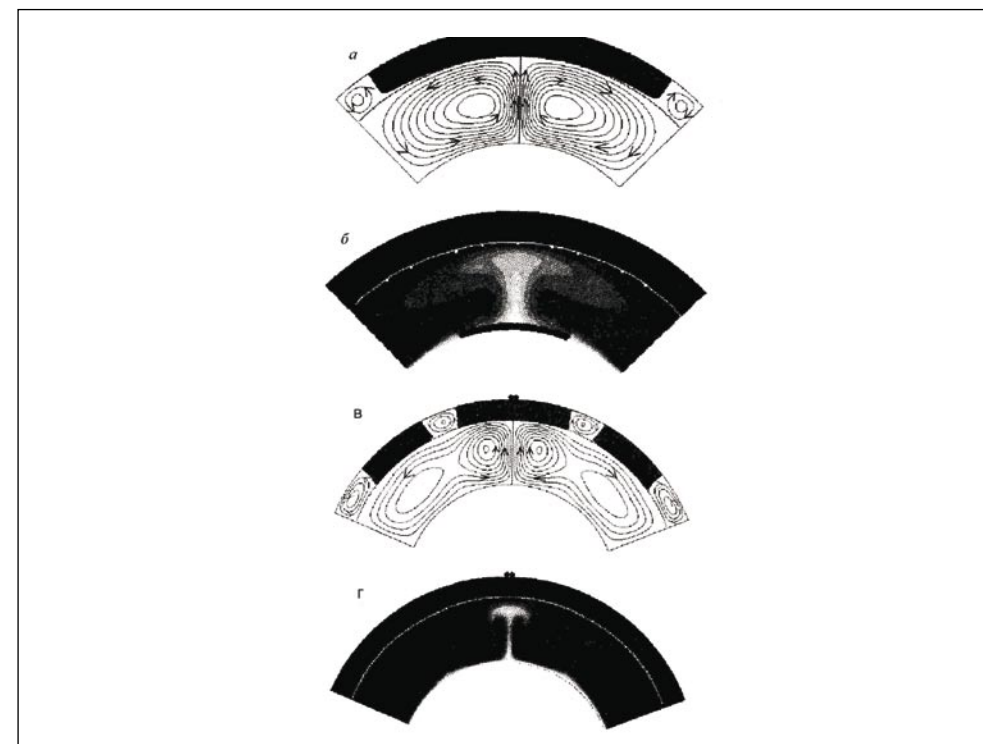


Рис. 2.2. Установившийся режим двухъярусной термической конвекции в мантии для сектора 90° (а, б) и для сектора 150° (в, г), где а, в – картина течений; б, г – картина распределения температур [Лобковский, Котелкин, 2000].

Особенности возникновения океанической литосферы и астеносферы при свободной тепловой конвекции в мантии с вязкостью, зависящей от температуры и давления, смоделированы В. П. Трубицыным и В. В. Рыковым [2000]. Структура возникающей тепловой конвекции показана на рис. 2.3, а, где показано образование ячейки с горячими восходящими и холодными нисходящими мантийными потоками. Их предполагаемая температура показана черным (низкая) или белым (высокая) цветом. Скорость течений указана стрелками. В верхней части рис. 2.3а приведены рассчитанные распределения теплотока (число Нуссельта Nu) и относительные высоты рельефа h , создаваемые конвективными течениями.

На рис. 2.3, б приведено рассчитанное распределение вязкости, связанное с развитием тепловой конвекции. С ростом температуры вязкость падает, но возрастает с ростом давления. Поэтому близ поверхности возникают области пониженной вязкости подобно астеносфере – пластический слой.

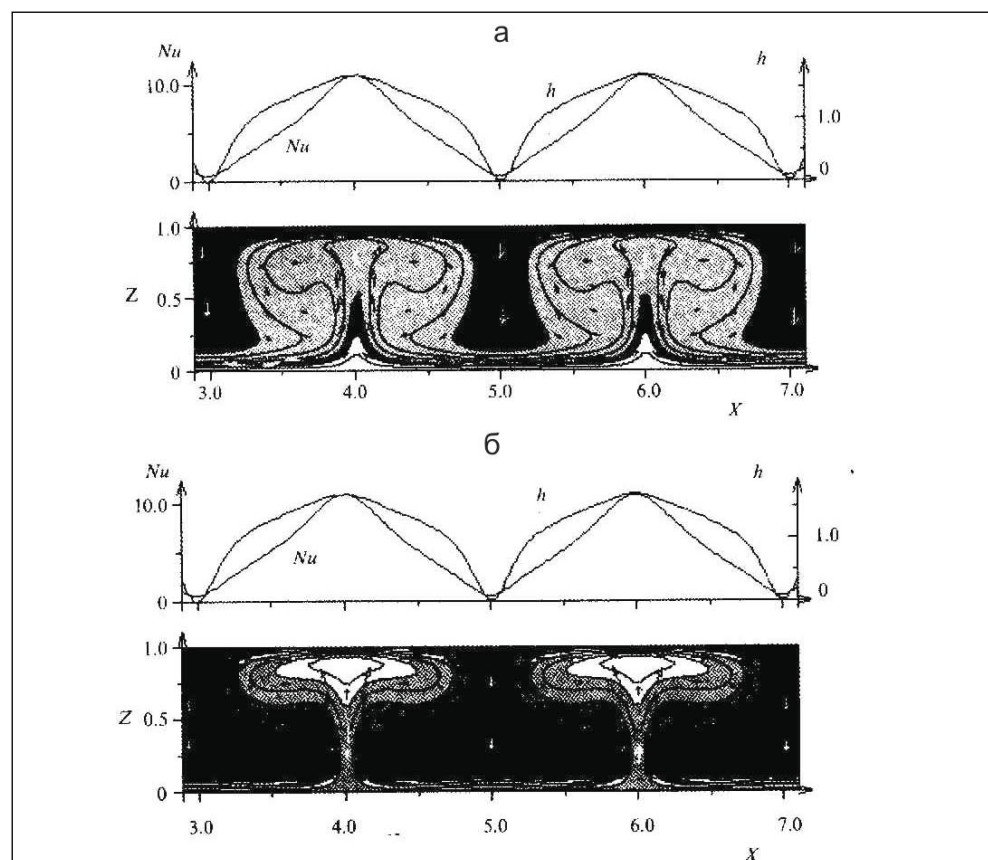


Рис. 2.3. Пространственное распределение температуры и скоростей течений при стационарной тепловой конвекции в прямоугольной области с подогревом снизу (а) и распределение вязкости и скорости течений (стрелки) при стационарной тепловой конвекции (б) [Трубицын, Рыков, 2000].

Заметим, что при моделировании конвекции при больших числах Рэлея возникают картины, которые свойственны режиму плюмовой конвекции и горячим точкам, о которых мы будем говорить ниже. Один из результатов расчета структуры тепловой конвекции в прямоугольной области с параметрами жидкости, соответствующими условиям в мантии, но при постоянной вязкости в момент, условно принятый за $t=0$, приведен на рис. 2.4.

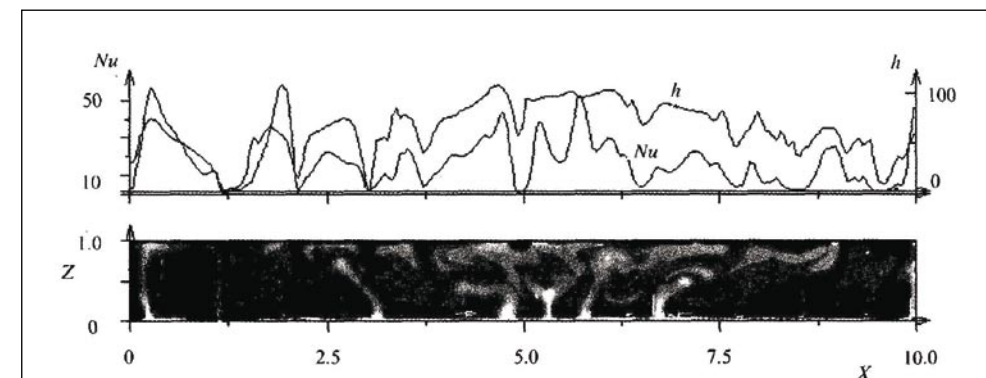


Рис. 2.4. Рассчитанная структура тепловой конвекции в момент времени, условно принятый за $t=0$. Распределение безмерной температуры изображено тонами от белого (высокая) до черного (низкая). В верхней части рисунка приведены рассчитанные распределения теплового потока и рельефа поверхности. В белом видны формирующие горячие струи вблизи дна мантии [Трубицын, Рыков, 2000].

Обе концепции имеют примерно равное число сторонников [Хаин, 2003]. Реальность двухъярусной конвекции была подтверждена физическим моделированием в эксперименте Н. Л. Добрецова и А. Г. Кирдяшкина [2001]. При этом необходимо отметить, что математическое моделирование П. Машетеля и П. Вебера показало, что «общемантийная конвекция при определенных условиях может переходить в двухъярусную и наоборот и что период этого обращения может составлять порядка 500 млн. лет» [Хаин, 2003, с. 285]. Таким образом, ни одна ни другая в принципе не исключают друг друга.

Выбор в пользу второй модели связан с границей между верхней и нижней мантией на глубине 650–670 км. Здесь резко изменяются физические свойства субстрата, прекращается сейсмичность, связанная с субдукцией океанических плит.

Данные сейсмотомографии позволяют судить о глубинном строении мантии вдоль ряда СФЗ на западе Тихого океана и Зондской дуги на востоке Индийского океана [Fisher et al., 1990]. Вывод пока неоднозначен. В некоторых случаях субдуцирующие холодные пластины (слэбы), характеризующиеся повышенными аномалиями скорости сейсмических волн, при подходе к этой глубине выполаживаются, расплываются и не проникают глубже 670 км, кроме Зондской дуги, где они прослежены до глубины 1200 км.

На Южных Курилах и в Идзу-Бонинской дуге «пластина, достигая границы мантийных слоев С и Д, загибается параллельно этой границе в сторону своего наклона, прослеживаясь на расстоянии до 1000 км, и далее соединяется с высокоскоростной «каплей» [Van der Hilst et al., 1991] на глубине 800 км и более (Японская зона), а в-третьих – она начинает в районе этой границы испытывать сложный изгиб как бы натываясь на сопротивление нижней мантии (зона Тонга)» [Хаин, 2003 с. 285]. Таким образом, субдуцирующие пластины могут проникать, а могут и не проникать в нижнюю мантию, останавливаясь и расплываясь на границах С и Д [Fuca et al., 1992].

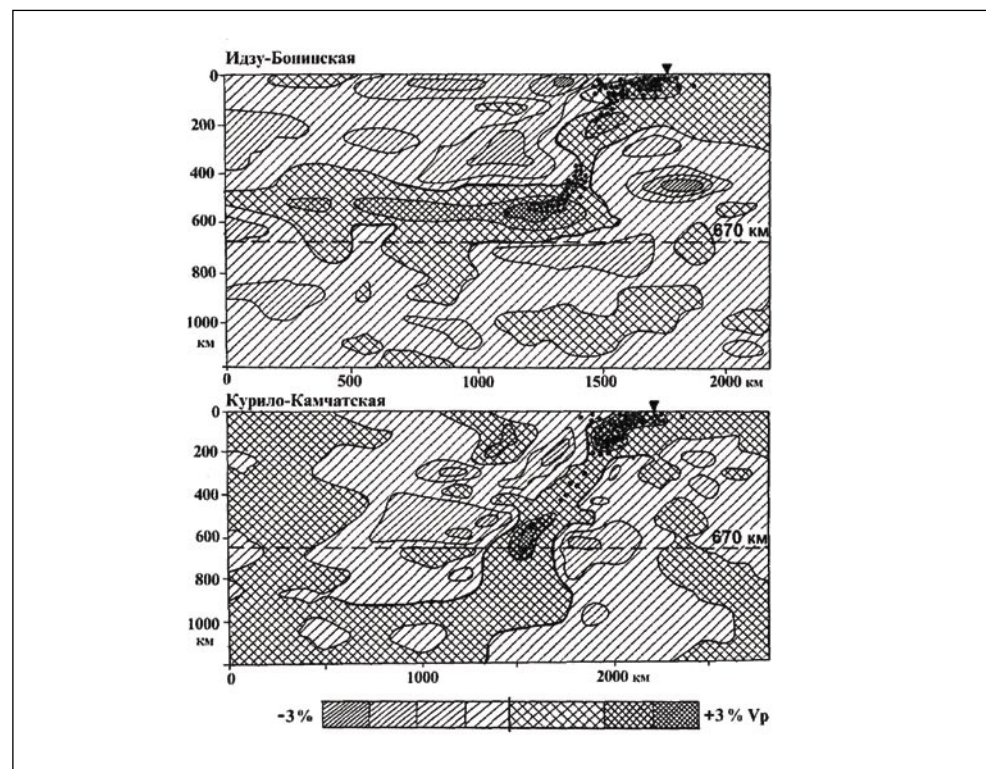


Рис. 2.5. Прослеживание на глубину субдуцирующей океанической литосферы посредством сейсмической томографии.

На профиле через центральную часть Идзу-Бонинской дуги Тихоокеанская плита ложится на поверхность нижней мантии. На профиле через Курило-Камчатскую дугу та же плита пересекает кровлю нижней мантии и погружается в нее (по Р. Ван-ден-Хилсту и др., 1991; из работы Хаина, Ломизе, 1991).

Аналогичные данные были получены в Курило-Охотском регионе по данным сейсмотомографии продольными волнами авторами работы (Bijwaard et al., 1998).

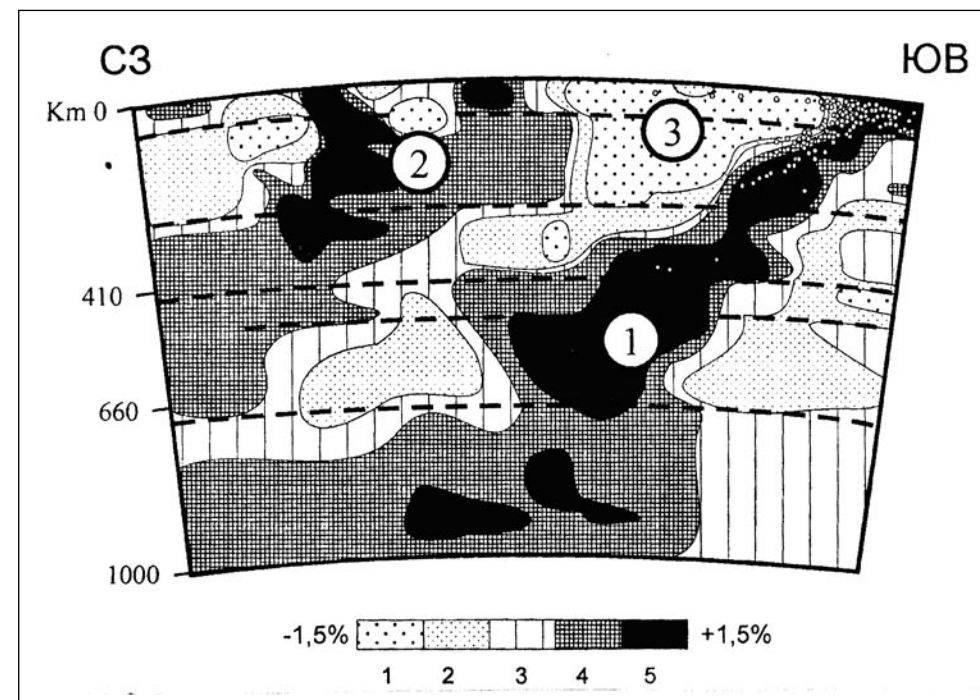


Рис. 2.6. Строение современной (1) и меловой (2) зон Западно-Тихоокеанского даунвеллинга в Курило-Охотском регионе [Bijwaard et al., 1998; с изменениями].

Отметим, что работы по сейсмотомографии выполнены в последние годы в районе Курило-Камчатской дуги И. А. Саниной, И. В. Низкоус и Л. И. Гонтовой [2005]. Ими были построены глубинные разрезы Камчатки, пересекающие Авачинскую и Ключевскую группы вулканов; томографические модели Камчатки и глубинные геофизические разрезы на основе профилей вдоль и вкост Камчатского полуострова, пересекающие ряд вулканов, в том числе Авачинскую и Ключевскую группы вулканов. Эти работы позволили более детально изучить скоростное строение до глубин 300 км и, опираясь на известные данные о структуре СФЗ, выявить особенности развития зоны перехода континент – океан.

Таким образом, методы сейсмотомографии позволяют установить геодинамические особенности зон субдукции, связанные с конвекцией.

Возвращаясь к вопросам конвекции, отметим, что общемантийная конвекция является более традиционной, и, согласно ей, движения вещества охватывают едиными конвективными ячейками всю мантию – от ее границы с ядром до подошвы литосферы.

Большое внимание конвекции уделяли Н. Л. Добренцов, А. Г. Кирдяшкин, А. А. Кирдяшкин [2001] и многие другие. На использовании свойств тепловой конвекции в мантии основываются практически все современные концепции и парадигмы глобальной тектоники (тектоники плит, плюмтектоники, горячих точек, горячих полей и др.).

По В. П. Трубицыну и В. В. Рыкову [Трубицын, Рыков, 2000, с. 7], ее суть в следующем:

«а) Поднимающееся при конвекции в срединно-океанических хребтах мантийное вещество при температуре порядка 1300° С затвердевает. Поэтому образуется литосфера, которая затем разбивается на океанические плиты.

б) В результате сильного перегрева недр конвекция имеет квазитурбулентный характер, при котором на фоне общей циркуляции возникают отдельные плюмы, проявляющиеся на поверхности в виде горячих точек.

в) Фазовый переход на границе верхней и нижней мантии ведет к возникновению полупроницаемого барьера для конвективных течений и частичной расслоенности конвективных течений, о чем свидетельствуют данные сейсмической томографии и факт существования геохимических резервуаров.

г) Плавающие в мантии континенты тормозят выход тепла из мантии и изменяют эволюцию конвективных течений. Сначала континенты затягивают на места нисходящих потоков. Но затем под континентами возникают горячие восходящие мантийные потоки, которые, в свою очередь, опять отталкивают континенты к ближайшим нисходящим холодным мантийным потокам. В результате самоорганизации в нелинейной взаимодействующей системе мантийной конвекции и плавающих континентов формируются наблюдаемые глобальные структуры Земли».

Таким образом, согласно В. П. Трубицыну и В. В. Рыкову [2000], с конвекцией связаны основные свойства глобальной тектоники: наличие океанической литосферы, где реализуется тектоника плит, поднимающиеся плюмы, а также континенты, плавающие в мантии, изолированной верхней и нижней (говоря о тектонике плит, вышеназванные авторы осторожно связывают ее не со всей литосферой планеты, а с литосферой океана).

В. Е. Хаин [2003] особое внимание уделяет фрактальности структуры литосферы и отмечает, что она диктуется структурами верхнемантийной конвекции. Большое значение имеет и расположение литосферных плит. В континентах с утолщенной корой литосфера, как известно, может иметь мощность 200–400 км и более. Поэтому благодаря глубоким корням континентальные плиты движутся гораздо медленнее океанических. Отметим, что положение Африканской и Антарктической континентальных плит почти фиксированное.

Л. И. Лобковский предлагает вариант двухъярусной конвекции, который учитывает термический и химический факторы плавучести, а также дифференциацию мантийного вещества на границе ядро–мантия и эклогитизацию океанической коры в зонах субдукции. Его модель «описывает изменение конвективных режимов в мантии (смену одноярусного и двухъярусного режимов) и связанных с ними циклов Вильсона; развитие двухуровневой системы плюмов: глобальных плюмов, зарождающихся на границе ядро–мантия, и региональных плюмов, берущих свое начало с границы между нижней и верхней мантией» [Лобковский, Котелкин, 2000, с. 29].

Положения этой модели иллюстрирует рис. 2.1. Она позволяет охватить наиболее существенные закономерности глобальной геодинамики. Концепция включает подъем суперплюма с границы ядро–мантия, распад

его на верхнемантийные региональные плюмы, субдукцию литосферных плит вместе с тяжелыми эклогитовыми массами, которые могут образовывать линзы тяжелого вещества и растекание его в нижней мантии, что согласуется с концепцией тектоники роста, описанной ниже.

Горячие точки и поля

С конвекцией и порожденными ею мантийными струями связывают так называемые горячие точки. Впервые гипотезу горячих точек и/или мантийных плюмов высказал в 1971–1972 годах Дж. Морган [Morgan, 1971, 1972] при объяснении внутриплитного магматизма. При рассмотрении размещения горячих точек на Земле отмечается их приуроченность или тяготение многих из них к спрединговым хребтам, особенно к местам их тройного сочленения [Хаин, Короновский, 2007]. Установлено, что горячие точки стационарны и «прожигают» движущиеся выше литосферные плиты. Мантийные расплавы выходят на поверхность и образуют вулканические постройки. Наиболее ярким примером горячей точки считают цепь разновозрастных вулканов на Гавайях, последние извержения на которых были в 2002, 2004 и 2006 годах. Горячие точки объясняют внутриплитный магматизм. Выделяют от 37 до 117 горячих точек [Хаин, 2003]. В основном они находятся в Атлантике и Индийском океане близ осей срединно-океанических хребтов, включая районы тройных сочленений, и вдоль трансформных разломов. В юго-западной части Тихого океана с горячими точками связаны, вероятно, вулканические цепи вдоль крупных разломов, не относящихся к разряду трансформных. Есть горячие точки и на континентах. Здесь они связаны с молодыми и древними рифтовыми системами, их тройными сочленениями и местами пересечениями, крупными разломами (сутурами или структурными швами).

Полагают, что горячие точки – это как бы отдельные проявления, связанные с локальными мантийными струями-плюмами. Однако помимо них выделяют горячие поля [Зоненшайн, Кузьмин, 1983]. Их аналогом на континентах являются крупные трапповые поля (провинции).

Плюмтектоника

После многих лет применения концепции плейттектоники стали вырисовываться новые идеи, например, плюмтектоника [Morgan, 1971]. Плюм (дословно с англ., исп. – *plume*) означает «перо, струйка, завиток». Под плюмом понимались «перья» глубинных потоков горячего вещества. Отметим, что плюм более похож на гриб (рис. 2.2, 2.3). Полагают, что в формировании плюмов может участвовать и адвекция, то есть латеральное движение масс мантийного материала. Важно отметить, что, видимо, два этих процесса не могут протекать независимо друг от друга, хотя, по В. Е. Хаину и В. Н. Короновскому [2007], образование плюмов связано с конвекцией в восходящих ветвях конвективных ячеек под спрединговыми хребтами или континентальными рифтами. Суперплюмы (см. ниже), видимо, вызваны выплеском вещества из переходного слоя между внешним ядром и нижней мантией (слоем D'').

В последние годы плюмтектонике были посвящены многие конференции и симпозиумы. Один из них был проведен в России [Мантийные плю-

мы и металлогения, 2002]. Поскольку тектоника плит объясняла не все вопросы глубинной тектоники, то полагали, что на смену ей пришла плюм-тектоника. Как писал А. Ф. Грачев, «совершенно очевидно, что концепция мантийных плюмов, зародившаяся одновременно с гипотезой тектоники плит, на наших глазах перерастает в новую парадигму, в которой тектоника плит будет являться только одним из составляющих элементов» [Грачев, 2000, с. 95]. По его мнению, явления внутриплитной тектонической и особенно магматической активности без концепции мантийных плюмов не могут быть объяснены. Именно они, видимо, позволяют объяснить поэтапный (последовательный) раскол Пангеи, циклы Вильсона и Моргана.

В земной коре плюмы фиксируются в виде струй газов, гидротерм, вулканических извержений. Подъем суперплюма способствует частичному плавлению пород коры, снижению вязкости и зарождению на головной части плюма серии более мелких ячеек, образуя древовидную структуру системы плюмов (магматические диапиры). Этот процесс приводит к зарождению астеносферы под океанами, активными окраинами и складчатыми поясами. «Над скученной нижней мантией под активными окраинами возникают цепочки линз астеносферы мощностью до 300 км, с поперечником ячеек до $2 \cdot 10^3$ км (II порядок) при вязкости $\sim 10^{20}$ П» [Барышев, 2002, с. 25].

В области активных окраин зоны перехода от Евразии к Тихому океану Т. К. Злобиным [2004] предложена модель строения верхней мантии под южной частью Охотской литосферной плиты, показывающая положение астеносферы, диапира и верхов мантийного плюма (рис. 2.7). В этой модели положение астеносферы основано на данных различных геофизических методов. Согласно построенной модели, выделение астеносферы объясняется наличием низкоскоростных зон в верхней мантии с повышенной температурой и высокой электропроводностью. Кроме того, в грибообразной области под Курильской (Южно-Охотской) глубоководной котловиной предполагается существование мантийного диапира.

На этой модели положение астеносферы основано на данных различных геофизических методов. Согласно построенной модели, выделение астеносферы объясняется наличием низкоскоростных пород мантии с повышенной температурой и высокой электропроводностью. Кроме того, в грибообразной области верхней мантии под Курильской глубоководной котловиной предполагается существование мантийного диапира.

Рассмотрение экспериментальных данных о распределении скоростей сейсмических волн на востоке Евразии показало, что на границе внешнего ядра и нижней мантии оконтуривается столбообразная низкоскоростная область, поднимающаяся до верхних горизонтов Земли, которая в верхней части имеет грибообразную форму. Аналогичное строение предполагается нами и под южной частью Охотского моря (под Курильской глубоководной котловиной). Известные и выделенные нами особенности строения верхней мантии (повышенный тепловой поток, пониженные скорости, повышение электропроводности) связываются с вершинной частью мантийного плюма, приведшего к образованию здесь мантийного диапира [Злобин, 2004].

Рассматривая плюмы, необходимо отметить еще виды (формы) конвек-

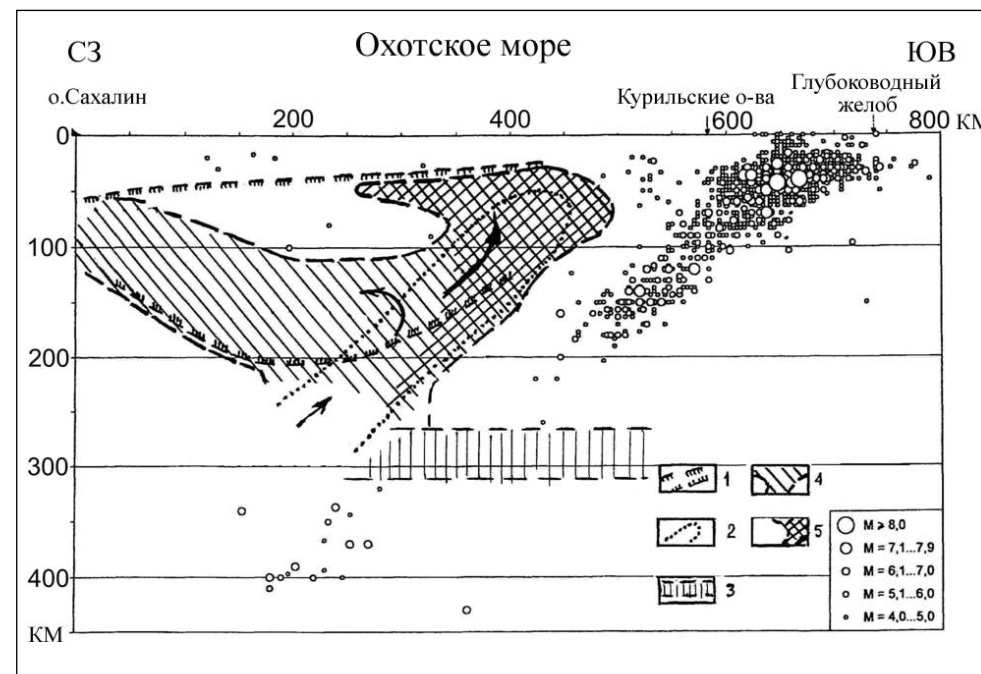


Рис. 2.7. Модель строения верхней мантии под южной частью Охотской литосферной плиты [Злобин, 2004].

- 1 – положение астеносферы, согласно геотермическим данным (1) о глубинах залегания ее кровли из работы [Тузев и др., 1984] и данным о ее мощности из работы [Структура ..., 1996];
- 2 – положение низкоскоростной области в мантии по данным [Болдырев, Кац, 1982]; 3 – асейсмичная область связываемых с зоной глубоководных срывов; 4 – положение астеносферы, согласно предлагаемой нами модели, и ее продолжение в верхней мантии;
- 5 – астеносферный диапир («головка» верхнемантийного плюма). Стрелками показано возможное направление движения разогретых флюидов термального диапира или мантийного плюма. Кружками внизу на врезке показаны гипоцентры землетрясений и их магнитуда.

тивных движений – апвеллинг, даунвеллинг, являющиеся дипфидерными (заглубленными) системами (от англ. – *deepfieder*) [Красный, 2002].

Плюмы имеют большое значение для металлогении и распределения рудных полезных ископаемых.

Рассматривая плюмы, нельзя не сказать о ряде нерешенных вопросов, касающихся их. Так, если они связаны с поступлением глубинного вещества, то необходимы соответствующие каналы, которые, по А. Дзевонски, пока не обнаружены. Не определены до сих пор и корни плюмов, поскольку сейсмотомография позволяет выделять только области аномалий сейсмической скорости. Полностью или частично несостоятельны представления о приуроченности плюмов к границе ядро–мантия, положенные в основу плюмтектоники. Наличие плюмов по данным сейс-

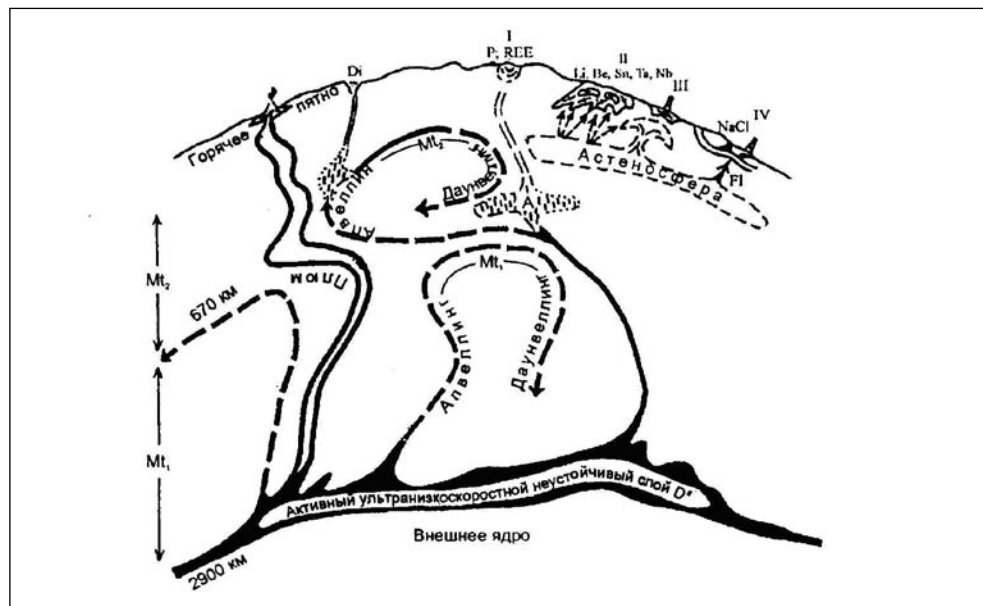


Рис. 2.8. Принципиальная схема глубинного и приповерхностного размещения фидерных структур [Красный, 2002].

мотомаграфии подтвердилось «лишь в отношении меньше чем десятка плюмов и остается пока не доказанным даже для таких классических плюмов, как Исландия, Гавайи и Йеллоустон. Несомненно, наблюдается определенное тяготение многих плюмов к восходящим ветвям конвективных течений. В то же время достаточно очевидно, что размещение горячих точек – проекции плюмов на земной поверхности – явно контролируется разломной структурой коры и литосферы, в первую очередь рифтов и сдвигов» [Хаин, 2007, с. 328].

Один из существенных вопросов, позволяющих усомниться в гипотезе Дж. Моргана о мантийных плюмах (и даже отвергнуть эту гипотезу), связан со стационарностью плюмов и горячих точек. Так, А. Смит и Дж. Левис [Smith, Lewis, 1999] предложили альтернативное объяснение закономерному линейному увеличению возраста вулканических построек океанических архипелагов, связываемых с горячими точками. Они объясняли их приуроченность к разломам. А в целом, заключает далее В. Е. Хаин, картина пространственно-временного взаимодействия плюмов и конвекции еще далека от полной ясности и требует своего дальнейшего углубленного изучения.

Парадигма тектоники роста

Из вышесказанного следует, что пришедшая на смену тектонике плит и дополнившая ее последующая концепция плюмтектоники, в свою очередь, имеет ряд нерешенных вопросов. Так, не ясно, как часто возникают мантийные плюмы в истории Земли, как они связаны с инверсиями магнитного поля в мезокайнозой. По А. Ф. Грачеву [2000], остается пробле-

матичным, что именно определяет число плюмов на поверхности Земли, зародившихся в слое D*, и все ли они достигают ее поверхности?

Справедливо ли рассматривать только модели осесимметричного плюма, а также допущение в них предположения о наличии ньютоновской вязкости мантийного субстрата? Последнее важно, так как реология вещества мантийных плюмов, скорее всего, нелинейная и вязкость в них сильно зависит от напряжений, а не только от температуры [Грачев, 2000]. Большая роль (не выясненная до конца) в протекании тектонических процессов в литосфере и глубинных сферах принадлежит движениям внутреннего твердого ядра Земли. Как показал Б. В. Левин [2001], процессы в ядре влияют на активизацию тектонических движений и распределение горячих точек Земли, низкоскоростных аномалий в нижней мантии, а также сейсмичности по широтам, в частности, в приэкваториальной зоне $\pm 35^\circ$. Помимо разработки концепции тектоники плит и плюмтектоники, возникли идеи, которые привели к созданию новой парадигмы. Она была выдвинута японскими учеными С. Маруяма, М. Кумазава, С. Кавасаки, С. Иосида, Х. Иосиока, Т. Ито, Н. Фуджин [Miyama, 1994] и названа как «тектоника роста» (growth tectonics).

Эта парадигма была основана на данных сейсмотомографии, физических экспериментах при сверхвысоких давлениях, компьютерном моделировании геодинамических процессов, на региональной и исторической геологии и сравнительной планетологии. Развитие эндогенных процессов локализовано, по В. Е. Хаину, в тектоносфере, мезосфере и ядре. В первой доминирует тектоника плит, во второй – широкомасштабная плюмтектоника, в третьей – тектоника роста. Предполагаемая картина конвекции Земли отражена на рис. 2.9, вероятное положение суперплюмов, которые контролируются Тихоокеанским и Африканским максимумами мантийного апвеллинга, показано на рис. 2.10, а общая схема глобальной тектоники Земли – на рис. 2.11.

Таким образом, тектоника плит рассматривает развитие и процессы лишь в самой верхней хрупкой оболочке твердой Земли – литосфере, являющейся частью первой из трех вышеназванных оболочек – тектоносферы, в которую входят также земная кора, астеносфера и верхняя мантия. Следующая оболочка – мезосфера. Она включает нижнюю мантию и ядро Земли. Процессы здесь рассматривает плюмтектоника. В ядре же, по предложению японских ученых, имеет место так называемая тектоника роста. Таким образом, новая парадигма включает в себя и объединяет тектонику плит, плюмтектонику и тектонику роста. Рассматривая всю Землю, она может считаться глобальной тектоникой Земли, а тектоника плит является частным случаем этой новой концепции.

Как происходят процессы в оболочках Земли и какое между ними взаимодействие? Понятно, что процессы в них взаимосвязаны и влияют друг на друга. Явления, происходящие в верхних оболочках, находят отражение в нижних – от коры к ядру и наоборот. Так, рассматривая процессы от поверхности Земли к ее центру, можно сказать, что, согласно тектонике плит, погружающаяся (субдуцирующая) плита влияет на верхнюю и нижнюю мантию, вплоть до границы мантии и ядра. Это влияет на конвекцию во внешнем, жидком ядре, вызывает в нем возбуждения,

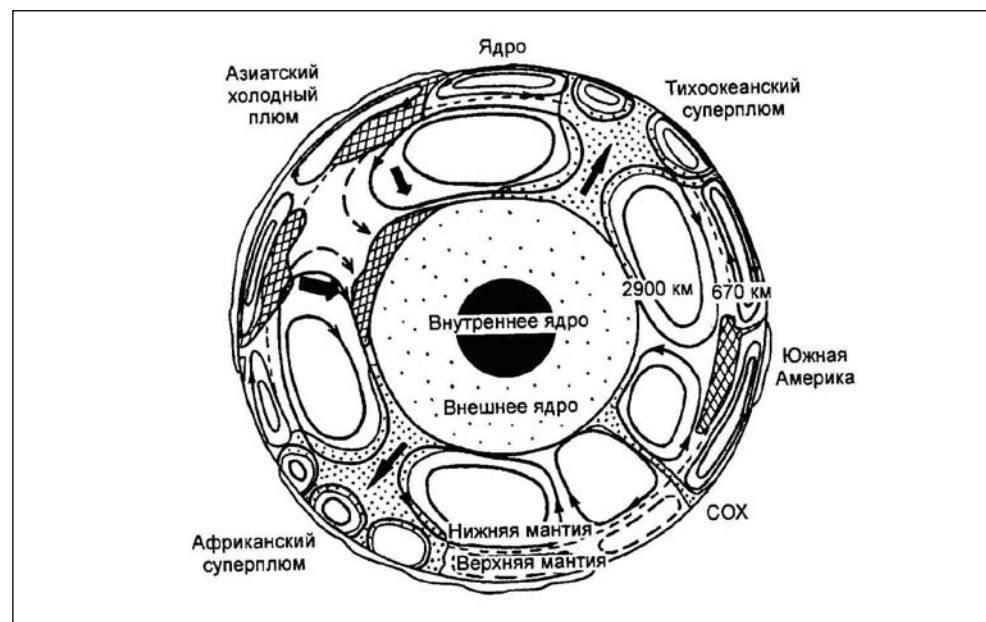


Рис. 2.9. Модель современной Земли и схема конвективных течений в мантии [Miyamoto, 1994].

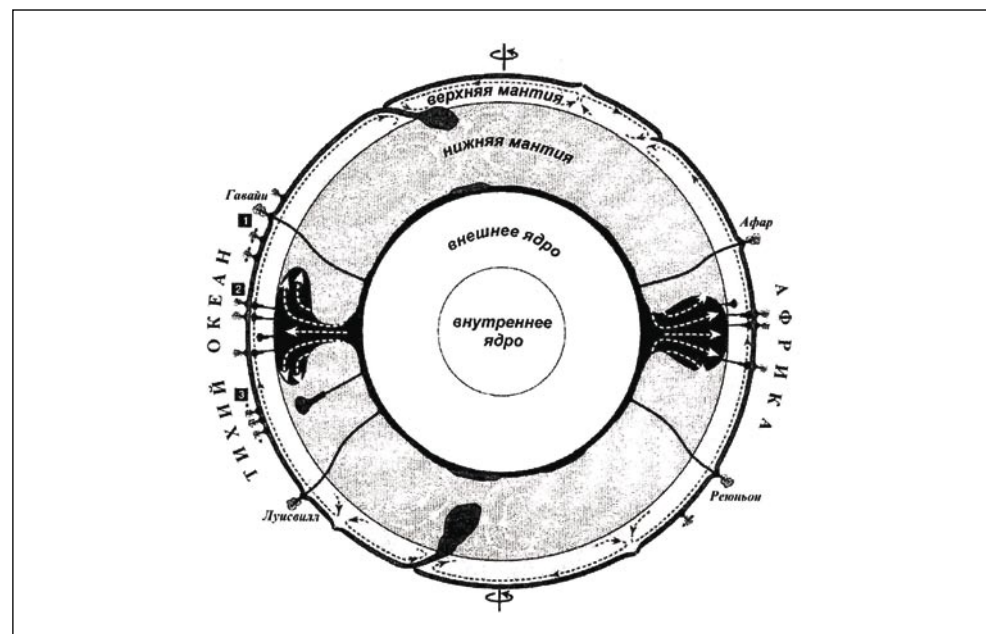


Рис. 2.10. Вероятное положение суперплюмов и горячих точек, которые контролируются Тихоокеанским и Африканским максимумами мантийного апвеллинга, из работы В. Куртийо и др., 2003 [Хаин, Ломизе, 2005].

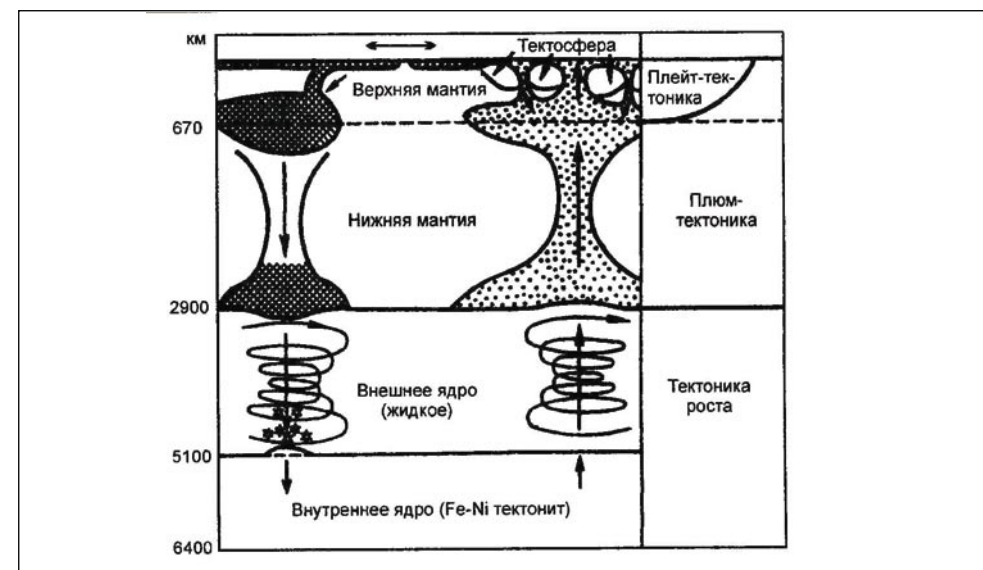


Рис. 2.11. Схематическое изображение глобальной тектоники Земли [Miyamoto et. al., 1994].

которые достигают внутреннего ядра. В свою очередь они дают импульс к возникновению на границе ядро – мантия суперплюма. Вследствие чего разогретый материал суперплюма растекается по обе стороны от границы мезосферы и тектоносферы. Это вызывает конвекцию в последней и движение литосферных плит.

Анализируя вышеназванные данные, в первую очередь сейсмотомографии, авторы новой парадигмы выделяют два крупных восходящих суперплюма – под Тихим океаном и под Африкой и один нисходящий – под Азией, как показано на рис. 2.9.

Однако, несмотря на всю стройность парадигмы японских исследователей, совершенно очевидно, что соотношение между плей- и плюмтектоникой, то есть между мантийной конвекцией и мантийной адвекцией – этими двумя формами тепломассопереноса в мантии Земли, как пишет В. Е. Хаин [2007], не может проявляться независимо друг от друга. И далее он указывает, что «попытки их разграничения в пространстве, как это сделали японские ученые, отводя плюмтектонике нижнюю мантию, а плейттектонике – верхнюю мантию, или во времени, полагая, что на ранней стадии развития Земли господствовала плюм-, а на поздней – плейттектоника, оказываются явно несостоятельными» [Хаин, 2007, с. 327].

Таким образом, рассмотрев наряду с самыми первыми представлениями, изложенными в пятой главе, самые последние тектонические концепции в настоящей главе, мы можем констатировать, что все они объясняют много принципиальных вопросов геологии и тектоники Земли, ее строение и динамику. Однако на сегодняшний день окончательной, целостной и завершенной концепции или парадигмы нет, и процесс ее создания еще

в стадии разработки. Более того, представляется, что, возможно, какой-либо окончательно завершённой концепции и не будет, ибо процесс познания и совершенствования знаний бесконечен.

На сегодняшний же день необходимо работать с теми концепциями, гипотезами и системами, которые наилучшим образом отвечают наблюдаемым фактам. Таковыми, на наш взгляд, являются в целом три последние названные концепции. Хотя они и имеют ряд нерешённых вопросов, но находят довольно много подтверждений и, видимо, будут разрабатываться в дальнейшем.

2.1.3. Динамика ядра

Внутреннее ядро открыл И. Леман в 1936 году. Динамика ядра является наименее изученной. Это связано, с одной стороны, с тем, что оно является одной из самых труднодоступных сфер, а с другой – находится в условиях, в которых сложно изучать и моделировать процессы из-за сверхвысоких давлений и температур, трудно воссоздаваемых в лабораторных условиях. Однако известно, что внутреннее ядро большинство исследователей считают твердым, главным образом железоникелевым по составу. Оно окружено внешним ядром, которое по своим свойствам аналогично жидкому веществу. При вращении геосфер это имеет большое значение для многих процессов, прежде всего электромагнитных.

Основные процессы, которые влияют на динамику внутреннего ядра, обусловлены его вращением. Помимо обычных физических явлений, связанных с вращением тел, были установлены некоторые особенности вращения Земли, которые вызвали ряд особенностей ее динамики.

В связи с вращением Земли происходит периодическое изменение наклона оси вращения к плоскости эклиптики, прецессия, то есть движение оси вращения Земли, точка выхода которой на поверхность описывает окружность, эксцентриситет земной орбиты в форме эллипса.

Естественно, все эти движения Земли приводят к отклонениям не только в планете в целом как твердом теле, но и в разных ее оболочках и их структурах. Причем ее скорость вращения и изменения непостоянны. В их отклонениях выявляется цикличность. Так, скорость осевого вращения постоянно убывает со временем, что связывают с тормозящим влиянием лунного притяжения, а, например, цикличность прецессии составляет, по данным М. Миланковича, 20 тыс. лет, наклона оси вращения – 40 тыс. лет и эксцентриситета орбиты – 100 тыс. лет.

Кроме того, установлено, что в последние два десятилетия полярные области испытывают поднятия, фигура Земли приобретает все более шарообразный вид. Это, по мнению В. Е. Хаина и Н. В. Короновского [2007], объясняет таяние полярных льдов с уменьшением нагрузки на астеносферу.

В конце прошлого века был открыт глобальный процесс перемещения оси вращения в теле Земли, которое приводит к изменению (в диапазоне порядка 10 м) положения географического полюса. Дж. Дарвин отмечал, что такое движение могло быть вызвано попеременным перемещением центра тяжести Земли к северу и югу вдоль полярной оси. Процесс изменения положения оси вращения в теле Земли Ю. Н. Авсюк и И. И. Суворов [2007] связывали с перемещением внутреннего ядра. Еще

И. Ньютон, отметил, что если Земля и Луна обращаются вокруг их общего центра тяжести, то движение Земли возмущено подобными силами. Впервые Кельвин, а затем Д. Г. Дарвин объяснили механизм эволюции этой модели. Изменение силы притяжения из-за смещений внутреннего ядра, то есть эффекта перемещения внутреннего ядра, сказывается так же, как и приливный эффект на формирование течений в гидросфере и на ее динамической фигуре, которая имеет грушевидную форму.

Эти изменения в ядре значительно сказываются в остальных сферах, и прежде всего в соседней сфере – внешнем ядре, которое является как бы жидким. Вследствие чего в этой сфере происходят уже активные процессы конвекции, выноса вещества, которые приводят к образованию плюмов и т. д.

Как отмечают В. Н. Анфилов и Ю. В. Хачай [2007], в наше время методами сейсмотомографии установлено, что уже верхняя граница слоя D'', отделяющая внешнее ядро от нижней мантии и залегающая на глубине 2700–2900 км, имеет отклонение от сферической формы, амплитуда которого достигает 20 км. Это может свидетельствовать, в свою очередь, о наличии периодически возникающих локальных вариаций тепловой энергии. Кроме того, оно может вызвать частичное плавление в слое D', трансформацию фаз на границе этого слоя и нижней мантии и передачу упругой энергии в вышележащие сферы. Как полагают В. Н. Анфилов и Ю. В. Хачай, это может привести к тому, что на поверхности границы раздела по механизму гидроэкструзии формируются локальные диапиры, поднимающиеся к поверхности Земли. Импульс энергии может привести к генерации плюма и выделению его на границе ядро – мантия. Таким образом, процессы, связанные с внутренним ядром, могут, например, влиять на динамику внешнего ядра и последующих сфер.

О значении представлений, касающихся вынужденной относительной раскачки и проворачивания ядра, а также мантии и других оболочек Земли, писал при создании новой геодинамической теории Ю. В. Баркин [2007]. Он указывал, что «многие планетарные тектонические и геофизические процессы являются динамическими следствиями действия одного и того же механизма – относительных смещений, покачиваний и деформаций ядра, мантии и других оболочек Земли, которые вызываются дифференциальными гравитационными воздействиями со стороны внешних небесных тел (Луны, Солнца и др.)» [Баркин, 2007, с. 60]. При этом он показал, что механизм относительной раскачки и блужданий оболочек Земли является мощным источником энергии для всех эндогенных процессов.

Ядро, как и другие оболочки, имеет распределение плотности, структуру, обладает моментом инерции. Как пишет далее Ю. В. Баркин, если их моменты инерции и динамическое сжатие являются различными, то внешние тела (Луна, Солнце) различно (дифференцированно) воздействуют своим притяжением на отдельные оболочки. Они пытаются придать различные ускорения центрам масс оболочек и различные угловые ускорения их вращательным движениям. Отсюда можно заключить: ядро и другие оболочки будут иметь разный момент инерции и угловую скорость, вследствие чего на их контактах будут возникать напряжения и трение. А

поскольку воздействия упомянутых небесных тел во времени непостоянны, то есть связаны с цикличностью их вращения, то силы воздействия между ядром и другими геосферами во времени будут меняться по сложным циклическим законам в соответствии с небесной механикой. Следовательно, положение ядра Земли и других геосфер нестабильно во времени.

Так, о наличии приливных сил в теле планеты в результате взаимодействия системы Земля – Луна – Солнце отмечал Н. В. Короновский [2007]. Он говорил, что поскольку Земля не является идеально упругим телом и в какой-то степени сопротивляется влиянию приливных сил, вызванных космическими причинами, то это приводит к изменению формы Земли. «Колебания приливных сил во времени меняют также и величину сжатия Земли, и, как следствие, происходит изменение скорости ее вращения. Деформации, порожденные приливными силами, должны проследиваться вплоть до ядра» [Короновский, 2007, с. 344]. Колебания ядра и мантии в свою очередь оказывают воздействие на многие процессы в твердой Земле, в том числе на цикличность и инверсию тектонических процессов.

Изменения скорости вращения ядра и Земли, о чем мы писали выше, в результате изменения центра тяжести системы Земля – Луна влияют на динамические параметры планеты в целом и, следовательно, на внутренние земные процессы, в частности на такие, как землетрясения, являющиеся ярким выражением динамики Земли.

Важной особенностью ядра и Земли в целом является то, что скорость их вращения в далекие геологические эпохи была больше, а, следовательно, Земля обладала более сжатой фигурой. Неравномерной была и скорость вращения других параметров, таких, как прецессия, эксцентриситет орбиты, наклон оси вращения к плоскости эклиптики. Все это влияло в первую очередь на твердое ядро, и, соответственно, возмущения от него передавались другим оболочкам.

Изменение скорости вращения Земли, как пишет Н. В. Короновский, связано с изменением фигуры Земли, а с ней – и характера напряженного состояния в твердой внешней геосфере, проявляющегося наиболее ярко в сейсмичности. Изменения напряжений влияют на сеть разломов и трещин на ее поверхности, движения в них (сжатие и расширение) на образование микротрещин. Подтверждено, что регматическая сеть имеет вполне закономерную ориентировку относительно фигуры вращения Земли, а именно: крупные разломы, линеаменты и трещины простираются в основном в широтном и меридиональном направлении, образуя ортогональную систему и подчиненно-диагональную, СЗ–ЮВ и СВ–ЮЗ [Хаин, Короновский, 2007]. О западном дрейфе материков писал еще А. Вегенер, а о северном – М. А. Гончаров, который связывал последнее движение с конвекцией и ротацией.

Таким образом, вращение Земли и связанные с этим изменения особенностей вращения твердого ядра могут проявляться в тектономагнитической активности, западном и северном дрейфе материковых плит, перемещении континентальных и мантийных масс от полюса к экватору, в размещении глубинных неоднородностей.

Следовательно, можно заключить, что динамика ядра и планеты в це-

лом сказывается на динамике всех ее геосфер и расположенных в них структурах. Процессы, происходящие в ядре и Земле, отражены в сейсмическом [Левин, 2001], гравитационном поле, геомагнитных полях (дрейфе магнитных карт и др.) и в электропроводности, описанных нами в следующем разделе.

2.1.4. Магнетизм, электропроводность Земли и их связь с динамикой ядра

Рассматривая динамику внутреннего и внешнего ядра Земли, важно осветить особенности ее магнетизма и электропроводности. Это вызвано тем, что именно с магнитным полем Земли, его изменениями связаны такие глобальные катастрофы, как срыв электрических токов на ядре, изменение напряженности магнитного поля и инверсия магнитных полюсов (см. ниже).

Магнетизм

Магнитные поля широко распространены во Вселенной. Они существуют у звезд, в космическом пространстве, имеется магнитное поле у Солнца и планет, хотя и не у всех [Жарков, 1983; Кашубин и др., 1998; Козырев и др., 2000; Шаров, 1997]. Характерной особенностью геомагнитного поля является его быстрая изменчивость. Значение вариаций магнитного поля для изучения динамики Земли определяется прежде всего тем, что это наиболее быстрые изменения из всех геофизических процессов, которые поддаются изучению. Они отражают сложную картину гидромагнитных течений и колебаний в ядре Земли, где расположены источники собственного геомагнитного поля. Это позволяет судить о значениях ряда параметров ядра, которые не могут быть определены другими методами. По палеомагнитным данным возможно восстановление истории движения плит и блоков в геологическом прошлом, что связано со способностью остывающих лавовых потоков приобретать намагниченность и сохранять ее продолжительное время. Породы как бы запоминают направления аномального магнитного поля.

Проведенные исследования показывают, что магнитное поле Земли существует сотни миллионов лет, а может быть, и больше и что на протяжении геологической истории неоднократно происходило изменение его полярности. То, что Земля имеет магнитное поле, было известно еще в древности, более тысячи лет назад, китайцам, которые были знакомы с магнитной стрелкой компаса.

Однако начало геомагнетизму как научной дисциплине положил значительно позже, в 1600 году, В. Гильберт, опубликовавший первый трактат по геомагнетизму. Он показал, что магнитное поле Земли сходно с полем магнитного диполя. Позднее магнитологи уточнили, что оно сходно с полем сферического магнита, ось которого наклонена к оси вращения Земли на 11°. Систематические наблюдения за магнитным полем начаты в 1580 году, что позволило к 1622 году обнаружить заметное изменение направления магнитного поля в районе Лондона в течение последних 40 лет.

В 1839 году Гаусс опубликовал «Общую теорию земного магнетизма» и первым произвел сферический анализ геомагнитного поля, разложив

его по сферическим функциям. Благодаря этому Гаусс получил многие фундаментальные результаты, в частности *разделил* геомагнитное поле на внутреннее и внешнее, источники которых расположены внутри и вне поверхности Земли. Источники внутреннего поля находятся в основном во внешнем жидком ядре. Гаусс показал, что в магнитном поле Земли преобладает дипольная компонента (хотя есть и квадрупольная компонента и поле высшей мультипольности). Он впервые вычислил величину магнитного диполя – $8,5 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ.

После Гаусса сферический анализ магнитного поля Земли производился неоднократно. Элементы магнитного поля стали изображать с помощью изолиний на магнитных картах для различных эпох. В 1950 году был произведен детальный сравнительный анализ магнитных карт для различных эпох, который привел к важному выводу: изолинии недипольной части магнитного поля «дрейфуют» в западном направлении со скоростью $0,2^\circ$ долготы в год. Так как источники поля расположены в жидком ядре Земли, то это означает, что в нем есть течения со скоростями примерно $0,1$ см/с, что в миллион раз больше скорости эпейрогенических тектонических движений ($0,01$ – 1 см/год).

Чтобы наглядно представить масштаб скоростей, предположим, что частица мантии Земли движется вверх по радиусу от границы ядра к поверхности Земли со скоростью 1 см/год. Тогда весь путь в 2900 км она пройдет за 290 млн. лет. Если скорость движения будет меньше, скажем, $0,1$ см/год, то время выхода на поверхность будет примерно 3 млрд. лет, то есть близко к времени существования Земли как планеты.

Величина земного магнитного диполя также не остается постоянной. Она закономерно уменьшается со времен Гаусса. При таком темпе уменьшения через 2000 лет земное магнитное поле должно исчезнуть. Однако такие экстраполяции в геофизике опасны. Никто не может поручиться, что эпохи уменьшения магнитного поля не сменяются эпохами его роста. То же самое имеет место и при вертикальных движениях земной поверхности. Мы знаем, что часто периоды поднятий сменяются периодами опускания и движения и имеют, скорее, колебательный характер. В действительности архео- и палеомагнитные исследования показали, что величина поля магнитного диполя изменяется около некоторого среднего значения, близкого современному. Пока что восстановлен один период такого колебания магнитного диполя, длящийся около 8000 лет. Минимальное значение дипольного поля примерно в два раза меньше максимального.

Еще больший период соответствует переполюсовкам (смены полярности) геомагнитного поля. В новейшее геологическое время продолжительность эпох одной полярности составляла в среднем 200000 лет. В более древние геологические эпохи эти периоды были больше и достигали 1 млн. и даже 10 млн. лет. Это легло в основу геомагнитной хронологической шкалы для последних 160 млн. лет истории Земли (мезокайнозой). Уточнение этой шкалы и ее расширение во времени – фундаментальная задача современной геофизики.

В значительной мере это обусловлено тем, что полосчатая структура магнитных аномалий океанического дна, расположенных симметрично относительно срединно-океанических хребтов, с помощью геомагнитной

шкалы позволяет оценить скорость раздвигания океанического дна в стороны от хребтов.

Магнитное поле Земли обычно представляется в виде карт равных значений основных компонент: модуля вектора T , его составляющих X , Y , H и Z (карты изодинам), склонения D и наклонения I (карты изогон и изоклин) [Ушаков, 1974].

Основная формула, описывающая магнитное поле Земли, определяется путем разложения магнитного потенциала W по сферическим функциям:

$$W = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a/r)^{n+1} \{g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda\} P_n^m(\cos \theta), \quad (2.1)$$

где: a – радиус Земли, r – расстояние до центра Земли, в котором помещено начало сферических координат, θ – полярное расстояние, λ – восточная долгота, g_n^m и h_n^m – коэффициенты Гаусса.

Коэффициенты g_n^m и h_n^m измеряются в тех же величинах, что и напряженность поля, то есть в Гауссах, и обозначаются Гс. P – точка, в которой рассматривается потенциал. В земном и космическом магнетизме обычно употребляется меньшая величина – гамма (γ). При этом: $1 \gamma = 10^{-5}$ Гс.

Величины g_n^m и h_n^m испытывают небольшие изменения во времени и называются вековыми вариациями.

Точки, в которых ось диполя пересекает земную поверхность, называются геомагнитными полюсами. Она наклонена к оси вращения Земли на $11,5^\circ$. Геомагнитные полюсы следует отличать от истинных магнитных полюсов, где истинное наклонение равно 90° . Напряженность поля на магнитном экваторе диполя обозначается буквой B_0 , тогда магнитный момент диполя равен

$$M = B_0 \cdot a. \quad (2.2)$$

Магнитное поле не остается постоянным по абсолютной величине. В настоящее время оно уменьшается со скоростью $0,05\%$ в год.

Природа геомагнетизма

Реальное магнитное поле Земли *создается* при магнитогидродинамических течениях во внешнем ядре Земли. Вопрос о природе магнетизма у космических тел, в том числе и у Земли, привлекал многих ученых. Но законченной теории до сих пор не существует, что является одной из нерешенных фундаментальных проблем геофизики. Современная теория исходит из того, что магнитное поле Земли создается и поддерживается за счет так называемого *динамо-механизма*. Считается, что создание магнитного поля в ядре происходит так же, как в динамо-машине, с самовозбуждением. Принцип ее действия следующий: пусть катушка проводов вращается во внешнем магнитном поле, тогда за счет электромагнитной индукции в ней возникнет электрический ток, который создает магнитное поле, оно может усилить внешнее магнитное, что в свою очередь усилит ток в катушке и т. д. Поэтому, если в жидком ядре *возникает тепловая*

или гравитационная конвекция, то она порождает гидродинамические течения в проводящей жидкости. Течение ее соответствует движению проводника. Если во внешнем ядре имеются затравочные магнитные поля, то при пересечении потоков их силовых линий в нем возникнет электрический ток. Он создает магнитное поле, которое при благоприятной геометрии течений может усилить внешнее затравочное поле, а это в свою очередь усилит ток и т. д. Процесс продолжается до образования стационарного магнитного поля (теория гидромагнитного динамо, или ГД). Впервые она была предложена в 1919 году Ларморов в Англии для объяснения магнетизма Солнца.

В геофизике эта идея не находила применения вплоть до середины 40-х годов XX века. В эти годы Я. И. Френкель в СССР и В. Эльзассер в США высказали идею о том, что в земном ядре имеет место *тепловая конвекция*, о которой мы будем говорить в шестой главе. По их мнению, именно она приводит в действие ГД земного ядра. С тех пор теория ГД получила широкое развитие, берущее начало с работ английского теоретика Т. Каулинга, выполненных в 1934 году. Он доказал теорему о невозможности стационарного (то есть незатухающего) ГД, в котором движение жидкости и магнитное поле обладают осевой симметрией (относительно оси вращения).

Дальнейшее развитие теории обязано работам В. Эльзассера (1940–1950), Э. Булларда и Х. Геллмана (1954), Е. Паркера (1955). Однако и после этих работ еще не был сделан важный шаг в теории ГД, который заключался в доказательстве самой возможности самовозбуждения магнитного поля при движении однородной проводящей жидкости в ядре. Принципиальная возможность ГД была доказана в 1958 году Г. Бэкусом в США и А. Герценбергом в Англии. В их моделях заданной считается скорость жидкости, а определяется только магнитное поле. Такие модели называются кинематическими моделями *земного динамо*. Теория позволяет получить числовые оценки ряда физических параметров земного ядра. Так, советским физиком С. И. Брагинским в 1964 году были построены кинематические задачи для крупномасштабного поля скоростей (ламинарное динамо). Заметим, *ламинарное* – это течение, в котором перемещение происходит без перемешивания. В дальнейшем физиками ГДР М. Штеенбеком, Ф. Краузе и К. Редлером [1966] были решены задачи для мелкомасштабного поля скоростей (турбулентное динамо). В настоящее время над проблемой ГД работают многие специалисты по магнитной гидродинамике.

Общая физическая схема образования и поддержания магнитного поля в жидком проводящем ядре Земли

Западный дрейф недипольной части геомагнитного поля свидетельствует о долготных течениях в наружных слоях ядра относительно мантии со скоростями около 0,1 см/с. Следовательно, можно думать, что жидкое ядро в отличие от мантии Земли не вращается как единое целое вокруг земной оси с заданной угловой скоростью, а скорее находится в состоянии дифференциального вращения, когда разные слои ядра вращаются с несколькими различными скоростями.

Дифференциальное вращение ядра является естественным следствием *конвективных течений* в нем. Более легкие жидкие частицы в поле силы тяжести всплывают вверх по радиусу, а более тяжелые, наоборот, погружаются вниз. Подвижные частицы сохраняют свой момент количества движения относительно оси вращения. Поэтому легкие частицы всплывают и замедляются по отношению к слоям жидкости, куда они попадают, а более тяжелые опускаются и двигаются быстрее. В результате наружные слои внешнего ядра испытывают замедление, которое мы наблюдаем как западный дрейф, а внутренние слои ядра ускоряются – восточный дрейф. Так возникает дифференциальное вращение земного ядра. Причем, согласно теореме основоположника магнитной гидродинамики Х. Альвена, магнитные силовые линии в идеально проводящей жидкости (в которой коэффициент затухания равен бесконечности) скреплены с веществом и при движении жидкости вместе с ней переносятся и силовые линии магнитного поля. В идеальном проводнике поле как бы заморожено в веществе.

Каким же образом возникает искомое полоидальное поле (B_r)? По теореме Каулинга осесимметричные течения не могут дать стационарного ГД. Тепловая или гравитационная конвекция в ядре обладает в среднем сферической симметрией. Тогда дифференциальное поле вращения будет обладать осевой симметрией, и, согласно теореме Каулинга, не возможно было бы никакое стационарное ГД. Однако осесимметричная картина течений в ядре нарушается магнитогидродинамическими волнами, открытыми С. И. Брагинским в 1964 году. Они были названы МАК-волнами, так как в них взаимно уравновешены магнитные, архимедовы и кориолисовы силы. Поле скоростей МАК-волн создает генерирующие скорости V , которые вытягивают поле B_r из напряженности B , замыкая тем самым цикл самовозбуждения Земли. (Здесь B_r – полоидальное поле, B – напряженность поля Земли.)

Согласно теории ГД, вязкость ядра должна быть меньше, чем 10^9 , «двигатель», поддерживающий работу ГД, должен быть энергетическим источником не менее 10^{13} кал с. Однако источники радиоактивного тепла в железном земном ядре весьма скудны. Поэтому вопрос о «двигателе» ГД остается дискуссионным. Однако считается, что они достаточны.

Некоторые считают, что для поддержания ГД необходима гравитационная конвекция. Согласно американскому геохимику Юри, она продолжается за счет гравитационной дифференциации железа, а по Брагинскому – она обеспечивается за счет роста внутреннего железного ядра путем кристаллизации и всплывания легких компонент, например кремния. Последнее и приводит в действие ГД.

Итак, ГД Земли – сложная автоколебательная система. Даже среднее геомагнитное поле (осевой диполь) не является стационарным, а колеблется с периодом примерно $7,5 \cdot 10^3$ лет, то есть 7500 лет. Средние периоды колебаний геомагнитного поля имеют значения примерно в 1000 лет, в частности, выявлены периоды в 550, 700, 1200, 1800 и 7000 лет. Есть и более высокочастотные колебания в спектре поля (до 60 лет).

Электропроводность Земли

Электропроводность земных недр определяется по затуханию гео-

магнитных вариаций, которые возбуждаются солнечной активностью в верхних слоях земной атмосферы. Переменный электромагнитный сигнал индуцирует в Земле переменные электрические токи. Глубина проникновения электромагнитных вариаций связана со средней электропроводностью слоя σ , круговой частотой ω и скоростью света с соотношением:

$$\delta = c \cdot (2\pi\sigma\omega)^{-1/2}. \quad (2.3)$$

Чем меньше частота сигнала, тем более глубокие слои недр могут быть прозондированы. Трудности вызывает влияние океанов и почвы, тем не менее геофизические методы позволяют определять вариации до глубины 1000 км, что требует период вариаций в полгода. Электропроводность нижней мантии удалось оценить с помощью методов физики твердого тела и физики высоких давлений. По мере погружения на большие глубины мы вступаем в область «проводящего слоя», где основную роль играет собственная, ионная проводимость со значением примерно $0,01 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Температура «проводящего слоя» достигает $1100\text{--}1200^\circ \text{C}$.

Проводимость продолжает нарастать по мере приближения температуры земных недр к температуре плавления мантийного вещества. С погружением в глубь Земли давление нарастает, что, в свою очередь, приводит к росту температуры плавления пород с глубиной. Заметим, что при этом температура плавления растет быстрее, чем реальные температуры земных недр. По мере продвижения вглубь и отклонения температуры земных недр от температуры плавления начинает уменьшаться и проводимость. Это объясняет наличие пониженной электропроводности на глубинах около 150–420 км. Уменьшение электропроводности продолжается до границы с переходным слоем Голицына (слой C) на глубинах около 400 км и, вероятно, захватывает верхние части этого слоя. В переходном слое проводимость снова резко возрастает в связи с переходом к собственной полупроводниковой электронной проводимости.

В условиях нижней мантии (слой D) электропроводность возрастает как из-за роста температуры, так и давления. В целом в нижней мантии происходит возрастание электропроводности примерно в тысячу раз. Земное ядро состоит из расплавленного металла проводимостью $3 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Таковы основные особенности магнетизма и электропроводности Земли и связь их с ядром Земли, его вращением, которые оказывают большое значение на всю динамику планеты, о чем будет изложено в следующих главах.

2.1.5. Срыв электрических токов на ядре и инверсия магнитных полюсов Земли

Медленные глобальные катастрофы могут быть связаны со всей Землей и касаются большинства населяющих ее видов. Они могут быть вызваны, например, инверсией магнитных полюсов и срывом электрических токов на ядре.

История Земли знает множество примеров нарушения устойчивости системы. Среди них наиболее грандиозными являются нарушения коль-

цевых электрических токов в металлическом (или металлизированном) ядре Земли. Один раз в миллионы лет срывается этот довольно устойчивый процесс, а потом кольцевые токи вновь восстанавливаются в обратном направлении. Тогда меняются местами магнитные полюсы Земли (инверсия), а в промежуточный период магнитное поле нарушается. В последнее время – через 1 млн. лет. Прошлый раз инверсия была 750000 лет назад. Заметим, что установлен в Орегоне в течение двух недель поворот оси на 90° .

Нарушается и исчезает космическая броня Земли. В результате этого радиация и внешнее космическое излучение беспрепятственно достигает нижних слоев атмосферы. Во много раз возрастает на Земле уровень радиации, и все живое, видимо, достаточно тяжело переносит всеобщую катастрофу. Но все же переносит: возраст современных видов животных больше промежутка времени между инверсиями, и эта необычная катастрофа не смертельна для всего населения Земли.

2.2. Глобальные природные катастрофы, связанные с динамическими процессами планеты и ядра

К глобальным природным катастрофам могут привести геодинамические процессы, связанные с нашей планетой в целом и с ее ядром. Это в основном медленные катастрофы, обусловленные изменением параметров Земли вслед за изменениями скорости ее вращения, орбиты, наклона оси, напряженности магнитного поля, инверсией магнитных полюсов. Однако изучены они сравнительно мало в силу их большой продолжительности (миллионы и миллиарды лет) и сложности наблюдения. В то же время к глобальным изменениям на планете и ее сферах, в том числе атмосфере и гидросфере, могут привести такие быстрые природные катастрофические явления, как землетрясения, извержения вулканов, цунами и циклоны, которые будут рассмотрены в последующих главах.

2.2.1. Изменение глобальных параметров Земли

а) Изменение скорости вращения Земли

Известно, что скорость вращения Земли постоянно убывает со временем из-за тормозящего влияния лунного притяжения, также она испытывает периодические изменения разных порядков [Хаин, Короновский, 2007]. На все процессы, происходящие в Солнечной системе, влияет ее взаимодействие со звездами. В результате этого меняются скачкообразно параметры галактической орбиты Солнца [Баренбаум, 2007] и, как мы полагаем, Земли. А. А. Баренбаум представил хронологическую шкалу космических событий, согласно которой границы наиболее крупных ее подразделений связываются с геохронологической шкалой. События, отмеченные скачкообразным изменением параметров галактической орбиты, выделяются в истории Земли как эпохи сильных геологических и биотических *катастроф*. Он связывает известные тектонические циклы Штилле, Бертрона и Вильсона с кометными ливнями. При этом вследствие движения Солнца по галактической орбите область, где плотность падения галактических комет достигает максимума, закономерно смещается

по земной поверхности, контролируя, по его мнению, времена и широты возникновения глобальных оледенений, а также эпохи формирования и распада суперконтинентов.

Об изменении скорости вращения Земли, причем, возможно, не только планеты в целом, но и различных ее оболочек, а также других параметров, пишет Ю. В. Баркин [2007]. При этом он отмечает, что Луна и Солнце по-разному (дифференцированно) воздействуют своим притяжением на отдельные оболочки Земли. «Они пытаются придать различные ускорения центрам масс оболочек и различные угловые ускорения их вращательным движениям» [Баркин, 2007, с. 60].

Многие планетарные тектонические и геофизические процессы являются динамическим следствием относительных смещений, покачиваний и деформацией внутреннего ядра Земли, которые вызываются дифференциальными гравитационными воздействиями со стороны внешних небесных тел (Луна, Солнце). Экспериментально установлено, что в течение последних 500 млн. лет угловая скорость Земли непрерывно уменьшается, известен эмпирический закон этого уменьшения [Тяпкин, 2007].

б) Изменение наклона оси вращения Земли

В конце прошлого века был открыт глобальный процесс перемещения оси вращения Земли, когда изменяется (~10 м) положение географических полюсов. «Модели, способной объяснить механизм этого процесса и все закономерности перемещения оси вращения в теле Земли, пока нет» [Авсюк, Суворова, 2007, с. 3]. Однако Д. Г. Дарвин отмечал, что «такое движение могло быть вызвано попеременным перемещением центра тяжести Земли к северу и югу вдоль полярной оси. Для того, чтобы объяснить сам размер явления, достаточно перемещения центра тяжести Земли на 12 футов, или 360 сантиметров» [Дарвин, 1923]. Ю. Н. Авсюк и И. И. Суворова попытались связать процесс изменения положения оси вращения в теле Земли с перемещением внутреннего ядра. Они рассматривали обращение в целом массы системы Земля – Луна вокруг их общего центра (барицентра). О возможном возмущении в Земле в результате ее вращения вокруг их общего с Луной центра отмечал еще И. Ньютон [1936]. Вариант приливной модели эволюции, увязки ее с материалами исторической геологии и сопоставления с теоретической реконструкцией природных процессов был выполнен еще Кельвином и детализирован Д. Г. Дарвиным.

В наше время, сохранив принципиальное положение модели приливной эволюции, уточнив структурное строение Земли и введя в описание приливной силы дополнительные члены, соответствующие возмущению в теле Земли, Ю. Н. Авсюк установил, что статистические смещения центра Земли могут достигать 3–20 м.

Изменение, в свою очередь, наклона экватора под действием притяжения Луны связывают с эпохами похолодания на Земле (ледниковыми периодами).

Таким образом, перемещение оси вращения Земли и ее изменения в длительном процессе могут иметь для Земли *катастрофические* последствия.

Можно добавить следующее: «Исходя из современных представле-

ний о внутреннем строении Земли, можно считать наиболее вероятным *проворот внутреннего ядра* относительно остальной части Земли по промежуточному слою F. Свидетельством реальности описанного выше механизма относительных перемещений оболочек Земли и внутреннего ядра являются экспериментально наблюдаемые перемещения полюсов по поверхности Земли, которые возможны только при этом условии» [Тяпкин, 2007, с. 297]. Изменение ротационного режима Земли приводит к нарушению геоизостазии и *уменьшенному значению угловой скорости вращения*.

Возможные изменения других параметров Земли

Об изменении не только скорости вращения Земли, но и других ее параметров под влиянием гравитационных сил со стороны внешних небесных тел пишет Ю. В. Баркин [2007]. Он предлагает механизм резких спорадических смещений ядра, деформации мантии в определенные периоды (явление «галопирующего ядра»), приводящие к скачкообразным вариациям осевого вращения Земли, резким сменам напряженного состояния в зонах *катастроф*. Получили объяснение явления *инверсии полюсов, сейсмическая активность, инверсии активности вулканов зон субдукции и зон рифтинга* и другие явления [Баркин, 2007, с. 62]. Об изменении наряду с другими параметрами, например величины торможения вращения Земли, также и «размеров орбиты и скорости движения Земли вокруг барицентра», писал Ю. Н. Авсюк [2002]. Причиной изменения орбиты Земли может быть удар внешнего космического тела.

2.2.2. Глобальные изменения климата

В последние десятилетия проблема глобального изменения климата стала главной для современной цивилизации, включая ООН. Природные катаклизмы растут, число жертв от них существенно увеличивается. Во всех регионах мира проявляются такие аномалии климата, которых давно (или никогда) не было: то зимой распускаются цветы, зеленеют и цветут деревья, вырастают грибы (даже в Подмосковье), то выпадает снег в Африке (в Марокко, Алжире в январе 2008 года). В Туркмении в это время небывалые холода –16° С и снег до полуметра, чего не было уже полвека. В последние годы наблюдались невиданные наводнения в Европе и других регионах. О летней жаре и пожарах уже можно не говорить.

Поэтому закономерны в РАН фундаментальные исследования по программе «Изменения окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы», проводится мониторинг изменения окружающей среды. В итоге деятельности по этой программе предполагается «разрабатывать более обоснованные прогнозы катастрофических явлений, а также рекомендации по предупреждению возможных катастрофических последствий этих процессов на территории России» [Изменения..., 2007, с. 195].

Причины глобального изменения климата связаны в основном с внешней оболочкой Земли, атмосферой. Они рассматриваются в шестой главе.

2.2.3. Погружение или поднятие морских побережий

Вопросы о погружении морских побережий и изменении морских течений относятся к процессам в гидросфере и рассматриваются в пятой главе, здесь же отметим, что для оценки погружения или повышения морских побережий репером является уровень Мирового океана. Как известно, он непостоянен и в настоящее время медленно повышается (~2–3 мм/год), что связывают с таянием полярных ледовых шапок. Впервые в Канаде и Скандинавии было замечено повышение уровня океана на 130 м за последние 15 тыс. лет [Короновский, 2006]. При этом за последние 6 тыс. лет уровень повышался со скоростью 1–4 м за тысячу лет.

Естественно, аномальное таяние льда в Антарктиде и Арктике, которое началось в последние десятилетия, связывается с глобальным потеплением климата. Последнее обуславливается разными однозначно не установленными причинами (повышение солнечной активности, выброс фреона и соответственно углекислого газа, парниковый эффект, озоновая дыра и др.). При этом повышение температуры воздуха на 2° С может означать, что в отдельных местах и регионах она достигает до 8° С.

П. Р. Вейлом построена кривая относительных колебаний уровня океана в мезокайнозой. Показано, что самый высокий уровень (350 м) был в позднем мелу, а самый низкий (250–350 м) в олигоцене (начало формирования ледникового щита Антарктиды).

Контрастные тектонические движения морских берегов наблюдаются не только при медленных процессах, но и при быстрых. Так, при катастрофическом землетрясении в Чили 29 мая 1960 года прибрежная полоса шириной 20–30 км и протяженностью около 500 км опустилась под воду почти на 2 м [Злобин, 2000].

Один из свежих примеров тектонического поднятия имел место 2 августа 2007 года при Невельском цунамигенном землетрясении в Татарском проливе (шельф юго-западного Сахалина), когда прибрежный скалистый бенч поднялся на 0,5–1,5 м [Ломтев и др., 2007].

2.2.4. Изменение направлений морских течений

Рассмотрим причины возникновения течений в Мировом океане. Они связаны с атмосферой, вращением планеты и собственными свойствами воды в океанах. Известно, что распределение температуры и плотности воды в океане неравномерно. При этом неравномерно распределяется температура по площади и глубине (рис. 2.12).

Вследствие солнечного облучения вода в океанах прогревается лишь в поверхностном слое (термоклин), поэтому только 8 % океанских вод теплее +10° С, а больше 50 % имеет температуру ниже +2,3° С. С глубиной температура воды снижается. Основной скачок температуры и плотности вод происходит непосредственно под термоклином мощностью до 200 м, поскольку подстилающие водные массы более холодные и плотные. При этом в поверхностном слое температура воды различна по широтам. Так, на экваторе она достигает +30° С, а в высоких широтах уменьшается до 0° С. Среднегодовая температура воды также варьирует, в том числе между полушариями. Так, при средней температуре оке-

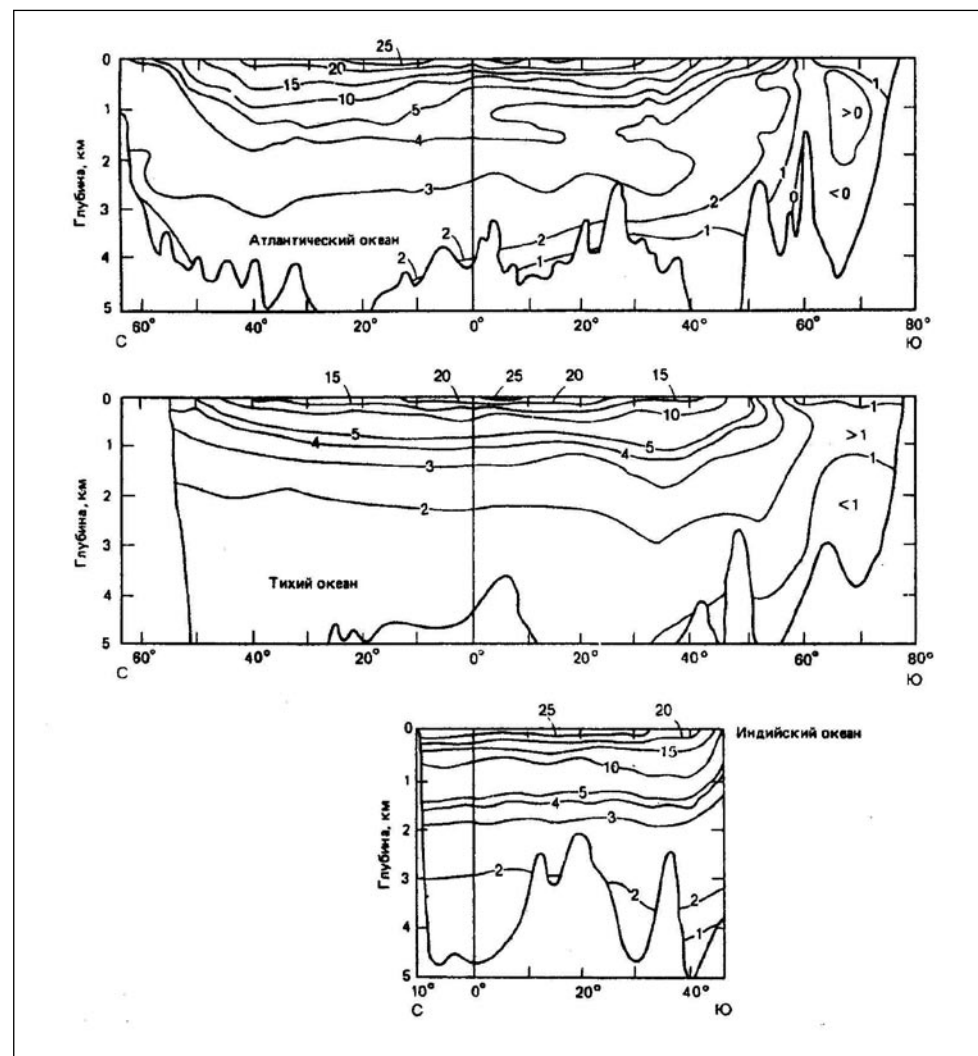


Рис. 2.12. Изменение температуры по вертикали в трех океанических бассейнах [Dietrich, 1963].

ана около +17° в Северном полушарии она составляет +19° и +16° С – в Южном [Короновский, 2006]. Есть различия в плотности воды в океане (рис. 2.13).

Существенно дифференцируются и другие свойства Мирового океана (соленость, различные давления на разных глубинах, химический и газовый состав морской воды). Все это, естественно, ведет к перераспределению масс воды в океане и в конечном счете к турбулентному и ламинарному движению.

Таким образом, вода океанов и морей находится в непрерывном дви-

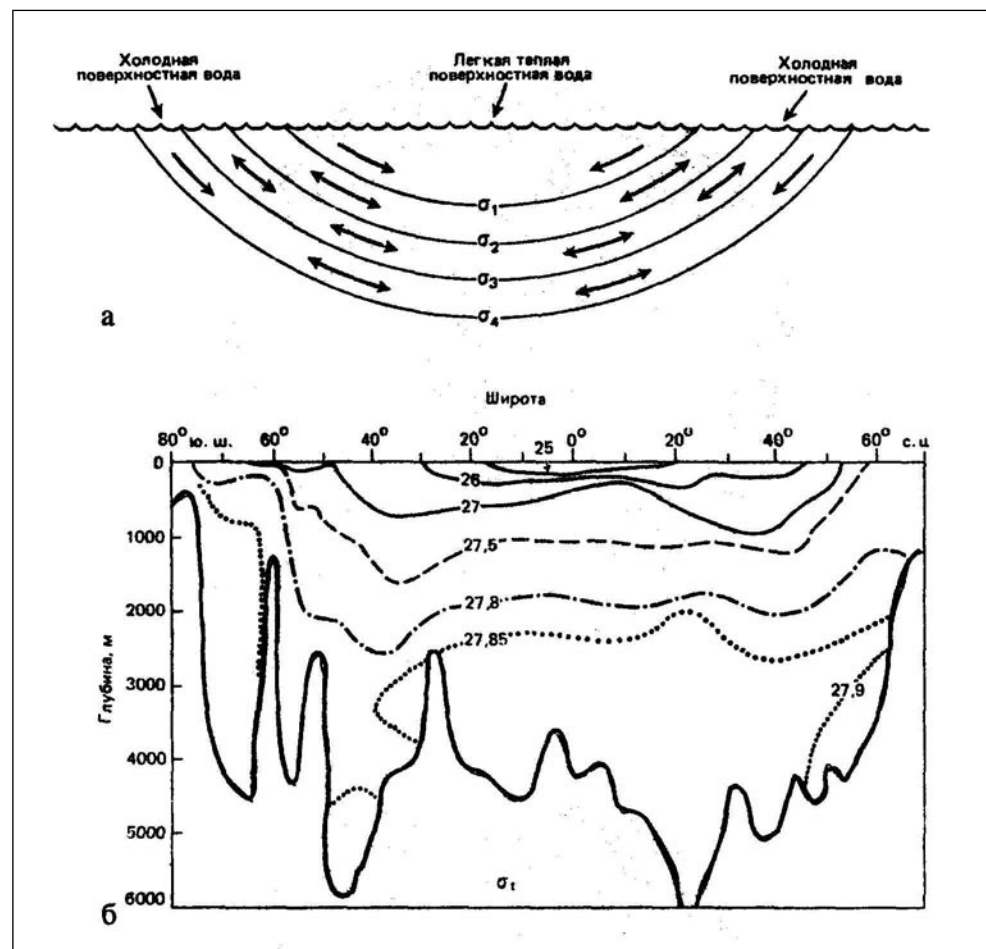


Рис. 2.13. Схема распределения плотности вод в результате того, что вода течет и (или) перемешивается вдоль линии постоянной плотности (а); фактическое распределение плотности в Атлантическом океане (б) [Pickard, 1975].

жении. Кроме того, на водную среду океана влияет атмосфера. Из-за ветров нижней атмосферы имеет место ее поверхностная циркуляция, которая влияет на перемещение воды в самом верхнем слое. При этом характер циркуляции воды связан с перемещением атмосферы и вращением Земли. В результате этого в средних и низких широтах Северного полушария ветры образуют круговорот воды по часовой стрелке, а в Южном – против. Они, в свою очередь, обуславливают главные океанические антициклонические круговые течения (рис. 2.14).

Это генеральные направления течений. Хорошо известны крупные теплые течения, например, Гольфстрим, несущее экваториальные воды в Северный Ледовитый океан, и широтное Кюросиво в северной части Тихо-

го океана. Кроме того, на морские течения влияют и внешние факторы, например, сила Кориолиса, связанная с вращением Земли с запада на восток, что было установлено еще в 1835 году Ж. де Кориолисом (рис. 2.14, 2.15).

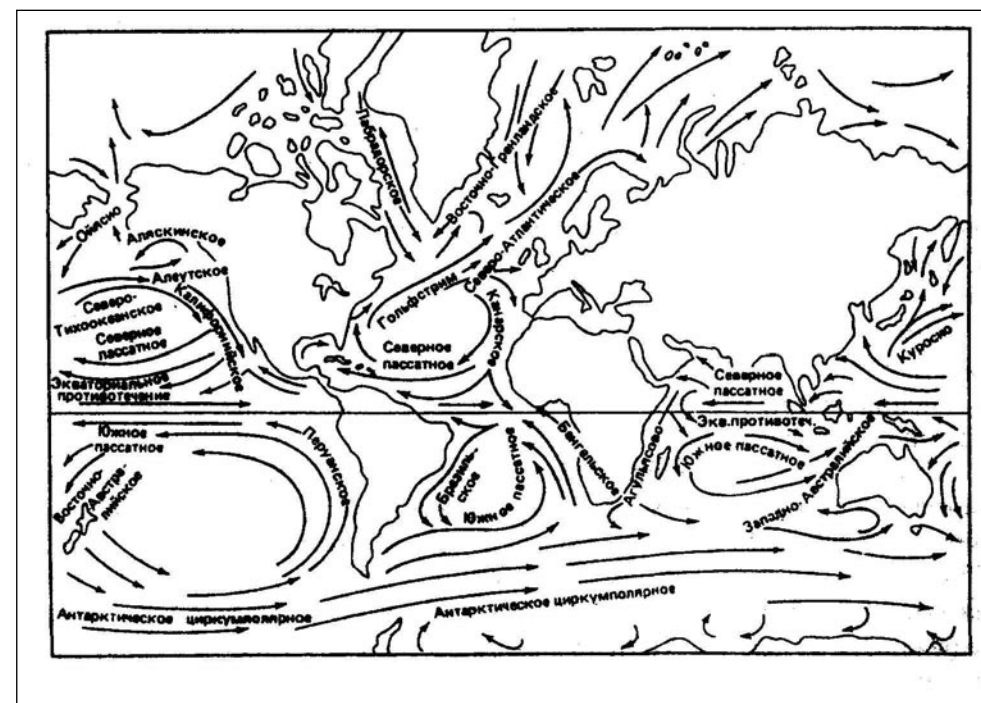


Рис. 2.14. Главные поверхностные течения Мирового океана [из работы Короновского, 2006].

При этом направление вращения в Северном и Южном полушариях имеет различную ориентацию, если смотреть с полюсов: с Северного оно будет против часовой стрелки, а с Южного – по часовой. Поэтому образуются разные Циркум-Антарктические течения (рис. 2.15).

Таким образом, в конечном счете все вышеназванные факторы и различия порождают течения в Мировом океане и циркуляцию. В заключение следует сказать, что основные течения носят планетарный характер. Они имеют глобальное значение. И хотя такие теплые течения, как Гольфстрим и Кюросиво, имеют однозначно положительное значение, этого нельзя сказать об их возможных изменениях, которые происходят и могут в некоторых случаях принести катастрофические последствия, особенно для прибрежных районов, омываемых этими течениями. Поэтому течения относятся к объектам, подлежащим изучению с точки зрения их длительных изменений и обусловленных ими возможных природных катастроф.

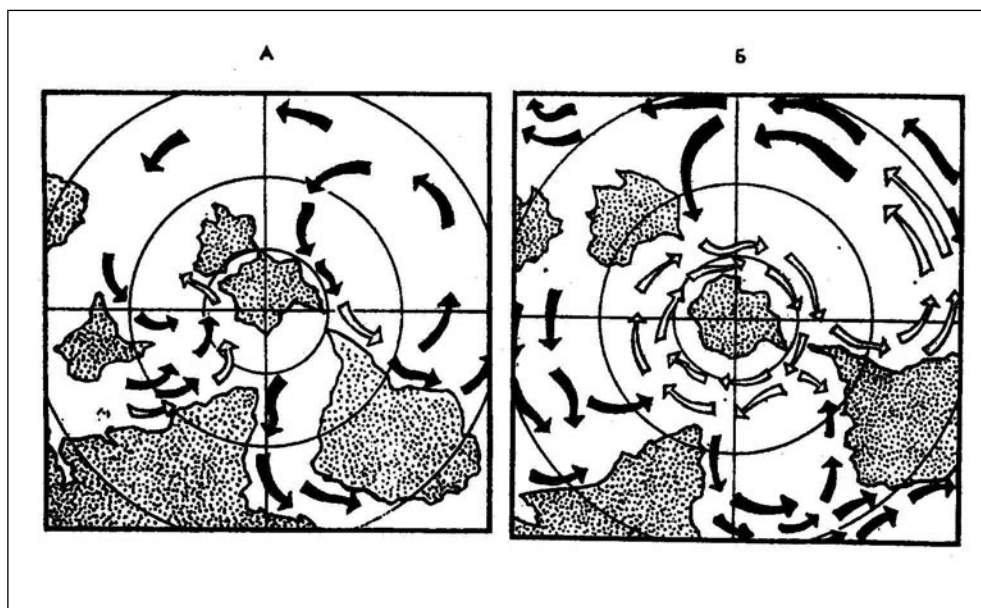


Рис. 2.15. Образование Циркум-Антарктического холодного течения благодаря перемещению литосферных плит. Белые стрелки обозначают холодные воды, черные — более теплые; А — 60 млн. лет назад; В — в наши дни [Короновский, 2006].

ГЛАВА 3 ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЛУБИННЫХ ГЕОСФЕР (МАНТИИ И ЗЕМНОЙ КОРЫ) И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ

3.1. Эндогенные процессы в литосфере

Динамика глубинных геосфер Земли определяется эндогенными (внутренними) процессами, происходящими в недрах планеты. Она проявляется в тектонических движениях, магматизме, метаморфизме, землетрясениях и др. При этом процессы бывают медленные (сотни тысяч и миллионы лет) и быстрые (до секунд). Результаты этих процессов выражаются в *тектонических движениях и дислокациях земной коры*.

Рассмотрим проявления динамики литосферы и земной коры в геофизических полях и движении вещества по вертикали и горизонтали, например, движение литосферных плит, блоков, слоев горных пород, сейсмичность, рост соляных и магматических куполов и многое другое. Но прежде важно представить основные тектонические гипотезы, теории и концепции.

Тектонические гипотезы динамики и движений земной коры

Для объяснения процессов, происходящих в твердой оболочке Земли, динамики и движения слоев предлагались различные гипотезы (поднятий, контракции, пульсационная, ротационная, расширения Земли, глубинной дифференциации, дрейфа континентов и др.). Одной из первых была гипотеза, предложившая научное объяснение движений и деформаций земной коры и магматизма, – *гипотеза поднятий*, у истоков которой стояли М. В. Ломоносов и шотландец Дж. Хаттон. Ведущую роль они отводили вертикальным движениям земной коры, особенно поднятиям, считая, что последние вызваны подъемом расплавленной магмы, которая местами изливается на поверхности. Складчатые дислокации вторичны и вызваны раздвигающим действием поднимающейся магмы и оползанием слоев со склонов поднятий. Эти идеи до сих пор не утратили своей значимости и находят отражение в современных представлениях.

Однако геологическое картирование, проводимое еще в XIX веке, особенно в каменноугольных бассейнах, показало значительную сложность складчато-надвиговых дислокаций, часто удаленных от магматических внедрений. Поэтому складчатость стали объяснять боковым сжатием слоев (*гипотеза контракции*, предложенная французским геологом Эли де Бомоном). Она опиралась на гипотезу Канта–Лапласа о первоначально расплавленном состоянии нашей планеты. Вследствие охлаждения предполагалось образование корки (земной коры), которая с уменьшением объема коробилась, сминалась в складки. Эта гипотеза монополярно развивалась вплоть до XIX века, а на ее основе – динамическая геология. Но в XX веке появились факты, опровергающие основы этой гипотезы. Астрономы отказались от гипотезы расплавленной Земли, придя к заключению, что наша планета образовалась в холодном виде. Физики открыли

явление радиоактивности. Было обнаружено, что Земля содержит большое число радиоактивных элементов, распад которых сопровождается значительным тепловыделением, достаточным для разогрева и частичного плавления. Геологи открыли крупные шарьяжи, которые не могли образоваться путем контракции, так как потребовалось бы сжать очень большой объем за очень маленькое время (шарьяж – пологий, менее 10° , надвиг).

Эти и другие факты привели к необходимости поиска других объяснений глобального тектогенеза. Американским ученым В. Бухером и советскими геологами М. А. Усовым и В. А. Обручевым была предложена *пульсационная гипотеза*. В соответствии с ней Земля пульсирует, и ее объем то увеличивается, то уменьшается. В *фазы расширения* происходят образование разломов, заложение геосинклиналей (прогибы земной коры, заполняющиеся осадками), массовые излияния базальтов. В *фазы сжатия* геосинклинали, выполняющие их отложения, сминаются в складки, образующие складчатые горные системы. Одна из основных трудностей этой гипотезы заключается в том, что на Земле в одно и то же время наблюдается и растяжение в рифтах, и сжатие в горных системах.

В 1933 году немецкий ученый О. Хильгенберг выдвинул *гипотезу расширяющейся Земли*. Она удачно объясняет образование молодых океанических впадин растрескиванием земной коры и имеет своих сторонников и сегодня. Но данная гипотеза испытывает затруднения при истолковании закрытия впадин древних океанов и формирования на их месте складчато-надвиговых горных систем (инверсия). При этом совершенно не ясна причина предполагаемого и значительного расширения Земли. Однако, несмотря на эти и другие возражения, в настоящее время эта гипотеза переживает некоторое возрождение.

Гипотеза дрейфа континентов была выдвинута А. Вегенером в 1912 году. Альфред Лотар Вегенер (1880–1930) – немецкий геофизик, в 1905 году получил докторскую степень по планетарной астрономии. Затем заинтересовался метеорологией и в 1915-м издал труд «Происхождение континентов и океанов», в котором выдвинул гениальную идею о раздвижении континентов. Впоследствии все ее основные принципы подтвердились. А. Вегенер предположил, что еще в начале мезозоя (225 млн. лет назад) все материки составляли единый суперконтинент Пангея, который в юре (140–190 млн. лет назад) распался. В результате обособились современные континенты, а в раздвигих между ними образовались впадины молодых океанов. Исходным моментом гипотезы было: 1) сходство очертаний материков, подкрепленное другими фактами; 2) соответствие флоры и фауны; 3) оледенение, которое охватило в позднем палеозое все южные материки. Сейчас многие считают идею Вегенера верной, но ее слабой стороной было объяснение им причин предполагаемого *перемещения* материков за счет вращения Земли. Геофизики показали, что хотя роль ротационных сил велика, тем не менее их недостаточно, чтобы сдвинуть материки на большое расстояние. За год до смерти А. Вегенера (1929) было выпущено четвертое издание его книги, где сделаны важные дополнения (например, о молодом возрасте океанов). К этому заключению он пришел после рассмотрения

батиметрических данных НИС «Метеор» по Срединно-Атлантическому хребту (были обнаружены признаки расширения океанического дна). Однако А. Вегенеру при жизни не удалось довести свою гипотезу до уровня теории, и в 30-е годы она была почти забыта.

Фиксистская концепция получила развитие в 30–50-х годах XX века. Ее предложили голландский ученый Р. В. ван Беммелен и советский геолог В. В. Белоусов. Суть гипотезы в следующем: а) базальтовые расплавы поднимаются в виде перевернутых капель кверху и в случае повышенной проницаемости коры изливаются на поверхности, что ведет к ее проседанию, возникают геосинклинальные прогибы, заполняемые осадками и вулканитами; б) накопление мощных вулканогенно-осадочных толщ делает невозможным прорыв базальтов к поверхности, поэтому они застывают на глубине (интрузии, батолиты и др.) и отдают тепло и флюиды на их метаморфизм, частичное плавление, гранитизацию, увеличение объема, утолщение коры, складчатость и образование горного рельефа; в) подъем и вспучивание коры при новых поступлениях базальтовой магмы из-за ее малой проницаемости; г) в случае подъема особо крупных масс расплавленного базальта блоки континентальной коры тонут в нем (*океанизация или базификация коры*), возникают океанические впадины с так называемой океанической корой.

Основные возражения к этой концепции следующие: а) горизонтальные движения невелики (первые десятки километров); б) установлено, что геосинклинали образуются в условиях растяжения коры, а инверсионные складчатые сооружения на их месте – при сжатии; в) кора ложа океанов по петрохимическим данным не может считаться продуктом поглощения континентальной коры базальтовым расплавом, представляет собой продукт частичного плавления мантийного вещества; г) трудности, связанные с объяснением происхождения океанов, включая отличие их коры от континентальной. Фиксизм десятилетиями применялся в геологии XX века, но к настоящему времени сменился плейттектоникой.

Ротационная геодинамическая модель связана с вращением Земли. Влияния этого фактора на ее геодинамику были отмечены еще в прошлом веке. Однако первое время считали, что силы, вызванные вращением, не столь значительны и не могут влиять, например, на движение континентов. Тем не менее позднее о необходимости учета ротационных сил высказывались некоторые геологи и геофизики (В. Е. Хаин, Ю. М. Пущаровский и др.). Новая ротационная модель предложена в 70-х годах прошлого столетия. Так, О. А. Мельников [2001, 2004] считает, что ротационный режим Земли является главной причиной основных процессов в ее геосферах. Согласно его модели, выделяется пять геодинамических механизмов: ротогенез, дрейфогенез, активный и пассивный рифтогенез, сепаратогенез или геосферогенез. Причинами ротогенеза, то есть более быстрого вращения с запада на восток внутренних оболочек (геосфер) относительно внешних геосфер с проскальзыванием на границах между ними, «являются» внешние гравитационное и электромагнитные поля, воздействующие на Землю и прежде всего на внутреннее твердое железоникелевое ядро, подобно якору электромотора, реагирующего на эти поля. Именно этим и только этим, скорее всего, и объясняется более быстрое вращение с

запада на восток твердого ядра Земли относительно остальной ее части» [Мельников, 2007, с. 14]. Последнее (до 1–3° в год) было инструментально измерено американскими сейсмологами в 1996 году [Yong, Richards, 1996].

Таким образом, можно констатировать, что в геологии существовало немало гипотез, объясняющих тектонические движения в земной коре, мантии и планеты в целом. Некоторые из них и в настоящее время не утратили своего значения и хорошо объясняют ряд явлений. Однако наиболее распространенной, объединяющей многие геологические процессы в литосфере и коре Земли является сейчас концепция тектоники литосферных плит (плейттектоника).

Новая глобальная тектоника

Ее появление «было предвосхищено рядом выдающихся исследователей, геологов и геофизиков, сначала О. Ампером в 1907 г., затем Э. Краусом и Ф. Венинг-Мейнесом и, наконец, А. Холмсом в 1929 г.» [Хаин, 2003, с. 278]. Они предположили, что перемещение масс вызывается тепловой конвекцией в мантии. Эта гипотеза основана на идее спрединга в срединно-океанических хребтах, субдукции, горизонтальном движении плит. С 60-х годов XX века стали появляться данные, ставшие основой концепции новой глобальной тектоники, доминирующей в мире [Новая глобальная..., 1974]. Она называется мобилистской, потому что предполагает горизонтальные перемещения на большие расстояния (тысячи километров) крупных геологических масс – литосферных плит. Будучи по сути мобилистской гипотезой, предполагающей большие движения по горизонтали, а не по вертикали, как при фиксистской гипотезе, основанной на вертикальных движениях, она, естественно, в чем-то подобна гипотезе дрейфа континентов Вегенера. В концепции глобальной тектоники в отличие от гипотезы Вегенера движутся не континенты, а океанические литосферные плиты. Выделение плит происходит на основе анализа областей концентрации землетрясений. В разные годы у разных авторов число выделяемых плит было отлично. Дадим классическую классификацию, приведенную в работе В. Е. Хаина и А. Е. Михайлова [1985]. Согласно ей, выделяется семь основных плит: первая – Северо-Американская, вторая – Южно-Американская, третья – Евро-Азиатская, четвертая – Африканская, пятая – Индийско-Австралийская, шестая – Тихоокеанская и седьмая – Антарктическая. Кроме того, выделяется еще тринадцать малых плит (рис. 3.1).

Наиболее принятый вариант границ литосферных плит представлен на рис. 3.2.

Все катаклизмы, выражающиеся в землетрясениях и извержениях вулканов, проходят по границам этих плит. Например, на Курилах и Камчатке высокая *тектоническая активность, сейсмичность и вулканизм* объясняются наличием здесь зон коллизий и сочленения больших плит и Охотской микроплиты, а на Сахалине – прохождением западной границы Охотской плиты через остров.

Ранее, когда мы рассматривали глубинное строение Земли, отмечали, что под земной корой и верхней мантией на глубинах 50–150 и 250–350 км выде-

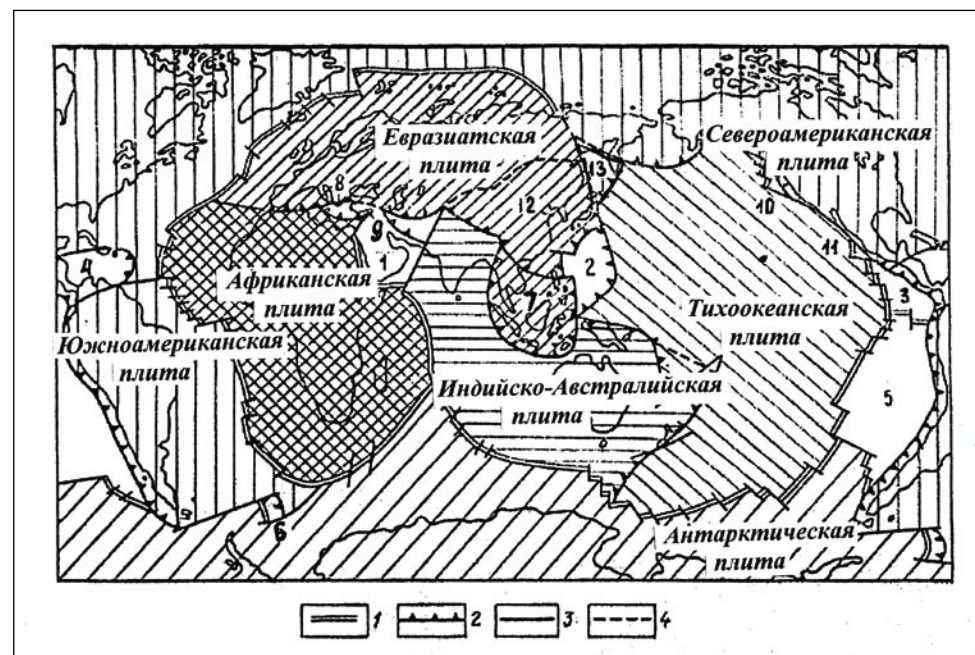


Рис. 3.1. Литосферные плиты Земли [Хаин, Михайлов, 1985]; 1–3 – границы плит: 1 – оси спрединга (раздвига) литосферы; 2 – зоны субдукции (погружения) литосферы; 3 – скольжение (трансформные разломы); 4 – условные границы. Малые плиты и микроплиты: 1 – Аравийская, 2 – Филиппинская, 3 – Кокосовая, 4 – Карибская, 5 – Наска, 6 – Южно-Сандвичева, 7 – Индокитайская, 8 – Эгейская, 9 – Анатолийская, 10 – Хуан-де-Фука, 11 – Китайская, 12 – Охотская.

ляется астеносферный слой частично расплавленных пород с пониженной вязкостью, повышенной теплопроводностью и пониженными скоростями сейсмических волн [Злобин, 2008]. Астеносфера подстилает литосферные плиты, что, как считают многие исследователи, и позволяет плитам двигаться. Таким образом, если по латерали плиты ограничены зонами концентрации землетрясений (глубинные разломы), то их нижней границей является кровля частично расплавленного вещества астеносферы.

При рассмотрении далее тектоники плит необходимо определить, что послужило механизмом движения плит. Обратимся к открытию 1961–1962 годов Г. Г. Хесса и Р. С. Дитца, предложивших гипотезу спрединга (расширения дна океана). Занимаясь изучением палеомагнитных данных и происхождением океанов, они пришли к следующей идее: формирование последних произошло в результате *раздвига континентов* путем расширения *рифтов*, приуроченных к осям срединно-океанических хребтов, и зарождения новой океанической коры. Срединно-океанические хребты и связанные с ними рифтовые долины и трансформные разломы изучались в Атлантике и других океанах. Подтверждение это гипотеза нашла в работе Ф. Вайна и



Рис. 3.2. Границы литосферных плит в зоне перехода от Евразии к Тихому океану.

Д. Мэтьюза [Новая глобальная..., 1974]. Полосовые аномалии параллельны осям срединно-океанических хребтов, где океаническая кора *при остывании намагничивается попеременно* в прямом и обратном магнитном полю направлении. А затем с этими «метками» перемещается наподобие ленты конвейера в обе стороны к периферии океана (рис. 3.3).

При раздвиге в рифте образуется зияние, заполняемое базальтовым расплавом, поднявшимся из астеносферы, который, охлаждаясь, застывает в магнитном поле соответствующей эпохи. Раздвиг продолжается, поэтому пачка базальтов оказывается разорванной надвое. Возникшая трещина снова заполняется базальтом, который *намагничивается теперь в обратном направлении*, если за это время произошла инверсия магнитного поля. Затем и эта пачка базальта тоже испытывает разрыв и раздвиг, и процесс многократно повторяется, создавая серию линейных магнитных аномалий по обе стороны оси срединно-океанического хребта, которые, как метки на конвейере, удаляются от него. Зная возраст аномалий (Δt) и расстояние от них до оси хребта (Δs) [Срединно-Атлантического], можно определить среднюю скорость (v) раздвига дна Атлантики ($v = \Delta s / \Delta t$). Она оказалась порядка 2 см/год.

Интересно заметить, что рассчитанное таким образом время начала спрединга совпало с предсказаниями А. Вегенера, основанными на определении времени появления существенных различий в континентальной наземной фауне и флоре по обе стороны Атлантики.

В 1967 году группа сотрудников Ламонтской геофизической обсерватории в США на основе данных по полосовым аномалиям, полученных в Атлантическом и Индийском океанах, построила *шкалу инверсий* магнитного поля для последних 80 млн. лет. В дальнейшем эта шкала была распространена до 160 млн. лет, проверена на естественных разрезах северной Италии и получила блестящее подтверждение.

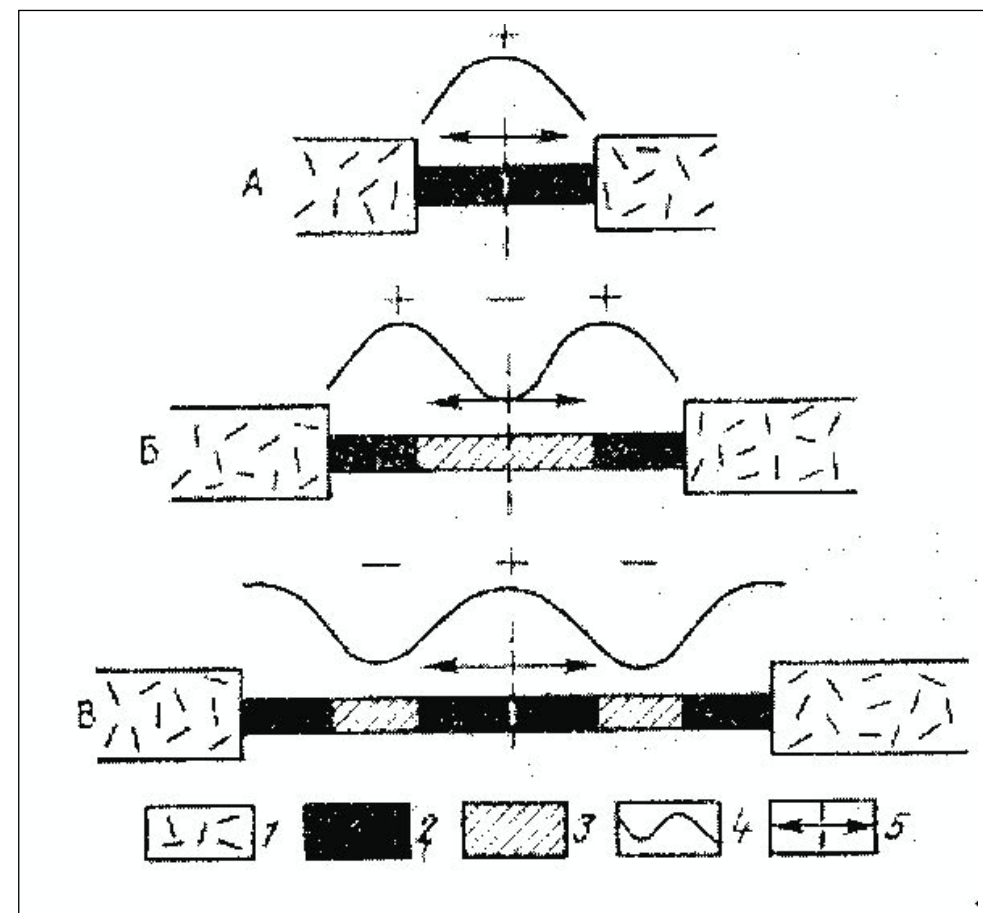


Рис. 3.3. Схема, поясняющая образование знакопеременных линейных магнитных аномалий океана по гипотезе Вайна — Мэтьюза [Новая глобальная..., 1974]: А—В — последовательные стадии раскрытия рифта и формирования океанической коры; 1 — континентальная кора; 2 — кора, образованная в эпоху нормального магнитного поля; 3 — то же в эпоху обращенного магнитного поля; 4 — кривая магнитных аномалий; 5 — ось спрединга.

В 1965 году канадский геофизик Д. Вильсон выделил *трансформные разломы*, пересекающие срединно-океанические хребты и смещающие их рифтовые долины, а также полосовые магнитные аномалии. Он показал, что возраст вулканических островов удревняется к периферии океанов.

Значительный вклад в плейттектонику внесла сейсмология, которая теперь по-новому объясняет природу землетрясений и вулканизма. Сейсмологи научились определять напряжения, порождающие смещения в очаговых зонах землетрясений (сжатие, растяжение или сдвиг), а также устанавливать их ориентацию [Балакина, 1981; Ребецкий, 2007 и др.]. Оказалось, что в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов господствуют горизонтальные растяжения, а на периферии океанов – сжатие параллельно наклону СФЗ, вдоль трансформных разломов – сдвиги.

Перемещения плит происходят по строгому закону сферической геометрии, что дает возможность рассчитать их на ЭВМ, зная современное положение плит, положение полюсов раскрытия, направление и скорость перемещения плит. Имея эти данные, можно восстановить положение плит в любой момент времени. Поскольку с увеличением возраста коры и ее расстояния от рифта идет опускание ложа океана, оказывается, что они подчиняются простой математической зависимости (глубина пропорциональна квадратному корню их возраста), и появляется возможность определить палеоглубины океана.

Полагают, что гипотеза спрединга подтверждена материалами глубоководного бурения, поскольку установлено, что возраст пород в кровле второго слоя океанической коры возрастает по мере удаления от срединно-океанического хребта в обе стороны от него – от современного до юрского периода. В каждой точке бурения он, в общем, соответствует предсказанному по магнитостратиграфической шкале.

Наблюдения с подводных лодок подтвердили раздвиговую природу рифтовых долин, а проверка на ЭВМ – сходимость очертаний материков по обе стороны Атлантики, а также Южной Австралии и противолежащей ей части Антарктиды. Движение плит подтвердили повторные лазерные спутниковые и радиоастрономические наблюдения.

Вышеназванные данные убедительно свидетельствуют в пользу гипотезы спрединга, которая стала практически общепринятой и может считаться теорией. Помимо нее и трансформных разломов третьим важнейшим элементом концепции тектоники плит является субдукция (погружение). Для того, чтобы ее определить, необходимо рассмотреть, что же происходит в дальнейшем с нарождающимися плитами в результате поступающего из недр мантийного вещества в срединно-океанических хребтах. Субдукция была и, по мнению многих ученых, в том числе и автора настоящей работы, остается до сегодняшнего дня одним из самых спорных вопросов тектоники плит. Основоположники тектоники плит, решая вопрос, куда же исчезает новообразованное и транспортируемое далее от этой зоны вещество, пришли к выводу, что эти океанические плиты вновь погружаются в мантию в зонах субдукции. Объясняется это тем, что холодный и тяжелый субстрат океанических плит погружается в более теплое и менее плотное вещество верхней мантии (рис. 3.4).

Для проверки этого проведены многочисленные модельные исследо-

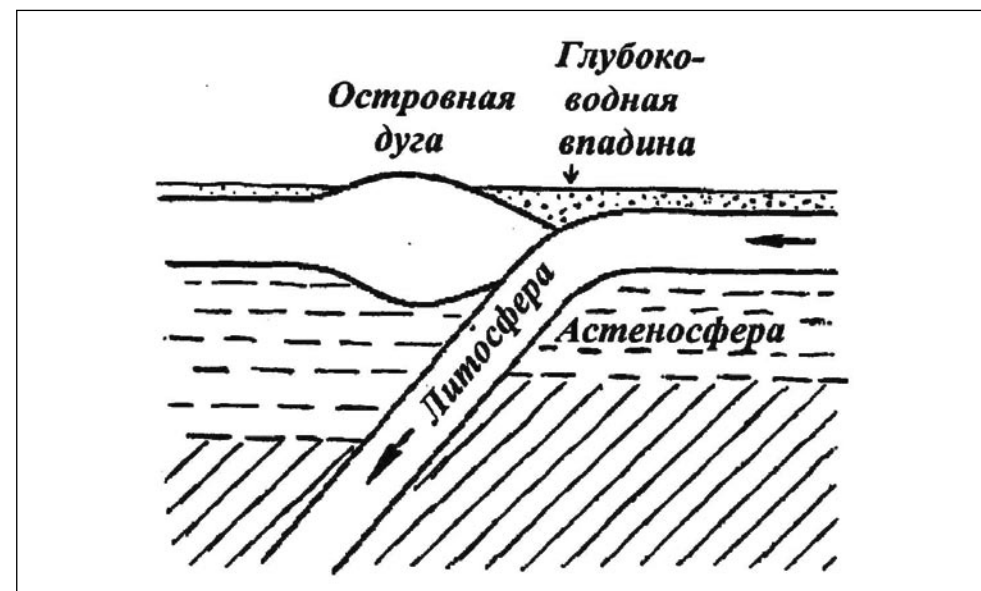


Рис. 3.4. Субдукция – погружение океанической литосферы в мантию вдоль активной окраины континента.

вания, рассмотрены различные физические параметры моделей мантии и погружающихся плит [Chemenda et. al., 1996; Константиновская, 2003]. Несмотря на сомнения в данном механизме некоторых ученых, как считает В. Е. Хаин [2003], он может быть признан. При этом в дальнейшем возможна его доработка. Так, С. Уеда и Е. В. Артюшков вместо механизма типа волочения предложили механизм затягивания литосферных плит (англ. – *pull*) в зоне субдукции вследствие их утяжеления с возрастом, вызванного охлаждением и залечиванием пор новообразованными минералами. Базальт и габбро на глубине около 60 км переходят в эклогит, который тяжелее, чем ультраосновное вещество мантии, что и способствует погружению литосферной плиты (англ. – *slab*) и засасыванию (*suction*) океанической литосферы в зоны субдукции.

Новый механизм, объясняющий перемещение плит от осей спрединга к окраинам океанов, предложил австралийский геофизик Э. Хэйсл. Он заключается в «расталкивании» плит (*ridge push*) в зонах спрединга вследствие более высокого положения оси срединного хребта. Возможно также гравитационное сползание вследствие подъема магмы вдоль оси спрединга и ее внедрение в полость раздвига, как это ранее предполагал Ботт [1991].

Таким образом, основные положения тектоники плит следующие:

- 1) литосфера разделена на ряд относительно жестких плит, разграниченных швами, вдоль которых происходят землетрясения и активный вулканизм;
- 2) смещения плит в океане имеют три вида – *раздвиг* в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, *субдукцию* (погружение) и *смещение* вдоль

трансформных разломов; 3) в масштабе Земли непрерывно происходит *компенсация растяжения* в рифтовых зонах *сжатием* на периферии океанов, субдукцией океанических плит и деформациями в области островных дуг.

Отметим причины движения плит. Согласно последним данным, в общем виде наиболее вероятной причиной движения литосферных плит является тепловая конвекция в мантии Земли [Хаин, 2003], то есть *конвективные течения* в мантии, вызываемые ее разогревом. Конвекция, как известно из физики, это перемещение масс жидкости или газа вследствие разницы температур и плотности. Подробнее о конвекции мы говорили в разделе 2.1.2. Здесь же лишь отметим, что рифты и срединно-океанические хребты располагаются над восходящими ветвями течений, а глубоководные желоба (зоны субдукции) – над нисходящими, образуя конвективные ячейки.

Известно большое многообразие гипотез, теорий, концепций, процессов, сфер их появления. Первые геотектонические гипотезы прошлого, начиная с древних времен до XIX–XX веков, мы рассмотрели выше в разделе 2.1.2.

3.2. Землетрясения

Одним из ярких проявлений динамики недр являются землетрясения и вулканизм. Рассмотрим их некоторые примеры, дадим общее понятие, отметим вопросы, связанные с прогнозом и мерами защиты.

История сохранила печальную память о таких катастрофах, как: Лиссабонское землетрясение (1755, 60 тыс. жертв), Сан-Францисское (1906, 700 чел.), Мессинское (1908, 100–160 тыс. жертв), Токийское (1923, 150 тыс. чел.), Мехико, Мексика (1985, 18 тыс. чел.), Кобе, Япония (1995, более 5 тыс. чел.), Нефтегорск, Россия (1995, 2000 чел.).

В конце XX–начале XXI века произошел ряд катастрофических землетрясений: 10 августа 1999 года в Турции (17 тыс. жертв), 26 января 2001 года в Индии (20 тыс. чел.), 26 декабря 2003 года в Иране (26 тыс. чел.) и, наконец, 26 декабря 2004 года на острове Суматра в Индонезии. При этом в результате катастрофического землетрясения с магнитудой 9,1 возникло мегацунами, приведшее к гибели более 230 тысяч, а по некоторым уточненным данным – 283 тыс. человек. Но этот список может быть продолжен.

На территории бывшего СССР наиболее крупными землетрясениями были следующие: в 1911 году – г. Верный (Алма-Ата), в 1948-м – г. Ашхабад, в 1966-м – г. Ташкент, в 1986-м – г. Кишинев, в 1988 году – г. Спитак и т. д.

В современной России самое разрушительное землетрясение было на северном Сахалине в пос. Нефтегорске 27 (28) мая 1995 года, имевшее магнитуду 7,2 и унесшее более 2000 жизней [Арефьев и др., 1995; Информационно-аналитический ..., 1995; Рогожин, 1995; Злобин, Бобков, 2003]. Оно стерло с лица Земли поселок, и он перестал существовать. Ему предшествовало катастрофическое Шикотанское землетрясение с магнитудой 8,1, происшедшее 4 октября 1994 года на Южных Курилах. Оно также вызвало гибель людей и большие разрушения, приведшие к значительным материальным затратам [Информационно-аналитический..., 2005; Рогожин, 1996]. На Сахалине несколько лет позже 4 (5) августа 2000 года произошло сильное Углегорское (с магнитудой 7,1) и 17 августа 2006 года

Горнозаводское землетрясение с магнитудой 5,6, явившееся форшоком Невельского цунамигенного землетрясения с магнитудой 6.1. Оно произошло 2 августа 2007 года и принесло человеческие жертвы и сильные разрушения на юго-западе Сахалина.

На Камчатке (в юго-западной части Корякского сейсмического пояса) 20 (21) апреля 2006 года произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,6. Его полная энергия оценивается в $1,5 \cdot 10^{15}$ Дж. Макросейсмическому воздействию подверглась территория площадью 400 000 км², на которой образовался сейсморазрыв протяженностью 140 км, вдоль него имели место 10–11-балльные сотрясения [Ландер и др., 2007].

Грандиозными были цунамигенные землетрясения восточнее острова Симушир (на Средних Курилах) с магнитудой 8,3 и 8,1 соответственно, произошедшие 15 ноября 2006 и 13 января 2007 года [Злобин и др., 2008].

Наибольшее число жертв в XX веке повлекли за собой землетрясения в густонаселенных районах Китая. Так, в 1976 году во время Таншаньского землетрясения погибло 650 тыс. человек. После землетрясения 12 мая 2008 года на юго-западе страны в провинции Сычуань погибло более 60 тыс. человек. Отметим, что происшедшее за 400 лет до этого (1556) землетрясение в провинции Шэньси вызвало гибель примерно 830 тыс. человек.

По мнению историков, самое катастрофическое на памяти человечества землетрясение произошло в июле 1201 года на побережье Средиземного моря, когда погибло около 1,1 млн. человек. Согласно данным ООН, за последние 20 лет землетрясения унесли жизни более трех млн. людей. Почти миллиард испытали их тяжелые последствия. По оценке американского сейсмолога Дж. Милна, за последние четыре тыс. лет от землетрясений погибло не менее 13 млн. человек. Отсюда ясно, насколько важную задачу представляет собой изучение землетрясений, разработка мер предупреждения и снижения ущерба от них.

Во время катастрофических землетрясений происходят значительные изменения рельефа местности: некоторые участки суши погружаются ниже уровня океана или озера, как было на Байкале во время землетрясения 1862 года, когда погрузилась под воды озера часть дельты р. Селенга.

При Чилийском землетрясении 29 мая 1960 года прибрежная полоса шириной 20–30 км и протяженностью около 500 км опустилась под воду почти на два метра. (На Сахалине эта полоса по протяженности отвечала бы половине длины всего острова.) Общая площадь, захваченная подземными толчками, превысила площадь Великобритании. Иногда наблюдается поднятие суши или морского дна, как это было, например, во время Аляскинского землетрясения 1964 года, когда морское дно поднялось на 16 м. После вышеназванного Невельского землетрясения 2 августа 2007 года на Южном Сахалине морское дно поднялось на 0,5–1,5 м.

В горах из-за землетрясений происходят оползни и обвалы, нередко громадных размеров. Они подпруживают реки и вызывают образование новых озер (например, Сарезское озеро на Памире, возникшее в 1911 году). Наблюдается сход грязекаменных лавин и образование грязевых потоков (селей). Так, ими было погребено в 1949 году село Хаит в Таджикистане. Как было сказано выше, землетрясения, происходящие под дном океана (в основном Тихого), порождают гигантские волны-цунами, распространя-

ющиеся со скоростью около 1000 км/час. С приближением к побережью их высота иногда достигает 40–50 м, поэтому они способны вызвать большие разрушения и жертвы (см. пятую главу).

3.2.1. Землетрясения: общие понятия

Прежде чем рассматривать такое явление, как землетрясение, необходимо дать ему определение и понятие сейсмичности, поскольку они являются одним из ярких проявлений динамики недр Земли.

Сейсмичность представляет собой проявление землетрясений в пространстве и времени. Она характеризуется распределением землетрясений по площади, повторяемостью землетрясений разной силы во времени, характером разрушений и деформаций и площадью разрушений, а также связью очагов землетрясений с геологическим строением.

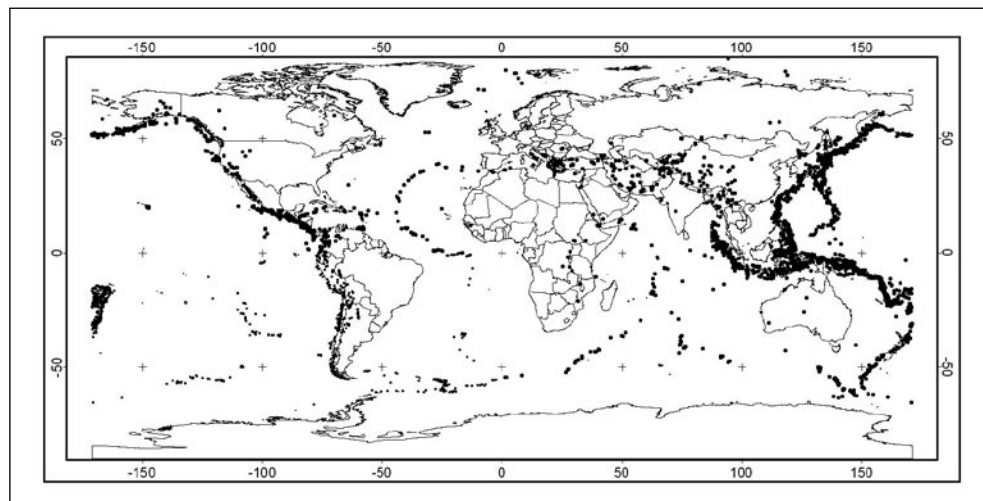


Рис. 3.5. Распределение эпицентров землетрясений земного шара с глубиной от 0 до 700 км и магнитудой $M \geq 6$ за 1977–2007 годы по данным каталога NEIC.

Распределение землетрясений по площади хорошо видно на карте мира, построенной по данным каталога NEIC (National Earthquake Information Center, рис. 3.5). На ней отчетливо выделяются два основных пояса сейсмичности – Тихоокеанский и Альпийско-Гималайский. Первый располагается вдоль горного обрамления впадины Тихого океана, второй протягивается от Азорских островов на западе через Средиземное море, Турцию, Иран, Гималаи до Индонезии и Новой Гвинеи, где смыкается с Тихоокеанским поясом. Кроме того, от него отходят ответвления через Красное море в Африку, через Среднюю Азию к Алтаю, Байкалу и Забайкалью, от Ассам (штат в Индии) в Китай [Друмя, Шебалин, 1985]. Наибольший из сейсмических поясов – Тихоокеанский, поскольку в нем происходит более 80 % всех землетрясений, в том числе почти все глубокофокусные (более 300 км). Значительное их количество происходит в его северо-западной

части, включая Курилы и Камчатку, в настоящее время являющиеся самыми сейсмоактивными областями России. В этой зоне могут быть землетрясения наибольшей величины из возможных на Земле с максимальной сотрясаемостью (интенсивностью) до 12 баллов. Согласно последней карте общего сейсмического районирования северной Евразии, так называемой карте ОСР-97 под ред. В. И. Уломова [Уломов, Шумилина, 1999], Курилы относятся к девяти-, десятибалльной зоне. Очаги землетрясений здесь ориентированы вдоль Курило-Камчатской островной дуги, наиболее мелкофокусные коровые землетрясения приурочены к внутреннему континентальному склону Курило-Камчатского глубоководного желоба.

По глубине землетрясения также распределены в основном в определенной закономерности. Их анализ первыми провели американский сейсмолог Х. Беньоф [Benioff, 1954], советский геолог, академик А. Н. Заварицкий и несколько ранее японский сейсмолог К. Вадати [Wadati, 1927]. Они позволили установить, что землетрясения группируются в определенные сейсмофокальные зоны (СФЗ или зоны Вадати-Заварицкого-Беньофа) – сравнительно узкие (50–100, чаще около 70 км шириной) области, достигающие глубин до 650 км. Так, судя по рис. 3.6, СФЗ падают под Курило-Камчатскую дугу под углом 30–50°. Ее толщина достигает 80 км, глубина погружения – до 650 км [Курильские острова, 2004; Тараканов, 1972, 2008; Федотов и др., 1974; Злобин, 2006]. Это одна из самых глубоких на Земле современных сейсмофокальных зон.

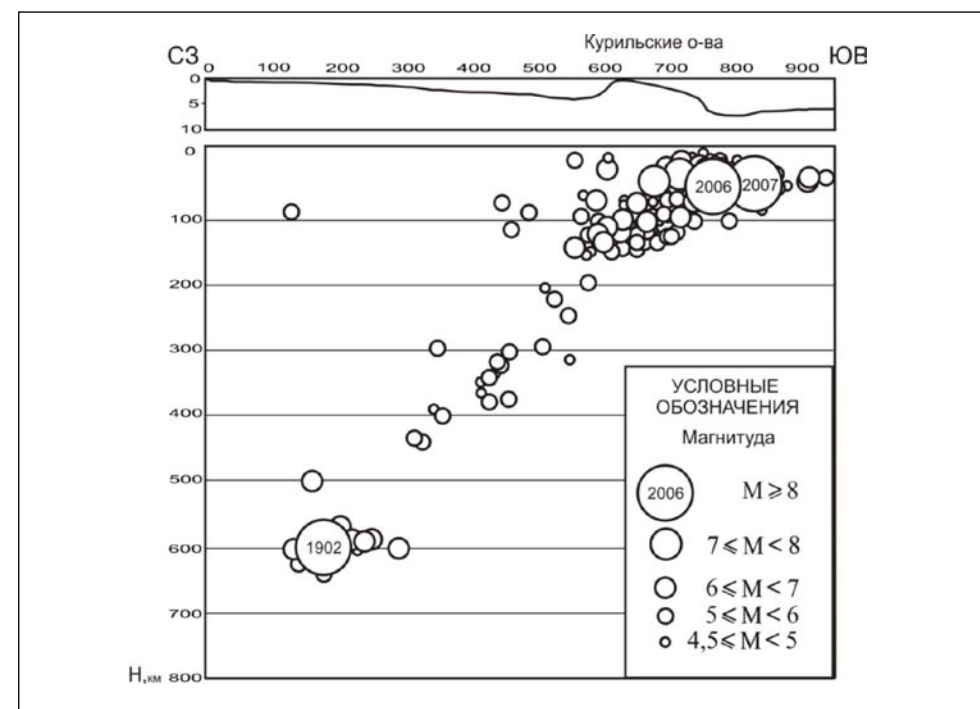


Рис. 3.6. Проекция гипоцентров землетрясений на вертикальную плоскость перпендикулярно Курило-Камчатской островной дуге [Тараканов, 2008].

Землетрясения традиционно разделяют на мелкофокусные с глубиной очага менее 70 км, промежуточные – от 70 до 300 км и глубокофокусные – более 300 км. Свыше 75 % энергии, выделенной при землетрясениях, принадлежит мелкофокусным, в основном коровым землетрясениям, и только 3 % – глубоким, остальное – промежуточным. В целом с глубиной число очагов закономерно сокращается. Кроме того, при общем сокращении числа землетрясений отмечается относительно слабая сейсмическая активность под вулканическими островами с областями активного вулканизма. Это связано с наличием частично расплавленного, пластичного вещества в магматических камерах, где не накапливаются упругие деформации, способные приводить к землетрясениям.

Природа землетрясений и причины их возникновения

Землетрясениями называют приход на поверхность Земли упругих колебаний, вызванных высвобождением потенциальной энергии недр при почти мгновенных *смещениях* масс горных пород в очаговой зоне. В среднем ежегодно на Земле происходит одно катастрофическое землетрясение, около 100 – сильных, разрушительных и около 1 млн. – более слабых, но ощутимых человеком. Их основная причина – поддвиги в зонах активных разломов, которые называют *сейсмогенными (сейсморазрывы)*. Обычно они наследуют более древние разломы земной коры. Примером может являться разлом Сан-Андреас в Калифорнии, возникший не менее 40 млн. лет назад. Вдоль него произошли крупные землетрясения в Сан-Франциско в 1906 году и Лос-Анджелесе в 1957 и 1971 годах, а также ряд меньших по силе землетрясений. Поддвигу предшествуют нарастание напряжений и накопление деформаций в очаге, которое происходит до тех пор, пока не превзойден предел упругости, и наступает смещение (снятие напряжений). После главного толчка разрядка напряжений в очаге продолжается еще некоторое время. Так, после Ташкентского землетрясения 26 апреля 1966 года толчки повторялись в мае, июне и июле. После Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 года повторные толчки продолжались больше года, а их число превысило 1000. Такие повторные толчки, как правило, более слабые, чем главное землетрясение, и называются *афтершоками* (рис. 3.7, 3.8). Кроме того, как показали детальные исследования разлома Сан-Андреас, в промежутках между землетрясениями может наблюдаться медленное смещение почвы (крип).

Представление об очаге землетрясения как о точке на разрыве или линии разрыва является заведомо упрощенным. На самом деле это определенный объем горных пород, подвергнувшихся разрушению, как бы нарезанный на сейсморазрыв. Протяженность последнего варьирует от трех (Ташкентское землетрясение 1966 года) до 47 (Нефтегорск, 1995 год) и даже 270 км при Шикотанском землетрясении 1994 года (Южные Курилы).

Большая часть землетрясений, в том числе и крупные катастрофические, – *тектонические*. Они так или иначе связаны с поддвижками по разрывам, предваряющим подавляющее число землетрясений. Однако известны также землетрясения *вулканические и экзогенные* (поверхностные), связанные с карстовыми явлениями (провалы и обрушения потолка пещер). Не исключены и *техногенные* землетрясения, то есть вызванные

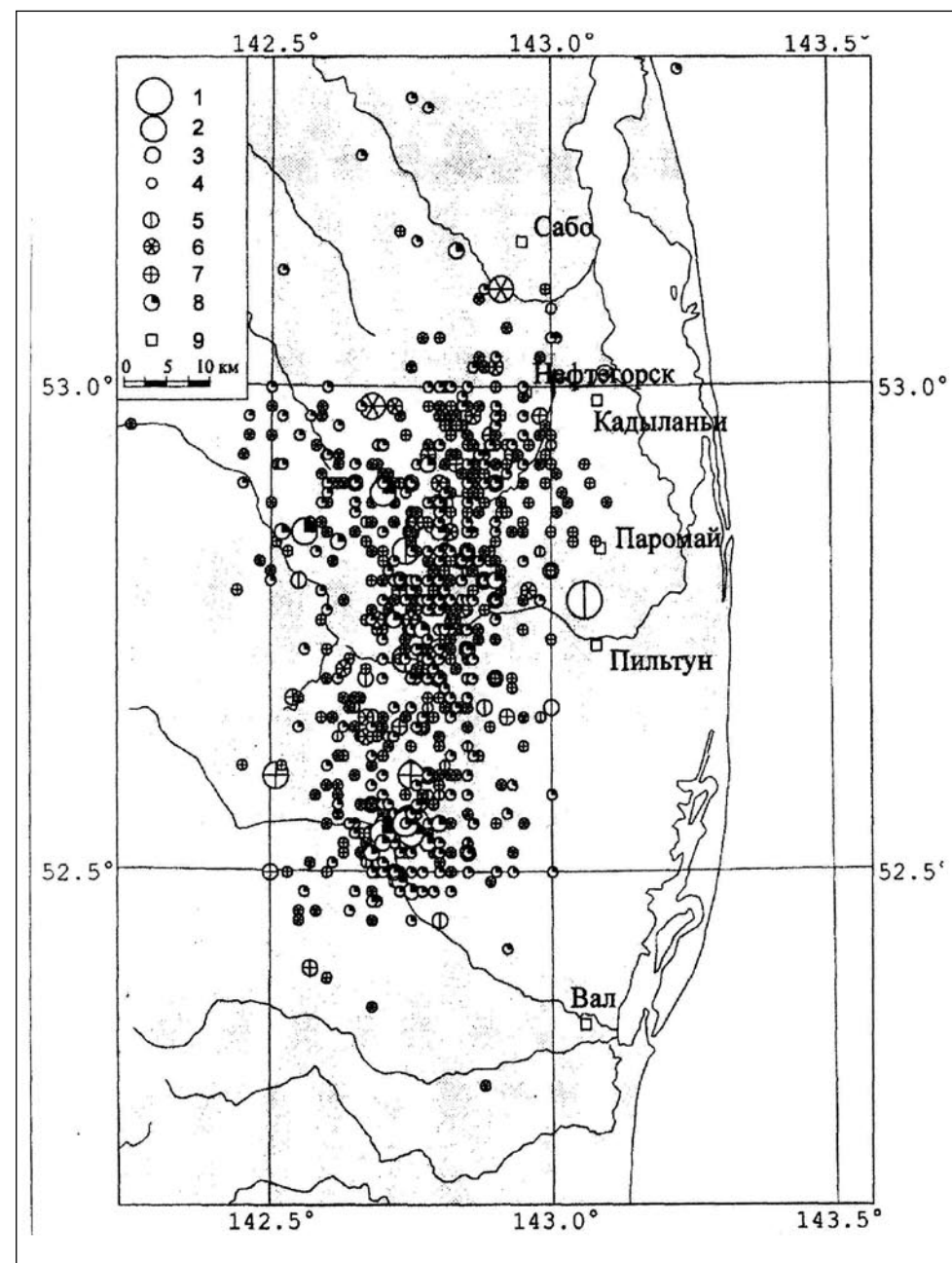


Рис. 3.7. Карта афтершоков Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. [Злобин, 2005]: 1 – $M \geq 5,0$; 2 – $M \geq 4,5$; 3 – $M \geq 4,0$; 4 – $M \leq 4$ (3,2–3,95); 5 – землетрясения 27.05.1995 (день главного землетрясения, время по Гринвичу); 6 – землетрясения с 28 по 31 мая 1995 г.; 7 – землетрясения за июнь 1995 г.; 8 – землетрясения за июль – декабрь 1995 г.; 9 – населенные пункты.

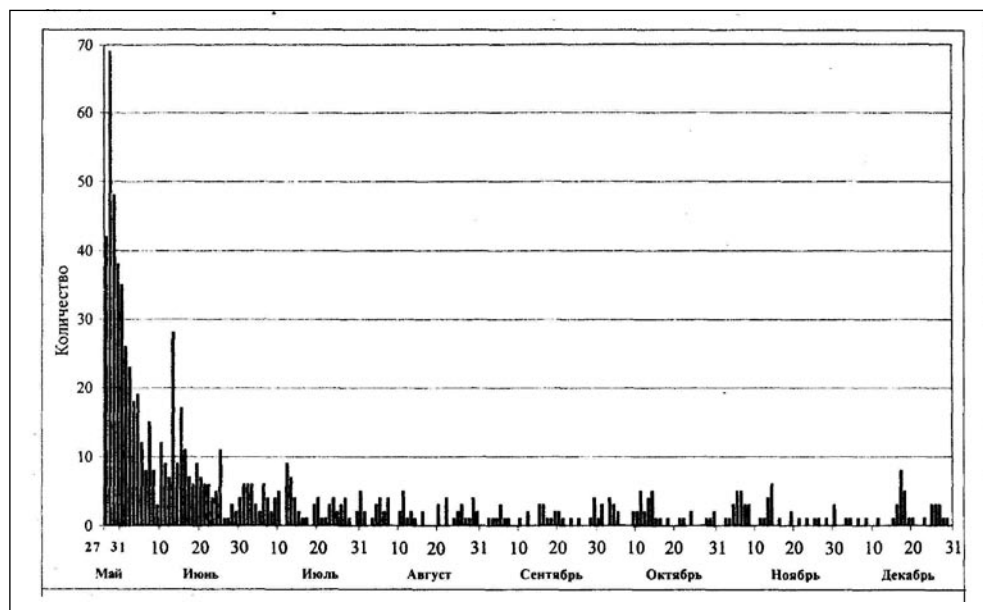


Рис. 3.8. Распределение количества землетрясений в сутки в зависимости от даты – с 27 мая по 31 декабря 1995 г. [Злобин, 2005].

или спровоцированные инженерной деятельностью человека. В основном это создание водохранилищ и закачка воды в скважины, подземные ядерные взрывы и др. Однако это, как правило, вызывает слабые толчки с небольшой площадью воздействия, в то время как площади, на которых ощущаются тектонические землетрясения, достигают сотни тысяч, иногда миллионы квадратных километров. Так, например, сотрясения от тектонических землетрясений в Ассаме (Индия) в 1897 году ощущались на площади два, а в бассейне р. Миссисипи в 1811–1812 годах – пять млн. кв. км.

Вулканические землетрясения обычно слабые, но многочисленные (рои). Они предшествуют извержению вулканов, поскольку связаны с подъемом магмы в подводящем канале вулкана, ее напором и давлением растворенных в магме газов. Появление роя таких толчков дает возможность предсказать вулканические извержения. Так, в 1959 году на Гавайях восточнее кальдерного вулкана Килауэа на глубине 55 км под кратером Ики начались толчки, глубина которых уменьшалась со скоростью 0,6 км/сутки. Перемещение очагов землетрясений ученые связали с движением магмы и подсчитали, что если путь магмы в 55 км поделить на ее скорость 0,6 км/сутки, то через 92 дня магма достигнет поверхности, и надо ожидать извержения. Так и произошло: через 92 дня, 14 ноября 1959 года, число толчков возросло до 1000, магма достигла поверхности Земли, и началось извержение.

П. И. Токаревым на Камчатке были блестяще предсказаны извержения вулканов Плоский Толбачек в 1975 году и Ключевской сопки в 1984 году [Токарев, 1979; Большое..., 1984]. Правда это было сделано по иной методике.

В дальнейшем мы будем оперировать рядом сейсмологических терминов, поэтому напомним их определения: *гипоцентр* – очаг землетрясения, *эпицентр* (фокус) – проекция очага на земную поверхность; *изосейста* – линия равных сотрясений; *плейстосейстовая область* – область максимальных сотрясений (рис. 3.9).

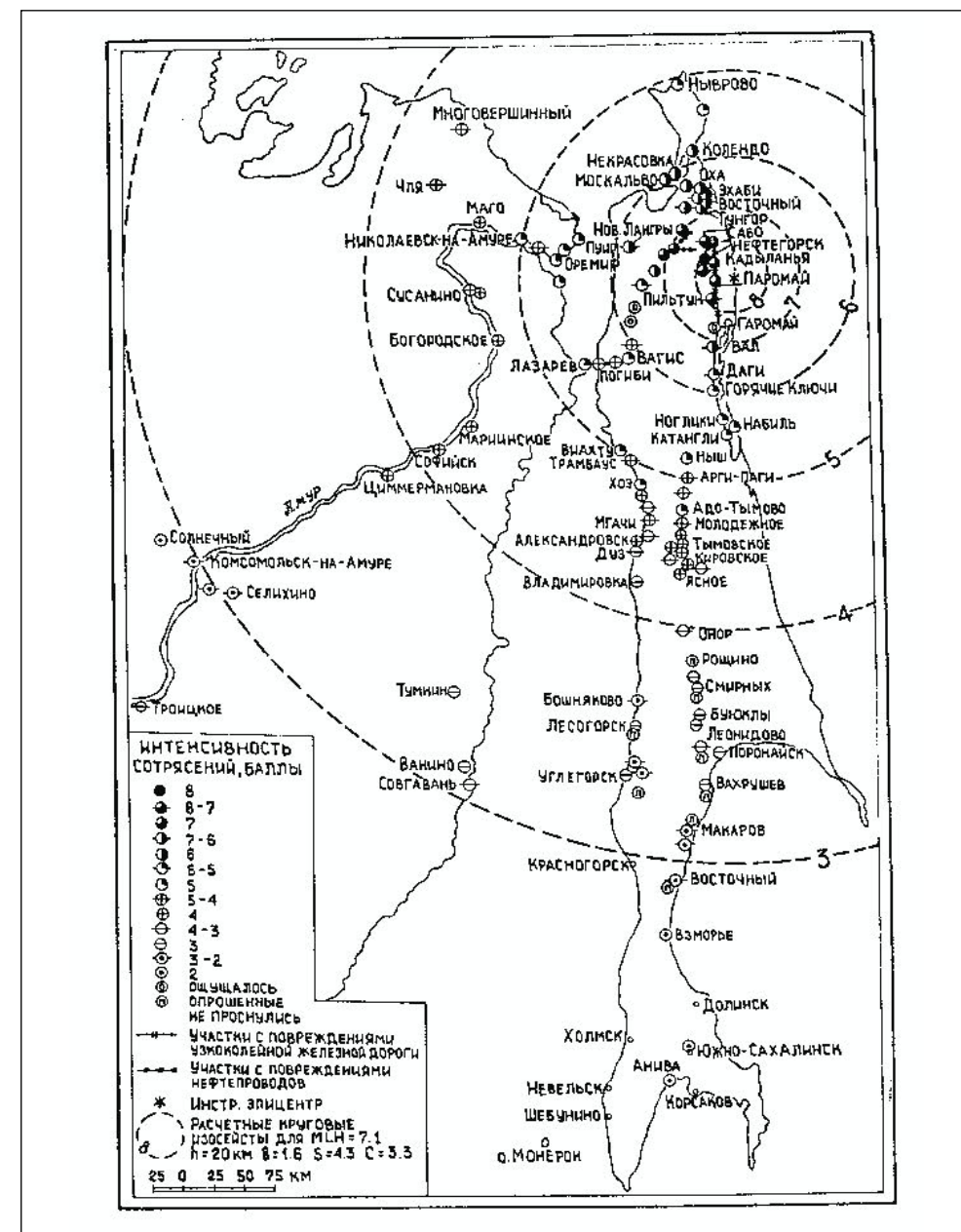


Рис. 3.9. Схема изосейст (пунктир) Нефтегорского землетрясения 27 (28) мая 1995 г. [Информационно-аналитический..., 1995].

Степень сотрясений на поверхности Земли зависит от глубины очага (чем больше глубина, тем слабее сотрясения на поверхности) и силы толчка. Площадь, охваченная сотрясениями, тем больше, чем больше глубина очага и сила толчка в очаге. Колебания почвы в эпицентре направлены преимущественно по вертикали, но по мере удаления от эпицентра возрастает их горизонтальная компонента. Пример сейсмических колебаний с выделением продольных и поперечных волн по разным направлениям: горизонтальным – восток-запад (E) и север-юг (N), а также вертикальным (Z) на разных трассах приведен ниже (рис. 3.10).

Изучение землетрясений острова Сахалин показало, что 80 % из них мелкофокусные и возникают в коре на глубинах 8–10 км. При землетрясениях высвобождается значительное количество энергии, например, при крупных оно $10 \cdot 10^{15-18}$ Дж.

Относительное количество энергии, выделяемое в очаге землетрясения, оценивается по шкале магнитуд, предложенной в 1935 году Ч. Рихтером (см. восьмую главу). Наиболее крупные землетрясения характеризуются магнитудой от 6 до 9,3. Шкала интенсивности (балльности) основана на макросейсмическом описании результатов разрушений в плейстосейстовой области.

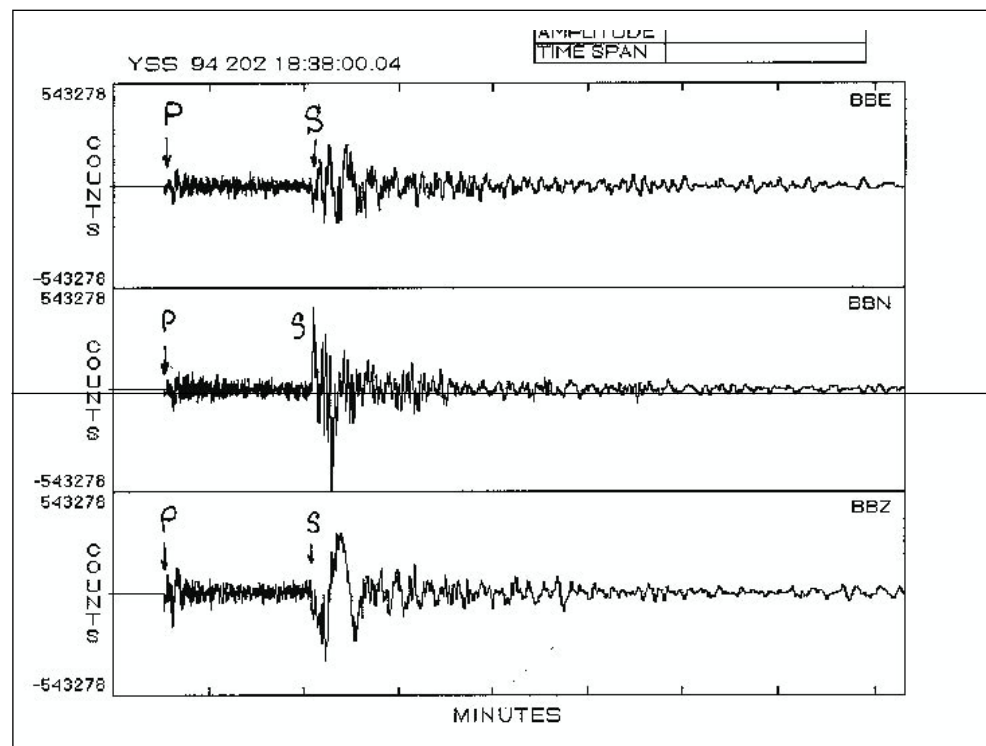


Рис. 3.10. Сейсмограмма землетрясения, записанная сеймостанцией «Айрис-2» в г. Южно-Сахалинске 21 июля 1994 г. в 18 час. 38 мин. 00 сек.: P – вступления продольных волн, S – поперечных [Злобин, 2006].

Совершенно очевидно, что оценка силы землетрясений в магнитудах физически более обоснованна и объективна, чем в баллах сейсмической шкалы. Это связано с тем, что степень разрушения построек – основной критерий этой шкалы – зависит не только от количества выделенной энергии, но и от ряда других факторов, например, глубины очага (чем глубже очаг, тем меньше разрушений), устойчивости грунта, его водонасыщенности, качества построек и т. д.

Очаг землетрясения ассоциируется в основном с активным разломом или так называемым сейсморазрывом. Примером может быть трещина, образовавшаяся после катастрофического Гоби-Алтайского землетрясения 4 декабря 1957 года. Очаг этого землетрясения был огромен, поэтому основная трещина вспарывалась более 1 мин. со скоростью около 4 км/с. Она протянулась на 270 км и достигала глубины 50–80 м. Как пишут А. В. Друмя и Н. В. Шебалин: «Такой очаг не мог уместиться внутри Земли, и главная трещина вышла на поверхность. Горные породы на поверхности Земли вдоль трещины были разорваны, искорежены и смяты. Образовались и гигантские ступени высотой до десяти метров, и открытые провалы, и вздыбленные нагромождения скал. Вблизи основной трещины сила толчка достигала предела – XII баллов» [1985, с. 39].

Но когда сейсморазрыв не выходит на дневную поверхность, также можно определить его природу. Это осуществляется на основе анализа вступления волн сжатия или растяжения. Кроме того, в результате изучения очага землетрясений определяются и другие его параметры.

Отдельно отметим в качестве примера основные особенности самого катастрофического в современной России Нефтегорского землетрясения. Оно произошло 27 мая 1995 года в 13 час. 03 мин. 56 сек. по Гринвичу, или 28 мая 1995 года в 01 час. 03 мин. 56 сек. по сахалинскому времени. Параметры землетрясения, по определениям различных специалистов, первоначально несколько различались, но на основании уточненных вычислений можно назвать следующие данные. Координаты очага были $52^{\circ} 76' \text{ ш.}$, $143^{\circ} 18' \text{ в. д.}$, глубина – около 18 км, магнитуда – 7,6 по шкале Рихтера, интенсивность в эпицентральной зоне – $I_0 = IX-X$ баллов [Старовойт и др., 1995]. При землетрясении образовался разлом – активный правосторонний сдвиг протяженностью 37 км. Видимые смещения по нему составили около шести метров в горизонтальном направлении и до двух метров – в вертикальном. В земной коре разрыв в очаге составил до 80 км. Скорость вспарывания пород в недрах достигала 4,0 км/с, время вспарывания – 13,5 с. Энергия землетрясения равна $2,8 \cdot 10^{22}$ эрг. Макросейсмический эффект выразился в том, что расчетная площадь семибалльных сотрясений составила около 2500 кв. км (рис. 3.9). Оно охватило территорию северного, среднего и частично южного Сахалина, а также восток центральной части Хабаровского края. На поверхности Земли отмечались горизонтальные и вертикальные смещения. Они исследовались вдоль линии сейсморазрыва М. И. Стрельцовым, А. И. Кожуриным и другими [Стрельцов, 2005]. Величина горизонтальных перемещений составила от 1,0–1,5 м по краям разрыва и до 7,0–7,2 м в центральной части (по другим оценкам – от 0,5 до 8 м). Величина вертикальных смещений варьировала от 0,3–0,5 до 2,6 м. Распределение смещений вдоль зоны поверхностных сейсморазрывов Нефтегорского землетрясения представлено на рис. 3.11.

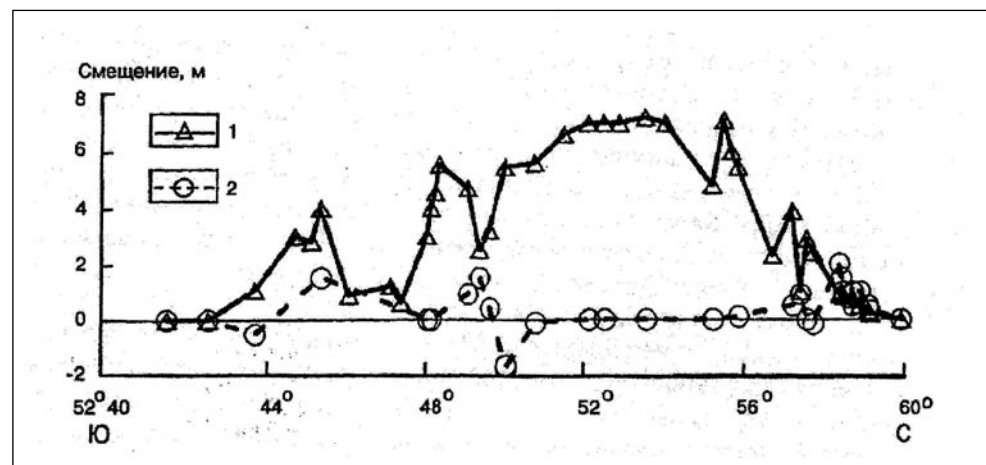


Рис. 3.11. Распределение смещений вдоль зоны поверхностных разрывов Нефтегорского землетрясения [Информационно-аналитический..., 1995]: 1 — горизонтальное смещение; 2 — вертикальное. Положительные значения соответствуют поднятию западного крыла.

Кроме того, Нефтегорское землетрясение сопровождалось следующими явлениями: 1) оживлением 35-километровой части активного Верхне-Пильтунского разлома; 2) повреждением автодороги, насыпи железной дороги Оха–Ноглики; 3) разрывом стыков магистрального нефтепровода Лангери–Погиби; 4) многочисленными трещинами оползневого характера и оползнями; 5) повреждением шоссейных дорог и железнодорожных мостов [Стрельцов, 2005; Информационно-аналитический..., 1995].

3.2.2. Прогноз и предвестники землетрясений

Важнейшее значение для уменьшения бедствий от землетрясений имеет прогноз этого явления и правильное понимание возможности данного заключения. Существуют различные точки зрения на прогноз, от которого зависит принятие адекватных решений и действий. При этом постараемся изложить данный материал насколько возможно доступно и понятно многим, а не только сейсмологам. *Прогноз — это предсказание силы, места и времени землетрясения.* Существуют методы долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного прогноза. *Долгосрочный прогноз* землетрясений основан прежде всего на проведении общего сейсмического районирования (ОСР), осуществляемого по совокупности критериев и признаков: плотности землетрясений, их энергии и интенсивности, геологических и геофизических признаков [Друмя, Шебалин, 1985 и др.], графиков повторяемости, максимальных значений магнитуд (M_{max}), сотрясаемости, сейсмической активности и макросейсмическим данным.

Кроме того, прогноз может основываться на пространственно-временном ходе сейсмичности; изменении соотношения скоростей продольных и поперечных волн V_p/V_s ; деформациях и наклонах земной поверхности;

изменении уровня грунтовых вод; форшоках (то есть сейсмических событиях, предшествующих главному толчку); изменениях электромагнитных полей; геохимических данных по содержанию радона и др.; наблюдениях за животными. Осветим кратко эти методы, поскольку они могут быть полезны как специалистам, так и населению.

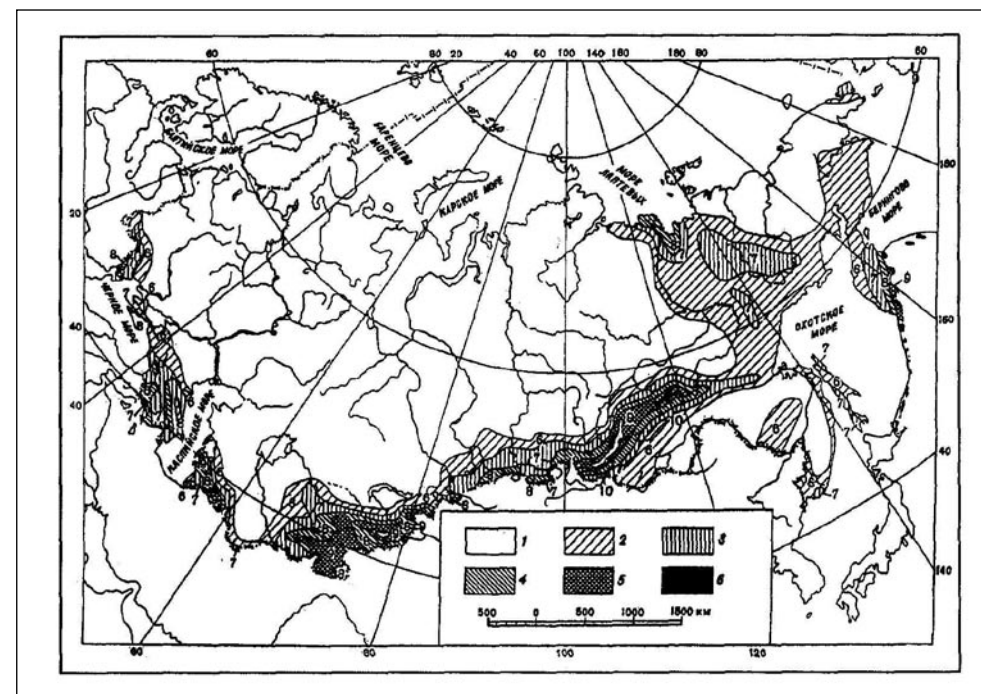


Рис. 3.12. Сейсмическое районирование территории бывшего СССР: 1 — до пяти баллов; 2 — шесть баллов; 3 — семь баллов; 4 — восемь баллов; 5 — девять баллов; 6 — десять баллов [по В. И. Уломову, 1999].

Пространственно-временной ход сейсмичности

Краткая суть в том, что при анализе распространения и проявления сейсмичности устанавливаются области *сейсмического затишья*, то есть некогда бывшие активными. Наиболее известны исследования по выявлению сейсмического цикла и построению на этой основе долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской зоны, выполненные академиком С. А. Федотовым [Сейсмическое..., 1980]. При этом выполнялись исследования сейсмостатистики, группирования, особенностей серий форшоков, спектров, а также связей между землетрясениями с $M > 6$ для камчатских землетрясений. Вся зона разбивалась на 13 участков и для каждой давался прогноз: его расстояние от условной линии отсчета (сейсмофокальной зоны), стадии сейсмического цикла, средние величины сейсмической активности и магнитуда землетрясений, ожидающихся с вероятностью 0,8 и 0,5 и M_{max} . Большое значение

для прогноза имеет информация о поле напряжений в фокальной зоне. Прогноз С. А. Федотова подтверждался хорошо: значения сейсмической активности «А» в шести случаях из семи оказались в пределах прогноза с вероятностью 0,8. Таким образом, первый сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 1965–1970 годы оказался вполне успешным. В дальнейшем долгосрочные сейсмические прогнозы по этой методике также подтверждались (например, катастрофические землетрясения, происшедшие в районе Средних Курил 15 ноября 2006 и 13 января 2007 года).

Аналогичные исследования были проведены советскими сейсмологами на Гармском полигоне в Таджикистане. Было проанализировано и установлено, что сейсмическое поле резко дифференцировано по плотности эпицентров, обнаружены изменения сейсмического фона во времени и его связь с геологическими структурами. Фон сначала растет в течение семи-восьми лет, а затем перед сравнительно сильными землетрясениями отмечается затишье в очаговой зоне будущего землетрясения. За длительный срок наблюдений отмечались также переориентация осей напряжений в очагах слабых форшоков, изменение соотношения энергии высоко- и низкочастотных волн перед землетрясениями.

Изменение соотношения скоростей сейсмических Волн V_p/V_s

Изменение скоростей является важнейшим прогнозным признаком. Первые значимые исследования по использованию изменения скоростей перед землетрясениями были выполнены в СССР, а позже в США. Первый результат был получен И. Л. Нерсесовым с соавторами на Гармском полигоне в Таджикистане еще в начале 60-х годов. После обработки большого статистического материала по 856 землетрясениям Хаитской зоны Гармского района с глубиной очагов 5–30 км и эпицентрными расстояниями 1–75 км V_p и V_p/V_s меняется во времени и пространстве. Величина V_p уменьшается до 12 %, а V_p/V_s – до 6 %.

Дальнейшее изучение показало, что отношение V_p/V_s является функцией координат эпицентра, времени и глубины очага. Поэтому для выявления аномалий были начаты исследования методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) с искусственными взрывами, при которых точно фиксируется место и время взрыва. Впоследствии эта методика применялась для выявления аномалий скорости с целью прогноза землетрясений. Однако следует отметить, что на сегодняшний день этот критерий, так же, как и другие, еще не дает во всех случаях однозначных результатов. Так, в Японии, России и других странах зачастую перед землетрясениями не наблюдаются аномалии скорости. Кроме того, повторные работы ГСЗ требуют полной идентичности применяемой аппаратуры и, главное, условий взрыва, что выполнить очень сложно.

Наблюдения за деформациями и наклонами земной поверхности

Эти исследования, проводимые методами геодезии, наиболее распространены и имеют длительную историю. Многие видные ученые, такие, как Ю. Д. Буланже, В. А. Магницкий, В. А. Тзубокава и др., высказали мнение, что изучение деформаций земной поверхности наряду с изучени-

ем самой сейсмичности является наиболее перспективным направлением прогностических исследований [Методы..., 1984].

Одно из наиболее успешных исследований такого рода выполнено в Японии после землетрясения в Ниигате в 1964 году. В СССР при повторной нивелировке установлена связь смещений реперов на Гармском полигоне с изменением сейсмического фона, что свидетельствует о возрастании скорости деформации. Также была подтверждена известная ранее из зарубежных работ характерная особенность – изменение знака движения поверхности перед сейсмическим толчком. Наблюдения деформографа показали, что по данным одной станции не представляется возможным получить информацию о рассматриваемом предвестнике. Вместе с тем отмечена связь изменений характера деформаций с сильным землетрясением на расстоянии около 100 км.

В США и Японии проводятся детальные наблюдения за деформациями на малых и больших базах при использовании больших групп приборов и при разветвленных системах наблюдений, включающих повторные высокоточные уровенные изменения с помощью лазеров, наблюдений на поверхности Земли и в скважинах. Особое внимание в США уделяют изучению крипа (ползучести) по разлому Сан-Андреас. Получены данные о связи «мягкой» поддвижки по разлому с землетрясением с энергией 10^{11} Дж.

С 1960 года в США начало вызывать беспокойство быстрое поднятие в районе г. Палмдейл, находящегося к северу от Лос-Анджелеса. Ряд американских сейсмологов рассматривали это как симптомы готовящегося землетрясения. В 1981 году Б. Болт в книге «Землетрясения» даже приводит карту поднятий в этом районе. В 1989 и 1991 годах там действительно произошло два разрушительных землетрясения, что подтверждает действенность этого предвестника.

В Японии подтверждены данные прошлых лет об изменении знака деформации перед землетрясением (когда период длительного опускания поверхности сменился кратковременным подъемом). Также подтвердилась и связь времени аномального хода деформации с энергией землетрясения на больших площадях.

Изменения уровня грунтовых вод

Еще в Древнем Китае было замечено, что в ряде случаев перед землетрясениями понижается уровень воды в колодцах. Наблюдения, проводимые за естественными источниками (в основном термальными) в древней Японии с 684 года, то есть более 1300 лет назад, выявили многочисленные факты изменения режима подземных вод перед землетрясениями. Это выражалось в том, что в горячих источниках вода прекращала течь или, наоборот, происходило излияние подземных вод по трещинам. В некоторых случаях из них вырывалось голубое пламя, а в колодцах вода вообще иссякала. Иногда в горячих источниках поток воды увеличивался, и она становилась горячее. Были случаи, когда из трещин фонтанировала грязь, начинали работать грязевые вулканы, а также происходило извержение вулканов (например, известного вулкана Фудзияма в 1707 году, после которого на островах Хонсю, Сикоку и Кюсю произошли землетрясения).

В г. Готи близ Ниигаты за день до землетрясения вода помутнела, появились трещины, из которых извергался песок.

Таким образом, отмечались следующие изменения в естественных источниках и колодцах: 1) увеличение или уменьшение объема излившейся воды, повышение или понижение уровня грунтовых вод; 2) изменение температуры воды; 3) изменение химического состава, цвета, вкуса, запаха или прозрачности воды; 4) прорыв или просачивание природных газов, нефти, вод; 5) фонтанирование воды или песка; 6) образование водоворотов и пузырей; 7) изменение изотопного состава воды.

Следует сказать, что в 1992 году при экспедиционных исследованиях ИМГиГ ДВО РАН (Т. К. Злобин и др.) в Южно-Курильске перед землетрясением также отмечалось изменение уровня и температуры воды в колодцах и дебита скважины № 5 на Горячем Пляже на острове Кунашир. В связи с работами по оценке сейсмovolканоопасности вулкана Менделеева, расположенного близ Южно-Курильска, в упомянутой экспедиции эти и другие признаки (в частности, пространственно-временной ход сейсмичности), а также данные о глубинном строении и геодинамике Южных Курил позволили сделать вывод об активизации тектономагматических процессов. Он подтвердился, поскольку с 8 по 12 января 1993 года, а затем 4 октября 1994 года здесь произошел ряд крупных, в том числе катастрофических, землетрясений.

Заметим, что известный российский сейсмолог В. И. Кейлис-Борок установил, что почти всегда перед сильнейшими землетрясениями в регионе как бы «проигрывается» репетиция будущей трагедии. За год или несколько лет происходят форшоки меньшей интенсивности. Так было перед Хаитским землетрясением 1949 года на Памире, землетрясением в Эгейском море в 1926 году, известным Ассамским землетрясением в 1950 году, на Курилах и в других местах.

Возвращаясь к этому гидродинамическому прогнозному признаку, следует сказать о его применении. Помимо пассивного наблюдения за естественными источниками, в России, Китае, США и других странах осуществляются наблюдения за уровнем воды в скважинах. На Дальнем Востоке такие работы проводил Ф. И. Монахов (СахКНИИ ДВНЦ АН СССР), результаты он доложил еще в мае 1976 года на совещании ЮНЕСКО в Париже. Были предприняты попытки на этой основе предсказания землетрясений.

Аналогичные наблюдения за уровнем воды в скважинах осуществляются Геологической службой США в Калифорнии в 30 милях от Сан-Франциско. Там было пробурено большое число скважин, но на сравнительно небольшой площади. Поэтому результаты американских ученых существенно уступали достижениям в исследовании советских геологов и ученых, проводимом во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО). Можно, видимо, констатировать, что российская методика вышла из стадии экспериментов и способна вести оперативный прогноз землетрясений. Результаты прогноза по этому методу подтверждались на 80 % и более. Работы выполнялись под руководством академика Г. С. Вартаняна и основного исполнителя кандидата геол.-мин. наук Г. Г. Ткаченко, с которым автор

настоящей работы обсуждал проблему прогноза землетрясений и разработки гидрогеодинамических предвестников в 1996 году в Москве.

Следует заметить: несмотря на то, что в Японии, и особенно в Китае, такие наблюдения проводились веками, наши ученые достигли лучших результатов и продвинулись дальше.

Форшоки

Сейсмологические исследования показывают, что на фоне относительного затишья в течение десятилетий или столетий в той или иной области непосредственно перед землетрясением наблюдаются форшоки. Так, японский сейсмолог А. Такаги свидетельствует, что они наблюдаются за 30–40 дней до землетрясения. Однако таких примеров мало, и в каждом районе могут быть свои особенности. Это замечание очень важно, так как свидетельствует о том, что, несмотря на проводимые в этом направлении исследования в различных странах, ученым необходимо изучать сейсмологические условия, тектонику, глубинное строение и геодинамику своего региона. Наблюдение за форшоками дало бы немало для повышения эффективности прогноза землетрясений. Главное – разработать способ, с помощью которого можно отличить форшоки от роя землетрясений или групп не связанных между собой землетрясений. И такие методы были разработаны [Смирнов, 2003]. Необходимо также изучать и публиковать данные о форшоках, в которых указывалось бы на отличие параметров, связывающих магнитуду землетрясений и частоту их проявления с различием форшоков и роев землетрясений. Именно в этом направлении работали в конце прошлого века и сейчас сейсмологи Федерального центра прогнозирования землетрясений Геофизической службы Российской академии наук и другие исследователи. При этом важен поиск предвестников сильных землетрясений, выполняемый, например, сахалинскими учеными на Курилах.

Японский сейсмолог К. Моги [1988] установил, что при однородном строении недр форшоки возникают редко. Чаще они имеют место при неоднородном строении недр, как на Камчатке, Курилах и Сахалине. Однако сведения о форшоках обычно скудные, и определить их параметры сложно. Поэтому для прогноза землетрясений необходимо усовершенствовать систему наблюдения и методы интерпретации слабых землетрясений [Методы..., 1984].

Изменение электрических полей

При режимных наблюдениях за изменением кажущихся удельных электрических сопротивлений на Гармском полигоне было установлено, что в отдельные интервалы времени длительностью два-три месяца наблюдались уменьшения кажущегося сопротивления. Этот эффект объяснялся за счет уменьшения прочности пород благодаря принесению флюида и росту порового давления на глубине.

На Камчатке в районе протяженностью около 500 км с 1967 года ведутся наблюдения электротеллурическим методом [Соболев, Морозов, 1974]. С помощью него обнаружены изменения уровня электротеллурических аномалий, которые имели бухтообразную форму и начинались от

трех до семнадцати суток до землетрясения с амплитудой $M > 5$. При этом более сильным землетрясениям сопутствуют более продолжительные аномалии. Заметим, что изменения электромагнитного поля и соответствующий эффект наблюдались в Японии перед Нефтегорским землетрясением 1995 года. Кроме того, обнаружены закономерная ориентировка векторов поля электротеллурических аномалий и пространственная связь места проявления аномалий с эпицентрами землетрясений. Однако в целом корреляция времени землетрясений и проявления аномалий сложная в связи с высокой сейсмической активностью региона и неполной ясностью природы эффекта.

Поиски предвестников по изменениям естественных электрических и магнитных полей проводятся и в других странах (Япония, США, Китай). Причем первая в мире попытка исследования электромагнитных явлений, связанных с землетрясениями, была предпринята в Японии Дз. Сиды еще в 1886 году [Методы..., 1984]. Поиски предвестников по изменениям естественных электрических и магнитных полей проводятся в США на разломе Сан-Андреас. Однако значимых изменений в этих наблюдениях перед землетрясениями не обнаружено. Как пишет японский ученый Х. Мидзутани в книге «Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии»: «Наблюдение и изучение электромагнитных явлений имеют долгую историю, но успехи в данной области были весьма скромные. Эти исследования не помогли изучению механизма возникновения землетрясений и не сыграли сколь-нибудь важной роли в их прогнозе» [1984, с. 225].

Геохимические исследования

Геохимические исследования могут только качественно оценить возможность приближения землетрясения. Речь идет о мониторинге ряда химических элементов, исходящих из недр в виде газа или растворенных в воде. На Курилах такие работы были предприняты Л. Н. Божковой под руководством доктора геол.- мин. наук, профессора Е. К. Мархинина из Института вулканологии ДВНЦ АН СССР, когда в течение нескольких лет проводились наблюдения за химическим составом грунтовых вод и фумарол вулкана Менделеева на острове Кунашир. Но по техническим и иным причинам они не дали положительных результатов и были прекращены.

В СССР, Японии и Китае в основном занимались изучением радона. В Китае первые данные были получены в 1969-м, в Японии – в 1973 году. Первые результативные работы в мире были начаты в СССР в 1956 году под Ташкентом за десять лет до известного катастрофического землетрясения. Это позволило установить, что перед ним содержание радона увеличилось втрое. Отчасти это было обусловлено тем, что гипоцентр Ташкентского землетрясения находился неглубоко (~8 км), а скважина, где проводились наблюдения, была глубиной два километра и находилась над гипоцентром. После этого открытия узбекских ученых Институтами сейсмологии Узбекистана и Таджикистана были начаты планомерные исследования в этом направлении. Профессор А. И. Султанходжаев в 1978 году при посещении Японии сообщил о возможности прогноза времени землетрясения по радону.

Помимо радона исследовались другие газы, химический и изотопный состав грунтовых вод, температура и напор воды, гидрологические параметры. Наибольший интерес при этом представляет изучение гелия, точнее, соотношение его изотопов. При этом земная кора и верхняя мантия в 100 раз отличаются по его содержанию. В мантии оно выше, и поэтому при наличии активных глубинных разломов, с которыми связаны землетрясения, гелиевая съемка очень эффективна для прогноза. Однако и здесь есть определенные сложности. Как пишет известный американский сейсмолог Б. Болт [1981], в настоящее время таких данных собрано еще очень мало.

В сейсмических областях не только радон и гелий мигрируют по трещинам в периоды сейсмической активности. Так, Д. Г. Осик во время Дагестанского землетрясения 1970 года изучал также миграцию углеводородов и углекислоты. Как пишет Н. И. Николаев [1988], было установлено, что изменение уровня и дебита вод, нефти и газов в источниках и скважинах наблюдается далеко за пределами эпицентральной зоны землетрясения на расстоянии 100 км и более.

Наблюдения за поведением животных

Ценную информацию о приближающемся землетрясении могут дать наблюдения за необычным поведением животных. Первая конференция по этой проблеме была созвана в США еще в 1976 году. Ее участники единодушно пришли к заключению, что животные действительно ощущают нечто такое, что недоступно человеку, и тем самым могут предупредить о землетрясении. Однако ученые так и не пришли к согласию о том, что же, собственно говоря, воспринимают животные. Может быть, с помощью органов слуха они слышат подземные шумы или улавливают ультразвуковые сигналы перед землетрясением, либо организм животных реагирует на незначительные изменения атмосферного давления или вариации магнитного поля. Возможно, как считают советские ученые, причиной беспокойства животных являются аномалии электромагнитного поля перед надвигающейся катастрофой. Известен пример, когда перед землетрясением во Фриули (Италия) стада оленей подходили к населенным пунктам, а кошки в то же время покинули селения и перетаскивали с собой котят в луга. Вечером перед толчком были слышны необычные крики птиц, которые в клетках начинали летать, а животные в хлевах впадали в панику.

Интересный факт был отмечен перед Нефтегорским землетрясением 1995 года на Сахалине: ночью непосредственно перед первым толчком из многоэтажных домов вдруг побежали крысы.

Существует мнение, что необычное поведение животных объясняется атмосферным электричеством. Напряжение увеличивается из-за того, что аэрозольные частицы ионизируются и тем самым заряжаются электричеством перед толчком. По мнению ученых, нет сомнения, что животные могут предсказывать землетрясения. Поэтому в ряде стран, в том числе Японии, в зоопарках создаются специальные уголки животных-предсказателей, за которыми ведутся специальные наблюдения. Они начаты и в сейсмоактивной зоне разлома Сан-Андреас в США.

Представляется, что это один из немногих признаков, который может быть использован практически каждым человеком. Надо обращать внимание на необычное поведение животных, поскольку это может спасти жизни людей.

Если же попытаться осветить вопрос подробнее, то необходимо заметить, что проблеме прогноза землетрясений посвящено большое количество (многие сотни) работ, в том числе и такие известные монографии, как «Предсказание землетрясений» Т. Рикитаке [1979], «Предсказание землетрясений» К. Моги [1988], «Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии» [1984], «Предвестники землетрясений» А. Я. Сидорина [1992], «Основы прогноза землетрясений» Г. А. Соболева [1993] и многие др. Наиболее важное значение имеют *среднесрочный и краткосрочный прогнозы*, методика которых частично освещена в упомянутых работах, а также сводке И. Н. Тихонова [2006]. Кратко назовем лишь некоторые из них. Это методика и алгоритм DSH-прогнозирования сильных коровых событий по механизму глубокофокусных землетрясений; алгоритм NNM для оценки возможности активизации очаговых зон с возникновением землетрясений заданного порогового уровня; СМТ-алгоритм для изучения особенностей кинематики подвижек в очагах коровых землетрясений; анализ волновых форм землетрясений с целью выявления форшоков и др. В Институте физики Земли РАН в последние годы созданы методы среднесрочного прогноза землетрясений на основе комплексного использования прогностических методик (методы расчета карт ожидаемых землетрясений КОЗ и RTL), основанных на изучении вариаций слабой сейсмичности. По этим методикам, в частности, были спрогнозированы землетрясения с магнитудой 7,8, произошедшее 5 декабря 1976 года на Камчатке, и в Греции 18 ноября 1997 года с магнитудой 6,6.

Отметим также метод среднесрочного прогноза М8. С его помощью в ходе российско-американского эксперимента в 1992 году были получены предвестники происшедшего впоследствии 4 октября 1994 года землетрясения с магнитудой $M=8,1$ в районе острова Шикотан [Кособоков и др., 1994]. Результаты расчетов подтверждены в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН по данным локальной сети Сахалинского филиала Геофизической службы РАН. Заметим, что дополнительный анализ сейсмичности в диапазоне малых магнитуд с помощью алгоритма «Сценарий Мендосино» позволяет сократить область прогноза землетрясения [Кособоков и др., 1994].

Среди методов краткосрочного прогноза сильных сейсмических событий можно назвать метод Б. Войта, способ Д. Варнеса, а также методы саморазвивающихся процессов, картирования сейсмической активности по плотности потока событий (И. Н. Тихонов) и метод обратного прослеживания предвестников (ОПП). С помощью другого метода (ZMAP-метода сейсмического затишья) в 2006 году И. Н. Тихоновым был дан успешный прогноз Невельского землетрясения с $M=6,2$ на юго-западном шельфе Сахалине [Тихонов и др., 1997], подтвердившийся 2 августа 2007 года, Такойского землетрясения 2001 года на Южном Сахалине с $M=5,6$, а также в Японии в районе мыса Эримо (о. Хоккайдо) и в районе полуострова Идзу (о. Хонсю), где заблаговременно (01.07.2002 года) им были выявлены

две зоны затишья, прерванные 26 сентября 2003 года землетрясением с $M=8,0$ [Тихонов, 2006].

Таким образом, безусловно, прогресс в разработке методов прогноза землетрясений есть. Надо учитывать, что, во-первых, сейсмология – очень молодая наука. Период инструментальных наблюдений составляет всего около 80 лет, что, конечно, очень мало по сравнению с историей цивилизации. Во-вторых, надо учитывать несопоставимую ни с чем сложность строения недр Земли и глубинных процессов. В связи с этим станет понятным, почему проблема прогноза землетрясений продолжает находиться еще в стадии разработки.

Несмотря на это, заложены основы прогноза, выстраиваются четкая стратегия и методика решения проблемы. Поэтому есть основания полагать, что в ближайшее время будет достигнут существенный прогресс в решении проблемы прогноза землетрясений. Подтверждением тому служат факты их успешного предсказания: 4 февраля 1975 года в г. Хайчен с магнитудой 7,3; 29 мая 1975 года в г. Лонглинг с $M=7,4$; 16 августа 1974 года в г. Сонгнан с $M=7,2$; 7 ноября 1976 года в г. Янджуан с $M=6,7$; 16 мая 1982 года в г. Ганзи с $M=6,0$; 31 мая 1986 года в г. Стоун-Каньон, Калифорния с $M=4,6$, а также землетрясение 2 августа 2007 года близ Невельска на юго-западном шельфе Сахалина с $M=6,2$ и др.

3.2.3. Меры защиты при землетрясениях

Снижение негативных последствий от землетрясений связано с их предотвращением, предсказанием времени, места и магнитуды, мерами защиты (см. ниже).

Предотвращение землетрясений

Предотвратить землетрясение почти невозможно. Но известны случаи, когда это было сделано. Например, в Японии в районе Мацуширо была обнаружена миграция очагов со скоростью 100 км/год в течение ряда лет, которые смещались к югу, приближаясь к поверхности. Было вычислено вероятное местоположение очага следующего землетрясения. В этом месте была пробурена скважина, закачана вода, и толчки прекратились. Этот метод использовался также для снятия нагрузок и напряжений, возникающих при заполнении водой водохранилищ (рой наведенных мелкофокусных землетрясений).

Принятие мер защиты

Меры защиты неоднократно высказывались и обсуждались специалистами [Рихтер, 1963; Болт, 1981; Друмя, Шебалин, 1985; Викулин с соавторами, 1989, 1997 и др.]. Однако зачастую назывались лишь несколько основных повторяющихся рекомендаций. Ниже изложены все наиболее полезные меры защиты. Кроме того, следует учитывать степень сейсмичности территорий, надежность сейсморайонирования и прогноза, удаленность от наиболее вероятных очаговых зон, максимально возможную магнитуду землетрясения, сейсмогеологические условия, глубинное строение и тектонику, положение активных разломов, развитие инфраструктуры и т. д.

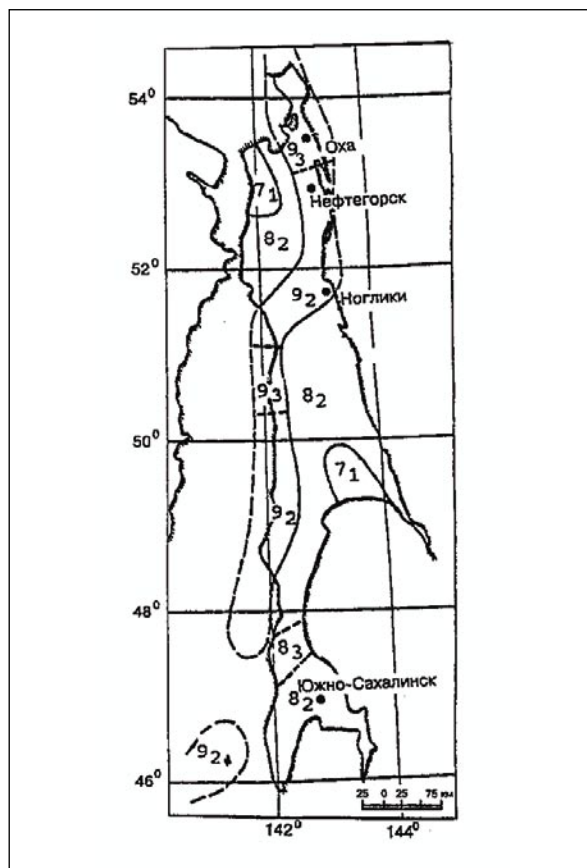


Рис. 3.13. Временная схема районирования Сахалинской области и повторяемость сейсмических воздействий 19-95 г. [Информационно-аналитический..., 1995]. Цифрами (7, 8, 9) обозначена интенсивность сейсмических воздействий (в баллах шкалы MSK-64); индексы 1, 2, 3 внизу у цифр соответствуют средней повторяемости воздействий один раз за 100, 1000 и 10000 лет (или вероятности 0,5; 0,95 и 0,995 не превышая таких воздействий в ближайшие 50 лет). Пунктирными линиями показаны границы зон с различной повторяемостью сейсмических воздействий, на акваториях пунктирной линией очерчены IX-балльные зоны сейсмических воздействий.

Необходимая информация и действия до землетрясения

Действия по уменьшению негативных последствий от землетрясений можно делить на две группы. Первая связана с деятельностью государственных органов, особенно администрации области (края, республики), вторая – с информированностью населения. Что же надо знать для этого? Прежде всего то, что почти на каждой сейсмоопасной территории в России проведено сейсморайонирование и составлены соответствующие карты, позволяющие судить о максимальной силе будущих землетрясений. Эти карты дают возможность строительным организациям возводить здания, способные их выдержать. Несмотря на сложность построения и отдельные досадные пропуски, уже первые карты сейсморайонирования СССР 1957, 1968 и 1978 годов давали представление о сейсмичности той или иной территории, в том числе и Сахалинской области (С. Л. Соловьев, Л. С. Оскорбин и др.). Уточненная временная схема сейсморайонирования Сахалина была построена в 1995 году после Нефтегорского землетрясения (рис. 3.13).

Как видно на рис. 3.13 северо-восточное побережье Сахалина до широты пос. Нефтегорска является зоной девятибалльных сотрясений. Далее на юг эта зона протягивается по западному побережью южнее Углегорска. Ширина полосы (вместе с шельфом) – около 40–50 км. Большая часть территории Сахалина теперь относится к восьмибалльной зоне с небольшими семибалльными участками на крайнем северо-западе и к северу от залива Терпения.

Есть и более детальные карты микросейсморайонирования (МСР), например, для г. Южно-Сахалинска (рис. 3.14). Она позволяет судить более детально об интенсивности сотрясений в той или иной части города.

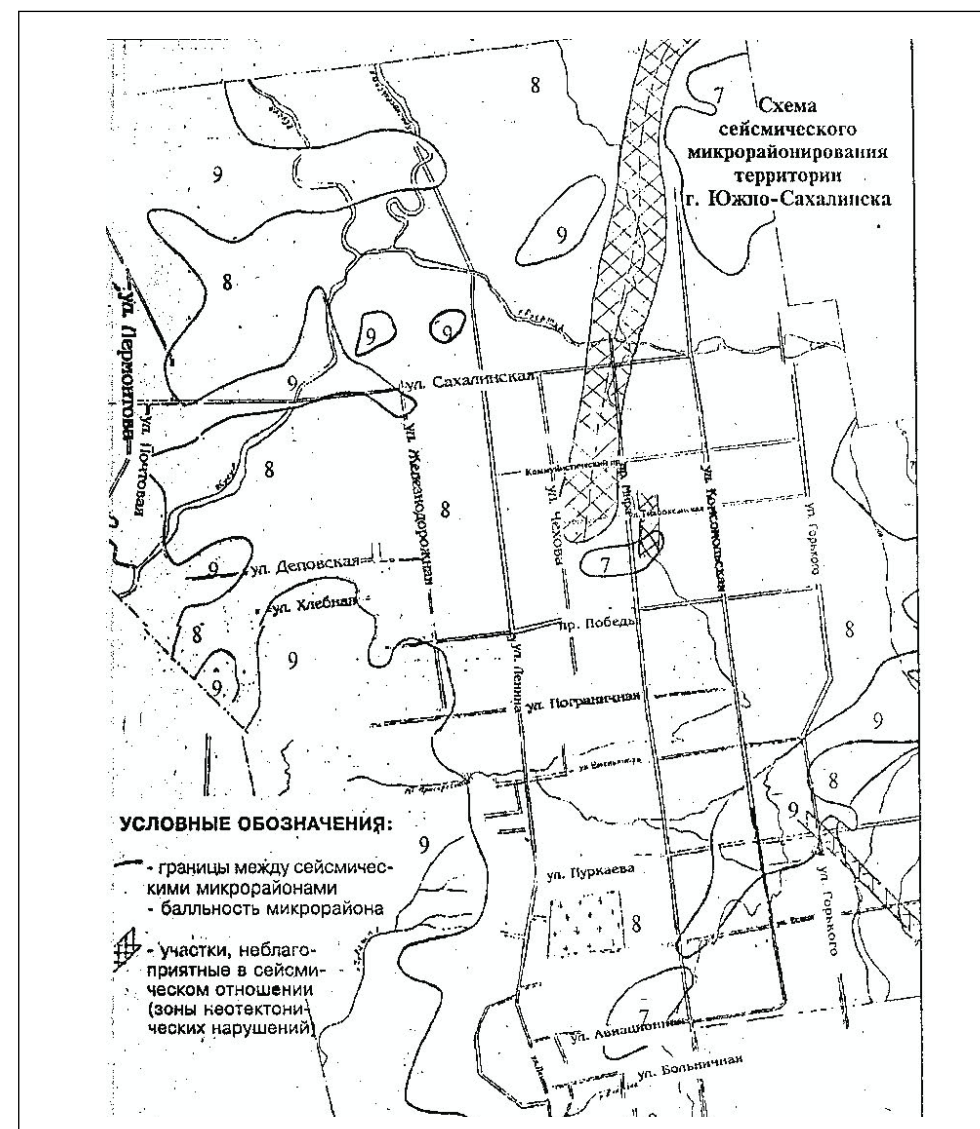


Рис. 3.14. Схема сейсмического микрорайонирования территории Южно-Сахалинска.

Основные факторы, влияющие на величину ущерба

Ущерб от землетрясений зависит от ряда факторов. Среди них: 1) *размер очаговой зоны землетрясения*. Большое землетрясение причинит больше повреждений и ущерба, чем малое в том же месте. Однако даже землетрясение средней силы может нанести больше повреждений и ущерба, если его очаг находится вблизи земной поверхности или залегает неглубоко, чем мощное землетрясение на глубинах сотни километров. 2) *Расстояние от очага землетрясения*. Сила землетрясения уменьшается довольно быстро с расстоянием. Сильное колебание вдоль активных разломов ослабляется наполовину на расстоянии 15 км от очага и 1/16 – на расстоянии в 90–100 км. 3) *Продолжительность колебаний*. Чем больше продолжительность сильных колебаний, тем больше повреждения и ущерб. Так, самое сильное апрельское землетрясение в Калифорнии в 1992 году продолжалось около 12 секунд, а известное землетрясение в Сан-Франциско в 1906 году – 40 секунд. Время вспарывания по разлому при землетрясении 27 мая 1995 года в Нефтегорске составило 13,5 секунды. 4) *Тип почвы*. Рыхлый, обводненный песок усиливает сейсмическое воздействие. Влажные, мягкие грунты способны терять прочность и проседать, что может повлечь обрушение зданий. 5) *Тип здания*. Кроме конструкции, немаловажное значение имеет его фундамент. У некоторых типов зданий он слабый и не выдерживает сейсмических колебаний. Поэтому нередко возводят сейсмостойкий фундамент. Особое значение имеют *активные разломы* как шрамы прошлых землетрясений. Их длина измеряется первыми десятками-сотнями километров. Такие разломы являются наиболее вероятными зонами будущих землетрясений, поэтому нуждаются в изучении. Так, в США был принят специальный акт (Alquist-Priolo Special Study Zones Act), требующий детального изучения (картирования) всех известных активных разломов Калифорнии. Специалистами Геологической службы США выполнены исследования этих зон и их развития (мониторинг подвижек) в пределах полосы шириной 500 футов. Такие же специальные исследования необходимо проводить на активных разломах России.

Зависимость угрозы жизни человека при землетрясении от типа здания

Угроза жизни людей и количество жертв значительно зависят от типа здания. В шкалах MSK-64 и усовершенствованной MMSK-71 последние разделяются на типы А, Б и В. Первые самые ненадежные и подвержены разрушениям (здания из рваного камня, кирпича-сырца, глинобитные дома в основном в горах Кавказа и Средней Азии). Вторые более устойчивы (обычные кирпичные дома, здания крупноблочного типа и из естественного камня). Третьи самые устойчивые (панельные дома, каркасные железобетонные здания и деревянные дома). При Нефтегорском землетрясении многие дачные деревянные дома уцелели. Поэтому при слабых форшоках или предупреждении о возможном землетрясении можно рекомендовать людям некоторое время пожить на даче или в сельской местности в деревянных домах.

Меры, которые необходимо принять до землетрясения

Заранее полезно получить информацию о сейсмостойкости здания в жилищно-эксплуатационных управлениях города или его администрации. В таблице 3.1 представлена шкала интенсивности землетрясений MSK-64 [Друмя, Шебалин, 1985].

Таблица 3.1.

Наиболее типичные признаки интенсивности землетрясений по шкале MSK-64

Интенсивность, балл (MSK-64)	Признаки интенсивности землетрясений
I	Колебания почвы отмечаются приборами
II	Ощущаются в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии, преимущественно на верхних этажах зданий
III	Колебания отмечаются немногими людьми в зданиях, не замечаются вне зданий
IV	Землетрясение отмечается многими людьми в зданиях, похоже на колебания, вызванные тяжелым транспортом; не замечается большинством спящих (просыпаются отдельные лица), не замечается при ходьбе вне помещений; возможно дребезжание стекол
V	Качение висячих предметов, многие спящие просыпаются, ощущается сотрясение здания в целом, не замечают многие при ходьбе вне помещений
VI	Замечается многими людьми, большинство пугаются, выбегают из помещений; трещины в штукатурке, перегородках во многих зданиях
VII	Во многих домах повреждаются трубы, в капитальных стенах возникают тонкие трещины. Замечают многие за рулем движущихся по асфальту автомашин, слышен звон больших колоколов
VIII	Сквозные трещины в капитальных стенах, падение многих дымовых труб
IX	В некоторых зданиях хорошей постройки обвалы, обрушения стен, перекрытий, кровли
X	Обвалы во многих зданиях хорошей постройки. Трещины в грунтах шириной до 1 м
XI	Обвалы подавляющего числа зданий хорошей постройки; повреждение железных дорог, мостов, плотин; многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах

Интенсивность, балл (MSK-64)	Признаки интенсивности землетрясений
XII	Сильное повреждение или разрушение практически всех наземных и подземных сооружений

Для того, чтобы иметь представление о соотношении шкалы интенсивности в баллах MSK-64, магнитуд по шкале Рихтера в баллах и шкалы интенсивности, принятой в Японии, ниже приводим соответствующую таблицу 3.2. Для точного перевода интенсивности в баллах по шкале MSK-64 в магнитуду по шкале Рихтера есть формулы (см. восьмую главу). Эти соотношения в основном соответствуют коровым землетрясениям на глубине примерно 20 км.

Таблица 3.2.

Таблица соотношения шкалы интенсивности MSK-64, магнитуд по шкале Рихтера в баллах и шкалы интенсивности землетрясений, принятой в Японии

Баллы		
Шкала Японии	Шкала Рихтера	Шкала MSK-64
–	–	1
1,1	–	2
1,8	–	3
2,4	4	4
3,1	4,6	5
3,8	5,2	6
4,3	5,8	7
5,7	6,4	8
6,2	7	9
6,9	7,6	10
–	8,2	11
–	8,8	12

Кроме того, отметим количество и тип зданий, получивших повреждения: отдельные – 10 %, многие – около 50 % и большинство – около 75 %. Тогда соответствующая информация может быть представлена в виде табл. 3.3.

Таблица 3.3.

Интенсивность, балл	Тип здания А	Тип здания Б	Тип здания В
V	Отдельные – 1-я,		
VI	Отдельные – 2-я,	Отдельные – 1-я	
	многие – 1-я		
VII	Отдельные – 4-я,	Отдельные – 3-я,	Отдельные – 2-я,
	многие – 3-я	многие – 2-я	многие – 1-я

Интенсивность, балл	Тип здания А	Тип здания Б	Тип здания В
VIII	Отдельные – 5-я,	Отдельные – 4-я,	Отдельные – 3-я,
	многие – 4-я	многие – 3-я	многие – 2-я
IX	Большинство – 5-я	Отдельные – 5-я,	Отдельные – 4-я,
		многие – 4-я	многие – 3-я,
			отдельные – 5-я
X		Многие – 5-я	Многие – 4-я

Примечание: 1–5 – степень повреждения по принятой классификации. А именно: 1-я степень – это легкие повреждения (тонкие трещины в штукатурке и откалывание небольших ее кусков); 2-я степень – умеренные повреждения (небольшие трещины в стенах и т. д.); 3-я степень означает тяжелые повреждения (большие глубокие и сквозные трещины в стенах, падения дымовых труб); 4-я степень – обрушение внутренних стен, частей здания; 5-я степень – полное разрушение здания.

Понятно, что при толчке силой пять баллов еще не опасно, хотя это должно насторожить. Поэтому дадим описание землетрясения данной силы подробнее. Оно ощущается всеми людьми внутри помещений, а под открытым небом – многими. Большая часть спящих просыпаются. Некоторые выбегают из помещений. Животные беспокоятся. Сотрясение зданий в целом. Висячие предметы сильно качаются. Картины сдвигаются с мест. 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. Возможны повреждения первой степени в отдельных зданиях типа А. В некоторых случаях меняется дебит источников.

На Сахалине, Курилах и Камчатке сильное разрушительное землетрясение в восемь-девять баллов, скорее всего, будет иметь продолжительность до одной минуты, изредка до трех. *В этих регионах можно ожидать, что с пяти-шести баллов до максимальных колебаний пройдет всего 15–20 сек. Причем колебания будут нарастать почти мгновенно, создавая ощущение нового толчка.* Связано это с приходом сначала продольных, а затем поперечных волн из очага землетрясения, которые и представляют главную опасность для зданий. Вполне понятно, что заранее все предусмотреть нельзя, но можно говорить о наиболее вероятном развитии событий и в соответствии с этим составить основной план действий. Конечно, он не может быть применен во всех случаях, но руководством к действиям может являться. Возможно и его изменение под действием непредвиденных обстоятельств, но, главное, чтобы вы не пребывали в растерянности и не теряли драгоценные секунды. Поэтому изложенные рекомендации и полученные знания помогут вам действовать быстро и правильно.

Когда первые сейсмические колебания достигнут здания и оно начнет раскачиваться, необходимо немедленно в течение 15–20 секунд покинуть его, воспользовавшись по возможности окнами первого этажа. К сожалению, в настоящее время на многих из них установлены решетки. Крепкие здания с сейсмостойким фундаментом можно и не покидать.

Кроме того, важно определить заранее **наиболее безопасные места здания**, а именно: проемы капитальных внутренних стен, входные двери, углы, образованные капитальными внутренними стенами, места вдоль капитальных стен, колонн и под балками каркаса. Это необходимо знать вам, членам вашей семьи и коллегам по работе.

Также нужно знать и **наиболее опасные** места: большие застекленные проемы наружных и внутренних стен, угловые комнаты, особенно последних этажей, лифты и лестничные проемы – они складываются первыми(!), карнизы, балконы, провода, трубы. Очень важно защититься от обломков, стекол, тяжелых предметов в доме. Укрытием могут служить места под прочным столом или кроватями. Детей надо научить этому. Провести дома тренировки, как в Японии и Новой Зеландии. Продумайте заранее, как увеличить безопасность стариков, детей и инвалидов. Большую опасность может нести во время землетрясения незакрепленная мебель. Особенно это важно ночью, когда спросонья человек не сразу может осмыслить происходящее, а падающие тяжелые предметы илидвигающаяся мебель только усложняют обстановку, могут перекрыть возможные пути эвакуации. Поэтому прикрепите прочно шкафы, этажерки, стеллажи, полки к стенам и полу. При размещении мебели в квартире помимо удобства следует исходить еще и из того, чтобы она не могла упасть на спальные места, перекрыть выходы из квартиры. Если в квартире есть тяжелые вещи и они находятся на высоте, например, на полках или на мебели (включая антресоли), то переместите их заранее вниз. Отсюда вытекает следующая рекомендация – не устраивайте полки над спальными местами. Кроме того, тяжелые предметы не следует размещать над входными дверями, так как это может являться вашим главным путем к эвакуации, а также над плитами, раковинами, унитазами. Если у вас нет закрытого шкафа с посудой, то закройте хотя бы переднюю часть полок.

Говоря о расположении спальных мест, важно не ставить их у больших оконных проемов и стеклянных перегородок. Обратите внимание на расположение в квартире не только тяжелых, но и громоздких вещей, так как входы в квартиру, коридоры, а также на лестничные площадки должны быть максимально свободны для прохода. Уберите из коридора или лестничной площадки ящики, детские коляски, лыжи и т. п. Кроме коридоров и площадок, обратите внимание на балкон. Там не должно быть емкостей, содержащих легковоспламеняющиеся и едкие жидкости. Они должны храниться так, чтобы не упасть и разбиться при землетрясении и быть надежно закупорены. Это опасно возгоранием, которое может усугубить ваше положение или спасательные работы. Помимо тяжелых предметов нужно проверить крепление люстр и других светильников. Нежелательно использовать бра и люстры из стекла и легко бьющихся материалов.

Для жителей крупных и индустриальных газифицированных городов с развитой инфраструктурой при землетрясении необходимо немедленно отключить *электричество*, водоснабжение и особенно *газ*. Возникшие в результате короткого замыкания в электросети или утечки газа пожары приносят гораздо больший ущерб, чем разрушение зданий. В крупных городах он составляет до 70 % и более.

Гражданам, живущим в сейсмоопасных регионах, необходимо уметь оказывать первую медицинскую помощь, особенно при травмах. Особо рекомендуется обратить внимание на меры предотвращения так называемого синдрома сдавливания. Он возникает в тех случаях, когда руки или ноги людей, освобожденных из завалов, были придавлены тяжелыми предметами более трех часов. При их освобождении и при кровотечении предварительно надо обязательно наложить кровоостанавливающий жгут. Однако надо помнить, что в этом случае необходимо обязательно фиксировать время: жгут не должен быть наложен более чем на два часа.

В квартире необходимо иметь запас консервов и питьевой воды на три-пять дней и медицинскую аптечку с двойным запасом бинтов и медикаментами для хронических больных, например инсулин для больных сахарным диабетом.

Все вышеназванные предметы, а также топорик, запасную одежду и обувь желательно упаковать в одну сумку или рюкзак, который надо хранить в легкодоступном месте. Следует заметить, что, как и рекомендуемые регулярными тренировками, этими рекомендациями в нашей стране зачастую пренебрегают. Этого не скажешь про американцев в Калифорнии или японцев, которые регулярно проводят учения, в том числе в школах на случай землетрясения. Именно этим, видимо, объясняется сравнительно небольшое число жертв в этих странах при довольно сильных землетрясениях.

Важно, чтобы документы хранились в одном хорошо известном и легкодоступном для вас месте вблизи выхода из квартиры. И в заключение: 1) следует заранее договориться с членами семьи, где вы встретитесь, если во время землетрясения окажетесь в разных местах, а ваш дом будет разрушен; 2) при получении информации о возможном землетрясении МЧС может дать сигнал оповещения сиреной, означающей «Внимание всем!», или по радио словесной информацией о необходимости принять вышеназванные меры.

Действия в случае, если вас завалило обломками стен или землей

Постарайтесь не падать духом, дышите глубоко и ровно, приготовьтесь терпеть голод и жажду. Голосом и стуком привлекайте внимание людей, перемещайте влево-вправо любой металлический предмет (кольцо, ключи и т. п.) для обнаружения металлолокатором. Если пространство около вас относительно свободно, не зажигайте спички, свечи, берегите кислород. Если движение возможно, продвигайтесь осторожно, стараясь не вызвать нового обвала, ориентируйтесь по движению воздуха, поступающего снаружи. Пролезая в узкий лаз, расслабьте мышцы, прижмите локти к бокам, отталкиваясь ногами от пола, как черепаха. Если у вас имеется возмож-

ность, с помощью подручных предметов (доски, кирпичи и т. д.) укрепите потолок от обрушения и дождитесь помощи. В случае если вас придавило землей, попытайтесь перевернуться на живот, чтобы ослабить давление на грудную клетку и брюшную полость. Придавленные руки и ноги чаще растирайте, массируйте, восстанавливайте кровообращение. При сильной жажде положите в рот небольшой гладкий камешек или обрывок носового платка и сосите его, дыша носом.

Действия на улице

Когда землетрясение вас застало на улице, необходимо следующее. Если вы успели выскочить из здания, то не стойте вблизи него. Не ждите других и не пытайтесь проникнуть в него снова даже на секунду – пусть оно и устояло в первые мгновения, а толчки вроде прекратились. Могут быть повторные колебания. Обязательно отойдите от зданий, столбов, оград. При этом надо постараться найти открытое место, например сквер, широкую дорогу, стадион или пустырь. Осмотритесь, чтобы место, где вы остановились, было подальше от других зданий и над вами не было деревьев, линий электропередачи, карнизов и балконов. Особо опасно касание оборванных электрических проводов.

Действия на транспорте

Если землетрясение застало вас на транспорте, ваши действия должны быть следующими. Если вы находитесь в автомобиле за рулем, окруженные высотными зданиями, или землетрясение застало вас на виадуке, сохраняйте самообладание и продолжайте максимально быстрое движение. Двигаться надо до тех пор, пока вы не покинете опасное место и не выедете на открытое пространство или подальше от зданий. Не останавливайтесь вблизи мостов, туннелей и эстакад. Избегайте также деревьев, силовых линий электропередачи. Когда вы выехали на открытое место, остановитесь, но не выходите из машины до конца толчков. Если вы находитесь в автобусе, попросите водителя открыть двери, но не выбивайте окон, не сейте панику, не вырывайтесь из автобуса, это может привести к давке и травмам. Безопаснее всего оставаться на своем месте до конца колебаний. Если вы находитесь в горной местности около крутых обрывов, сооружений, скал, которые могут обрушиться при землетрясении, отъезжайте от них.

Действия после сильного землетрясения

После землетрясения необходимо выполнять следующие действия: 1) принять меры по освобождению из-под завалов людей и оказанию первой помощи пострадавшим. Если вы не в состоянии оказать первую медицинскую помощь, то лучше всего без необходимости не перемещать серьезно пострадавшего. Сообщите, чтобы он получил квалифицированную помощь. 2) Если вы оказались в завале, помните, что опаснее всего в такой ситуации паника. Знайте, что без воды и пищи вы можете продержаться достаточно долго, главное, сохранять самообладание. В Армении при землетрясении в Спитаке живых людей находили *через семь*, в Нефтегорске – *девять*, в Турции – *через тридцать-сорок суток*.

3.3. Природные катастрофы, связанные с извержением вулканов и меры защиты

3.3.1. Основные сведения о вулканах и их извержениях

Таким же ярким проявлением динамики недр, как и землетрясения, является активный вулканизм. Извержения вулканов – грозное явление. До сих пор на памяти человечества гибель г. Помпеи при извержении вулкана Везувий. Он и сейчас активен и угрожает Неаполю, в котором живут 600 тыс. человек. Деятельность вулканов зачастую непредсказуема, взрывы неожиданны, и последствия бывают катастрофическими. Так, 27 августа 1883 года гигантский взрыв разнес на куски вулкан Кракатау, расположенный между островами Ява и Суматра (Индонезия). Грохот взрыва был слышен на расстоянии почти 5000 км. Вулканический пепел поднялся на 10–15 км, четырежды обогнул земной шар, вызвав необычные закаты солнца и сумерки. Несколько лет он держался в атмосфере, вызвав на большей части планеты понижение среднегодовой температуры. Извержение породило гигантскую волну-цунами высотой 30–40 м, которая была зарегистрирована даже в Англии в Ла-Манше. Погибло около 36 000 человек. Энергия взрыва Кракатау составила 21 547 атомных бомб (здесь и далее принимается, что каждая из них в 10 раз мощнее атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму.) Но это было не самое крупное извержение. В 1815 году там же в Индонезии на острове Суматра произошло извержение вулкана Тамбора. Его энергия была равна 171 428 атомных бомб. Взрыв унес 150 куб. км горной породы, образовалась кальдера (провал) диаметром шесть км и глубиной 500–600 м. Извержение потрясло весь Индонезийский архипелаг и стерло с лица земли ряд государств.

В России действующие вулканы известны на Курильских островах и Камчатке. Всего на Курилах, по данным В. И. Федорченко [1975], насчитывается 68 наземных вулканов, из них 39 действующих. Например, на о-ве Итуруп есть кальдера Львиная Пасть диаметром семь-восемь и глубиной один километр. Можно представить себе, какой мощности это был взрыв (удаленность Южно-Сахалинска от нее 420, а до действующего вулкана Тятя на севере о-ва Кунашир – 390 км). Расстояние от него до Южно-Курильска 55, а до действующего вулкана Менделеева – 9 км. Курильск на о-ве Итуруп удален от действующих вулканов Богдан Хмельницкий, Баранский и Иван Грозный на 5–30 км. Ближе всех к действующему вулкану Эбеко находится Северо-Курильск (1–5 км). Сравнительно недавно, 14 июля 1973 года, из вулкана Тятя вырвался пепловый столб. Извержение произошло из новообразованного бокового конуса Отважный высотой около 300 и глубиной 100 м. Пепел достиг о-ва Шикотан, расположенного на расстоянии 90 км. Это было одно из обычных извержений на Курилах. 7 октября 1977 года автор этих строк был на конусе Отважный, спускался в вершинный кратер основного конуса, обследовал с вулканологами вулкан Тятя. Спустя четыре года после извержения температура шлака конуса на глубине нескольких десятков сантиметров достигала около 100° С.

25 июня 1989 года проснулся вулкан Иван Грозный на Итурупе. 3–4 мая из него вырвалось пеплово-газовое облако на высоту 200 м, а 8 мая – на высоту около 1,5 км. На склоне конуса образовалась 70-метровая трещина.

на. Это извержение было нами специально исследовано и описано [Абдурахманов, Злобин и др., 1990].

Таким образом, деятельность вулканов имеет место и в настоящее время. Согласно Е. К. Мархинину и А. И. Абдурахманову [1990], извержения на Курилах в среднем происходят раз в пять лет, один раз в 11–22 года происходят умеренные и средние, один раз в 33 года – сильные, а раз в столетие – гигантские.

3.3.2. Строение вулканов и их структурно-генетические типы

По определению Г. Макдоналда [1975], экс-президента Международной ассоциации по вулканизму и химии недр Земли, *вулкан – это отверстие или место в Земле, из которого расплавленная порода или газ (или вместе) поступают на поверхность из недр*. Принципиальная схема вулканов типа Сомма–Везувий представлена на рис. 3.15. Это, как правило, конусовидная гора, и в ней выделяют: 1 – кальдеру, 2 – сомму; 3 – конус (вершинный); 4 – кратер (центральный или побочный); 5 – жерло (выводной канал); 6 – лавовый поток; 7 – вулканический очаг.

Общая классификация включает в себя вулканы *центрального* типа (правильные конусы), *кальдерные* (концентрические провалы, образованные при взрыве вулканического конуса или его обрушении), *щитовые* (большие уплощенные возвышенности с пологими склонами типа Мауналоа на Гавайях), щитовидные *трещинного* типа (Исландия), отдельные мелкие *экструзии*.

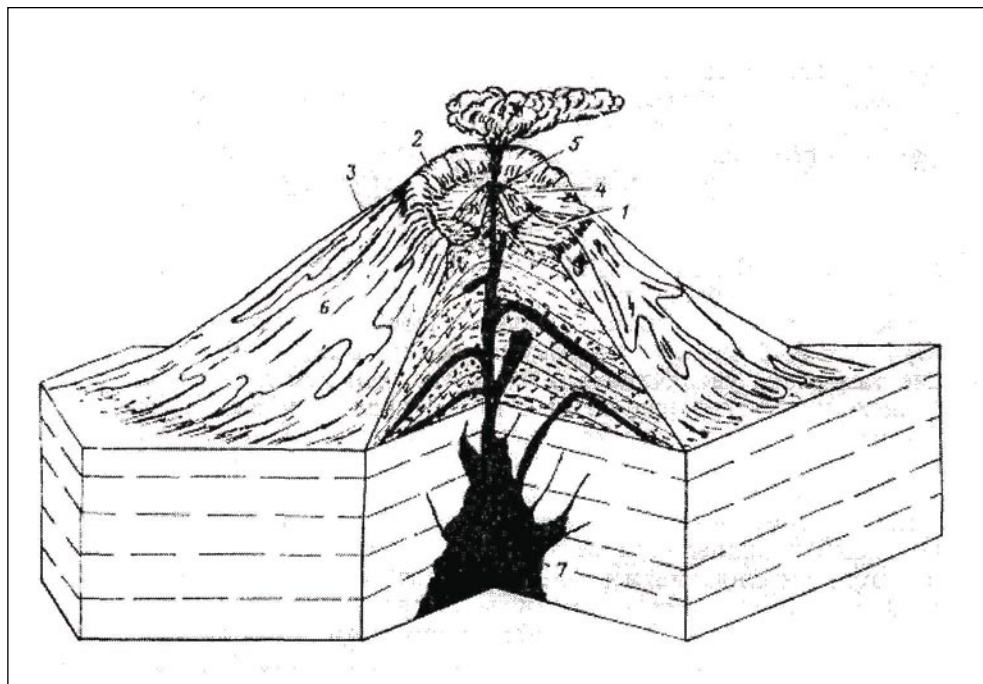


Рис. 3.15. Схема строения вулкана [Якушова и др., 1988].

Наиболее удачная классификация четвертичных вулканов Курильской островной дуги предложена В. И. Федорченко [1975], а именно:

1) Простые *стратовулканы* типа Сомма–Везувий, типичным представителем которых является вулкан Тятя на острове Кунашир (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Вулкан Тятя (о-в Кунашир).

2) *Кустовые «многовыходные» стратовулканы*, среди которых выделяются: а) изолированные, например, вулкан Менделеева на Кунашире; б) в системе хребтов – хребет Богатырь (вулканы Стопак, Буревестник и др.) на Итуруп [Злобин, 2006].

3) *Кальдерные стратовулканы* (вулкан Медвежий на острове Итуруп).

4) *Кальдерный пемзово-пирокластический* (вулкан Головнина на острове Кунашир).

5) *Вулканы-экструзии*.

Сравнивая общую классификацию вулканических построек со структурно-генетической классификацией курильских вулканов В. И. Федорченко, видно, что в ней отсутствуют лишь щитовые вулканы гавайского или исландского типов.

Отметим также некоторые особенности вулканических построек.

I. *Стратовулканы*. Это правильный конус или усеченный. Углы наклона разные.

II. *Кальдерные* вулканы различаются по происхождению. Выделяют кальдеры обрушения и взрыва.

Типичные *кальдеры обрушения* лучше всего представлены на Гавайских островах Килауэа и Мауналоа. У нас в России на Курилах таким

кальдерным вулканом является, например, вулкан Головнина на острове Кунашир, глубинное строение которого исследовал автор этих строк [Злобин, Федорченко, 1982].

Кальдеров взрыва на Курильских островах много, например, кальдеры вулканов Лавина, Медвежий, Заварицкого и др. При этом кальдеры, образованные в результате взрывов, могут иметь глубину 0,3–0,4 и диаметр до 4–8 км [Макдоналд, 1975]. Диаметр кальдера обрушения может достигать 10–17 км (вулкан Килауэа на Гавайях) и 45 км (вулкан Ла-Гарита, горы Сан-Хуан, штат Колорадо, США). Причины обрушения различны, но в основном это компенсационное опускание в результате: а) опустошения магматической камеры, питающей вулкан; б) оттока магмы (рис. 3.5).

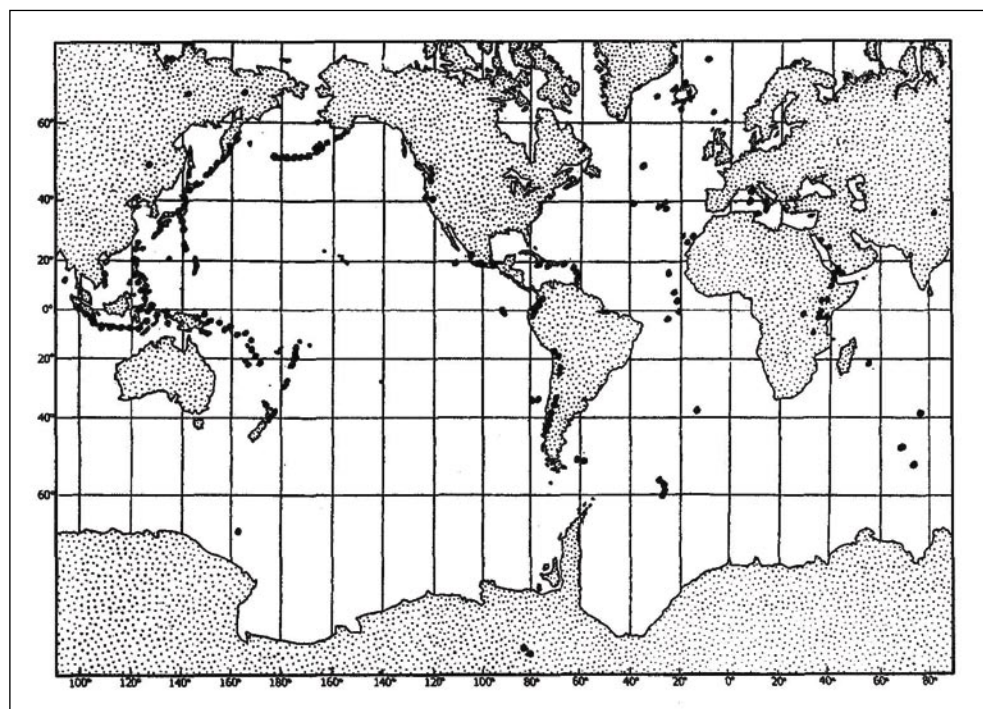


Рис. 3.17. Расположение действующих вулканов (черные кружки) на земном шаре [Короновский, 2006].

Очаги вулканов, как и землетрясений, в значительной степени расположены в близких диапазонах глубин, а сами активные вулканы расположены в основном в одних и тех же областях, что и эпицентры землетрясений (см. рис. 3,5; 3,17). Так, очаги вулканов и зоны их магмообразования располагаются от нескольких до 150 км и более, то есть в земной коре и литосфере, являющейся частью верхней мантии. Очаги землетрясений, о которых мы писали выше, также залегают от самых первых километров в земной коре до глубин в верхней мантии, причем как до этих, так и еще больших – 600–650 км. Это связано с рядом при-

чин их общего возникновения, хорошо объясняемых тектоникой плит. Поэтому ниже рассмотрим второе проявление динамики недр, выражающееся в вулканизме.

Современный вулканизм характеризуется приуроченностью к подвижным поясам большой протяженности. Изолированные вулканы встречаются редко. Общее число активных вулканов на Земле превышает 700 – по данным Д. П. Рэдулеску [1979], около 800 – по данным В. И. Влодавца [Рудич, 1974] и 1000 – по Н. В. Короновскому [2006]. Разные цифры у разных авторов связаны с тем, что отнесение того или иного вулкана к активным, то есть действующим, или окончательно потухшим является довольно спорным. Имеются случаи, когда вулкан, считавшийся сотни и даже тысячи лет потухшим, вдруг становится активным. Это может привести даже к национальной проблеме. Так было, например, в ночь с 22 на 23 января 1973 года с вулканом Хельгафьелл близ портового города Вестманнаэйяр на о-ве Хеймазн у южного побережья Исландии, имеющего немаловажное значение для ее рыбной отрасли. Он молчал с незапамятных времен, поэтому начавшееся извержение могло «привести Исландию к экономической катастрофе» [Раст, 1982, с. 11].

В нашей стране вулканы расположены в основном в Курило-Камчатской зоне. Всего здесь насчитывается, по ряду данных, 141 вулкан на Камчатке и, как мы писали выше, 68 на Курилах. Таким образом, в Курило-Камчатской островной дуге в целом насчитывается более 200 вулканов. Из этого числа 67 вулканов являются действующими, 28 таких активных вулканов находится на Камчатке [Рудича, 1974] и 39 из них расположены на Курильских островах [Мархинин, Абдурахманов, 1990; Злобин, 2006; Курильские острова..., 2004].

Около 75 % всех действующих вулканов располагаются по периферии Тихого океана, формируя так называемое Огненное кольцо. Они приурочены к активным континентальным окраинам (конвергентные границы литосферных плит) или зонам субдукции, где океаническая кора погружается (субдуцирует) под континентальную, и образуют вулканические дуги в структуре Алеутской, Курило-Камчатской, Японской, Идзу-Бонинской, Марианской и ряда других двойных островных дуг. Кроме того, вулканизм проявляется в пределах окраинно-континентальных вулканических поясов, таких, как Андийский и Центрально-Американский. Помимо наземных много вулканов открыто на дне Мирового океана, особенно в островных системах, рифтовых зонах, ложе. Последние называют внутриплитными и часто связывают с горячими точками (см. выше).

К таким же активным зонам относятся срединно-океанические хребты, откуда начинается спрединг (расширение) океанического дна и расхождение литосферных плит, то есть это зоны активные в тектоническом отношении, где, естественно, наблюдается вулканизм. Они являются дивергентными (расходящимися) границами океанических литосферных плит, где, таким образом, преобладает обстановка тектонического растяжения, способствующая прорыву магмы из очагов вулканов.

Однако современных вулканов в этих областях немного. К ним относятся, например, вулканы Исландии, Азорских островов, а в Индийском океане – это Коморские, Кергелен и др.

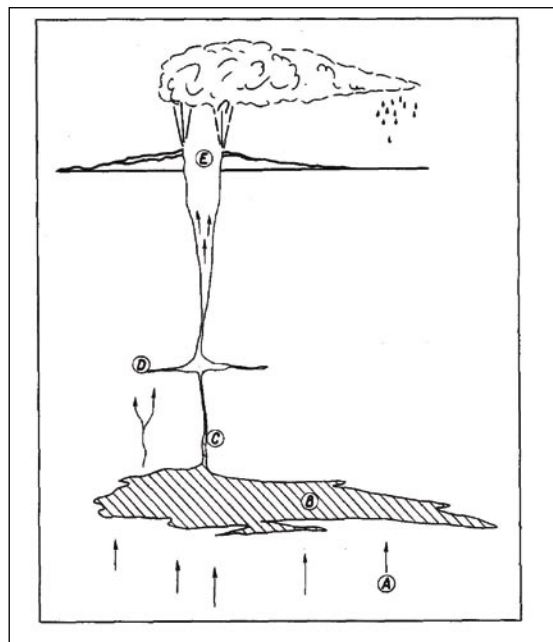


Рис. 3.18. Схема строения вулканической системы по Мак-Гетчину, на которой показаны диффузия летучих (A), место образования магм (B), дайкообразная проводящая магматическая камера (C), промежуточная камера (D) и взрывной кратер (E) [Йодер, 1979].

Естественно, особенно хорошо известны вулканы в Европе в молодом Альпийско-Средиземноморском поясе, ярко проявляющемся в сейсмичности и вулканизме. Здесь расположены вулканы Везувий, Стромболи, Вулкано, Этна и др. К этому поясу относится Тирренское море, сформировавшееся в результате рассеянного спрединга. В этом складчатом поясе располагались извергавшиеся сравнительно недавно в геологическом отношении (тысячи и сотни тысяч лет назад) вулканы, такие, как Эльбрус, Казбек, Арарат и др.

Как мы сказали выше, глубины залегания очагов вулканов находятся частично в том же диапазоне глубин, что и очаги землетрясений. Но если последние прослеживаются на глубинах от 1–5 до 600–650 км в земной коре и верхней мантии, то очаги вулканов в основном расположены в земной коре до 40 км, а зоны их магмообразования связываются с глубинами до 150 км и более [Злобин, 1987, 2006; Zlobin et al., 1999]. Схематический разрез вулканической системы изображен на рис. 3.18.

Строение вулканических систем и генезис магм изучают вулканология и петрология [Йодер, 1979; Происхождение вулканических..., 1985]. Динамика недр проявляется в вулканизме довольно ярко (Г. С. Горшков, Б. И. Пийп,

Наиболее известными из внутриплитных активных вулканов, безусловно, являются Гавайские вулканы, где, кстати, расположен знаменитый Гавайский геофизический институт США, ведущий многие годы наблюдения за вулканами, извергающимися очень часто, сейсмичностью и цунами. Вулканы такого типа связывают в последние годы с горячими точками.

Таким образом, современное расположение действующих вулканов контролируется конвергентными и дивергентными границами литосферных плит, а также горячими точками.

Кроме того, нельзя не отметить активный вулканизм в Африке, который связан с Камерунским рифтом и главным образом с Восточно-Африканской рифтовой зоной, где расположены известные вулканы Кении и Танзании: Килиманджаро, Вирунга, Меру и др.

Е. К. Мархинин, П. И. Токарев, А. И. Иванов, И. В. Мелекесцев, В. И. Федорченко, В. А. Ермаков, С. Т. Балеста, В. А. Зобин, В. И. Горельчик и др.). В качестве примера приведем работу А. И. Малышева [2000], где на реальном фактическом материале рассмотрены динамические модели вулканизма и их использование при прогнозе извержений.

Строение очагов вулканов, выявленных по геофизическим данным под островом Кунашир на Курильской дуге, где находятся действующие вулканы нескольких типов, получен нами и представлен ниже на рис. 3.19.

3.3.3. Меры активной защиты от вулканических извержений

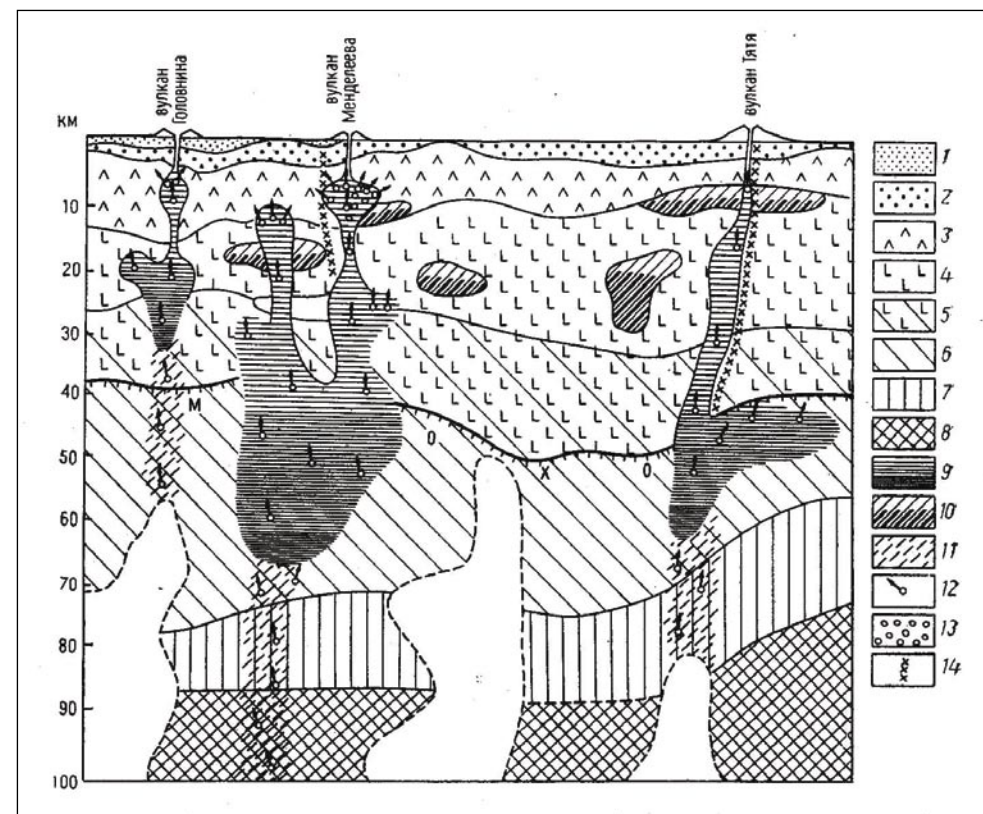


Рис. 3.19. Продольный глубинный разрез через остров Кунашир [Злобин и др., 1982]: 1–3 — комплексы (1 — верхнемиоцен-четвертичный, 2 — верхнеолигоцен-миоценовый, 3 — геосинклинальный верхнего мела и палеогена (?); 4 — палеозойское (а возможно, и докембрийское) основание; 5 — базальтовый слой; 6–8 — слои верхней мантии; 9 — расслоенные магматические очаги; 10 — дифференцированные интрузивные тела базальтов — более ранние порции базальтовых магм; 11 — зоны проницаемости под очагами; 12 — флюидные трансмагматические потоки; 13 — реликты субстрата в областях магматического замещения; 14 — крупнейшие разломы по данным [Происхождение..., 1985].

Прежде чем рассматривать меры защиты от вулканических извержений, ознакомимся, какие существуют виды опасности (семь видов):

1. Лавовые потоки.
2. Тефры (вулканические бомбы, лапилли, пепел).
3. Грязекаменные потоки.
4. Водные потоки (вулканические наводнения).
5. Палящая туча (раскаленные лавины).
6. Вулканические газы.
7. Цунами вулканического происхождения.

Лавовые потоки

История борьбы с лавовыми потоками уходит в глубокую древность. Известны несколько способов: отведение потока, бомбардировка, строительство защитных стен и каналов. Первый опыт отведения лавового потока был предпринят в 1669 году в г. Катания, Сицилия [Раст, 1982], когда 50 жителей в мокрых шкурах пробили шлаковую корку с западной стороны лавового потока и отвели его в сторону от города. К этому же виду активной защиты относится способ, примененный во время извержения вулкана на о-ве Хеймаэй (Исландия). Лавовый поток поливали сильными струями воды, в результате чего лава остыла и затвердела.

Бомбардировка лавовых потоков была предложена в 1931 году индонезийским вулканологом Джаггаром. Она была реализована в 1935 году при извержении вулкана Мауналоа, создавшего угрозу г. Хило – столице штата Гавайи. Это гигантский вулкан высотой 4170 м и размером по основанию 90 х 50 км, лавовые потоки с которого обычно двигались в направлении Хило. Джаггар, учитывая рельеф, наметил два места, благоприятных для отведения движущейся лавы. 27 декабря была проведена бомбардировка боковой части лавового потока, покрытой коркой. В результате лава потекла в другом направлении. Успех был поразительный, ведь к моменту бомбардировки скорость продвижения фронта потока лавы достигала 250 м/час. Но к полудню следующего дня она упала до 14 м/час, а спустя 18 часов поток в направлении Хило остановился. В 1942 году там же была проведена вторая бомбардировка с тем же положительным результатом.

Строительство защитных стен, плотин и валов нередко используют для защиты городов, например, г. Катании от лавовых потоков (вулкан Этны). При извержении Везувия в 1906 году поток лавы был задержан и разделен на два рукава у стен кладбища.

В 1944 году Буллард, наблюдая за лавовым потоком с вулкана Парикутин в Мексике, пришел к выводу, что большую часть города Сан-Хуан-де Парангафикутиро, расположенного у его подножья, можно было спасти с помощью удачно расположенного барьера. Во многих местах он видел, что лава останавливается или отклоняется, встречая препятствия. Заметим, что в некоторых случаях дамбы строят под углом к предполагаемому направлению движения лавы с тем, чтобы не остановить, а изменить направление течения. С помощью бульдозеров теперь это сделать можно достаточно быстро. Так, в 1955 году при извержении вулкана Килауэа (Гавайи) в течение четырех часов был сооружен вал протяженностью 300 м и высотой три метра, защитивший плантации от уничтожения.

Строительство тоннелей и каналов – еще одна мера активной защиты

была предпринята при извержении вулкана Келуд на о-ве Ява (Индонезия). Опасность заключалась в озере, расположенном в кратере вулкана, в котором находилось до 44 млн. куб. м воды. При сильном эксплозивном извержении вода из озера выбрасывалась из кратера и смешивалась с рыхлым материалом, превращаясь в смертоносные грязевые потоки (лахары). Так, в 1586 году в лахаре погибло около 10 000 человек. За последующее столетие извержения еще не раз вызывали подобные тяжелые последствия. В 1919 году после крупной эксплозии (взрыва), выбросившей 38 млн. куб. воды, грязевые потоки погубили около 5 500 человек. Тогда было решено соорудить систему тоннелей и каналов.

Тефры

Тефры – это вулканические бомбы, лапилли (размер обломков – от 0,25 до 6,4 см) и пепел. Пример подобного извержения дает вулкан Ключевская сопка на Камчатке в 1985 году (рис. 3.20). Вес бомб может измеряться многими тоннами (рис. 3.21), хотя обычно это десятки килограмм. Расстояние, на которые бомбы способны улететь от кратера вулкана, составляет первые километры, но известны случаи, например на вулкане Безымянный на Камчатке, когда бомбы покрывали расстояние более 25 км.

Меры защиты: покинуть место извержения, если это невозможно – укрыться, надеть каски или уклониться от бомб.

Если пепел, надеть защитные маски. Необходимо убрать пепел с крыш, закрыть резервуары с водой. Обязательность эвакуации спорная тема. Главное – вовремя удалиться в укрытие. Надо иметь в виду, что во время извержения эвакуация зачастую невозможна или осложнена из-за отсутствия видимости.

Грязекаменные потоки



Рис. 3.20. Извержение вулкана Ключевская сопка на Камчатке в 1985 году.

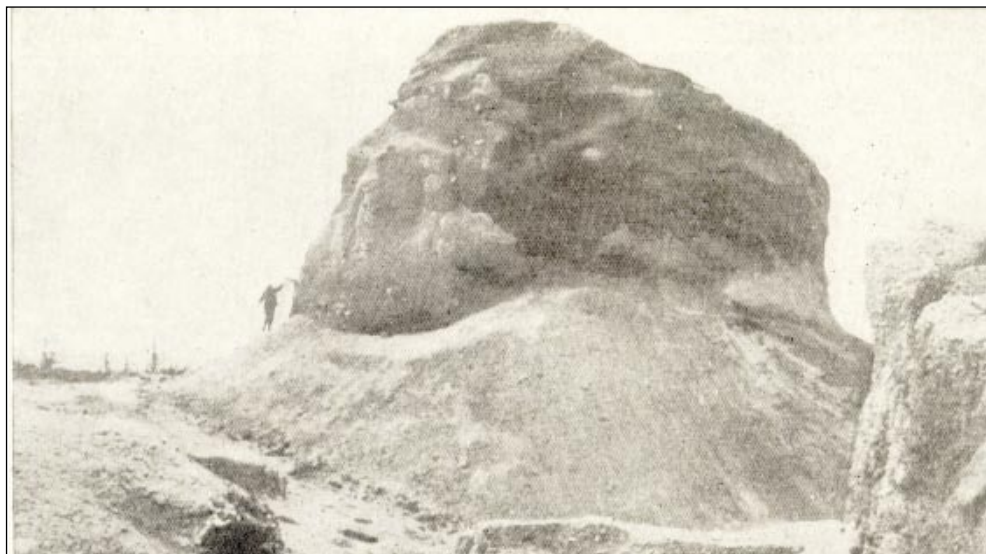


Рис. 3.21. Вулканическая бомба весом тысячи тонн, выброшенная при извержении вулкана Шивелуч на Камчатке 12 ноября 1964 года [Рудич, 1974].

Грязевой поток, или лахар, не менее опасен, чем лавовый поток или пепел. Общеизвестно, что пепел из вулкана Везувий уничтожил в свое время древний римский город Помпеи, но немногие знают, что в те же минуты погиб другой римский город, расположенный недалеко, – Геркуланум. Вода из кратера перелилась через стенки и, захватив тефру, устремилась вниз. Образовавшийся в результате этого грязекаменный поток уничтожил город.

Меры защиты связаны в основном с прогнозом извержения, строительством дамб и каналов, отводящих лахары. Защититься от потока нелегко из-за его громадной скорости, бегство в укрытие невозможно. Нужно сооружать дамбы или желобы. Грязевой поток ведет себя, как вода, и путь его можно предвидеть.

На вулкане Келуд на острове Ява, например, после потока 1919 года стали отводить последующие потоки с помощью туннеля. Извержение, происшедшее в 1951 году, подтвердило эффективность этой меры. Однако впоследствии туннель засорился. При серьезной опасности жители могут уйти на бугор, если дамба приостановит поток. Лучший способ – не селиться у вулкана или эвакуироваться.

Водные потоки

Обычно они возникают при быстром таянии снега или льда во время вулканических извержений. Меры защиты такие же, как и от грязекаменных потоков.

Палящая вулканическая туча

Смесь раскаленных газов и тефры называется палящей вулканической тучей. Из всех вулканических процессов это наиболее опасный. При извержении вулкана Мон-Пеле на острове Мартиника (Малые Антильские

острова) 8 мая 1902 года из жерла вулкана вырвалась палящая туча с температурой 700–1000° С и обрушилась на город Сен-Пьер со скоростью 160 км/час, и через две минуты все 30 тыс. жителей были мертвы. В живых осталось лишь два человека: один был заключенным и находился в тюрьме, другой – сапожник. Извержению предшествовало появление 23 апреля пеплового дождя, подземного гула, толчков, распространение ядовитых газов. Жителей охватила паника, но 7 мая должны были быть выборы губернатора Мартиники.

Утром 8 мая началось резкое, почти жуткое затишье. Затем со страшным грохотом, как из 1000 пушек, треснула вершина горы, из нее рвануло пламя, как из горящего нефтеперегонного завода, и наружу вырвалась огромная палящая туча. Гору разнесло на куски, а громадная стена с невообразимой скоростью 160–180 км/час помчалась вниз по склону и за несколько секунд достигла города. Сен-Пьер исчез в пламени. Огненная масса попала в море, и оно закипело, корабли в гавани были объаты пламенем. Город в считанные мгновения был стерт с лица Земли. Сгорело 30 тыс. человек (по некоторым оценкам – 40 тыс.), из 18 судов на рейде уцелело одно.

Основная мера защиты – надежный прогноз извержения и заблаговременная эвакуация.

Заметим, что аналогичные вулканы есть и в России, например, на Курилах (вулкан Менделеева по оценке Е. К. Мархинина). Он уже трижды извергался в историческое время, хотя уже более ста лет молчит. После последнего извержения его кратер прочно закупорен застывшей лавовой пробкой, поэтому есть основания опасаться его будущих эксплозий.

Вулканические газы

Вулканические газы не только сопровождают извержение вулкана, но и являются важным фактором, вызывающим его. Кроме того, они могут определять тип извержения, что очень важно. При извержении вулканические газы, как правило, поднимаются на несколько километров вверх в виде гигантских облаков, захватывая при этом мелкие лапилли и пепел. В отличие от лавы газы выделяются из вулканов и в периоды покоя. На выходе их температура может достигать 1000° С. Иногда они вырываются под большим давлением с мощным шумом, шипением или грохотом, например, на вулканах Менделеева, Головнина и на других островах Большой Курильской гряды. Такие выходы газов и водяного пара называют фумаролами. Действующие вулканы, на которых есть фумаролы, находятся в так называемой фумарольно-сульфатарной стадии.

Газы, заключенные в магме, являются ее движущей силой. При уменьшении давления в подводящем магматическом канале, например, при сильных землетрясениях, газы из магмы могут выделяться в громадных объемах и с большой (взрывной) скоростью. Их состав различен и варьируется в зависимости от типа вулкана, а на одном вулкане – в зависимости от времени. Вулканические газы содержат главным образом двуокись углерода, хлористый водород, фтористый водород, сероводород, водород, азот, отчасти метан CH₄, аммиак и др. [Раст, 1982]. Многие из них опасны для человека, поэтому лучше находиться с наветренной стороны от вулкана. Если же вам необходимо работать вблизи вулкана (например, вулканологам) или вы должны находиться вблизи него длительное время

(проживаете), то эффективной защитой от газов является противогаз.

Цунами вулканического происхождения

Цунами описано в следующей главе, но основное отличие заключается в том, что его причиной в данном случае является извержение вулкана или провал кальдеры.

3.3.4. Меры пассивной защиты

Имеют большое значение. Среди них выделяют вулканическое районирование и вытекающие из него меры предосторожности, мониторинг вулканов, прогноз извержения, системы предупреждения и план эвакуации населения.

Вулканическое районирование состоит в подробном исследовании вулканических построек и составлении карт, на которых нанесены области разной степени опасности с указанием путей эвакуации населения, а также побережья, опасные в отношении цунами. На его основе можно планировать строительство новых населенных пунктов, объектов промышленной и транспортной инфраструктуры. Подобные карты были составлены автором совместно с А. И. Абдурахмановым при изучении вулкана Менделеева на Кунашире по заданию администрации Южно-Курильского района и теме фундаментальных исследований РАН. На них выделены зоны разной степени опасности в случае извержения и показано возможное направление движения лавовых и грязекаменных потоков (рис. 3.22). Большое значение имело изучение внутреннего строения вулканических аппаратов, поскольку важно было определить наиболее вероятные точки прорыва магмы и ее излияния на земную поверхность из близповерхностных незакристаллизованных магматических камер (рис. 3.23; [Злобин и др., 1997; Злобин, 2000, 2006 и др.]).

Первые глубинные исследования вулканических аппаратов на Курилах сейсмическими методами МОБЗ и ГСЗ были начаты и выполнены Т. К. Злобиным с коллегами [1982, 1991, 1994, 1997 и др.] в 1976–1992 годах.

Мониторинг за вулканами и прогноз извержений осуществляются в основном специальными обсерваториями и институтами. Благодаря их усилиям спасены многие тысячи жизней, особенно в Японии и Индонезии, где с давних времен действуют хорошо организованные службы предупреждения. Первая вулканологическая обсерватория была открыта более 150 лет назад в 1845 году в Италии на вулкане Везувий. Позже такие же лаборатории открылись на вулкане Этна, Гавайских островах, в Японии, Индонезии.

Детальные наблюдения проводятся на вулканах Мауналоа (Гавайи) и Эль-Бок (Мексика), находящегося в 60 км от мегаполиса Мехико. Учеными была установлена на вулкане сеть сейсмических станций, способных постоянно вести его мониторинг. Здесь опасен даже вулканический пепел, поскольку он не пропускает радиоволны, препятствует мобильной телефонной связи и авиаполетам.

На Камчатке мониторинг действующих вулканов проводит Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, где П. И. Токаревым в 1964 году создана оперативная служба слежения за вулканической сейсмичностью. С помощью 12 сейсмостанций она контролирует 28 действующих вулканов, расположенных на площади около 75 000 кв. км.

3.3.5. Предсказания извержений вулканов

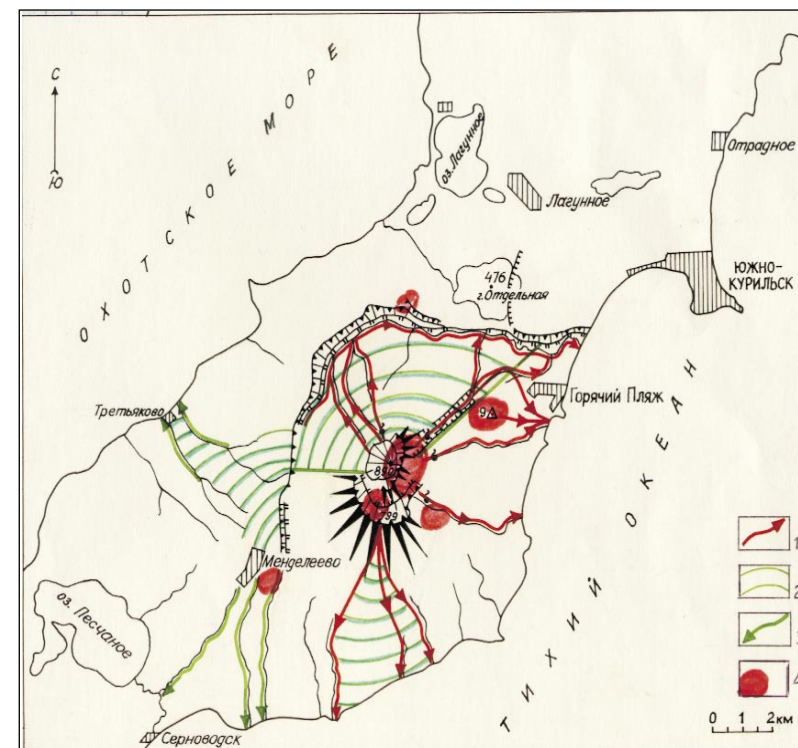


Рис. 3.22. Зона опасности вулкана Менделеева. Показаны наиболее вероятные и возможные вулканические зоны распространения грязекаменных и пирокластических потоков, а также палящих туч: 1 — линия осевой зоны направленных взрывов и последующего излияния пирокластических и грязекаменных потоков, а также движения палящих туч; 2 — наиболее вероятный сектор их распространения; 3 — дальнейшее возможное распространение грязекаменных потоков; 4 — проекции на поверхность магматических очагов, установленных внутри вулкана сейсмическими исследованиями МОБЗ (составили Т. К. Злобин и А. И. Абдурахманов).

Предсказания извержений вулканов обычно основывались на длительных непосредственных наблюдениях за ними. Впервые они были начаты в 1845 году на вулкане Везувий. Их результаты были представлены на международной конференции по активному вулканизму в г. Неаполе в 1991 году. Там же озвучены и результаты исследований курильских вулканов автора этих строк, Е. К. Мархинина, А. И. Абдурахманова и др. [Zlobin, 1991]. Сейчас такие наблюдения за вулканами осуществляются в России, Японии, США, Новой Зеландии.

Один из основных методов прогноза основан на мониторинге вулканической сейсмичности, включая так называемое дрожание вулканов. Так, перед извержением вулкана Парикутин в Мексике в 1943 году локальные землетрясения начались за три недели до него, а при извержении вулка-

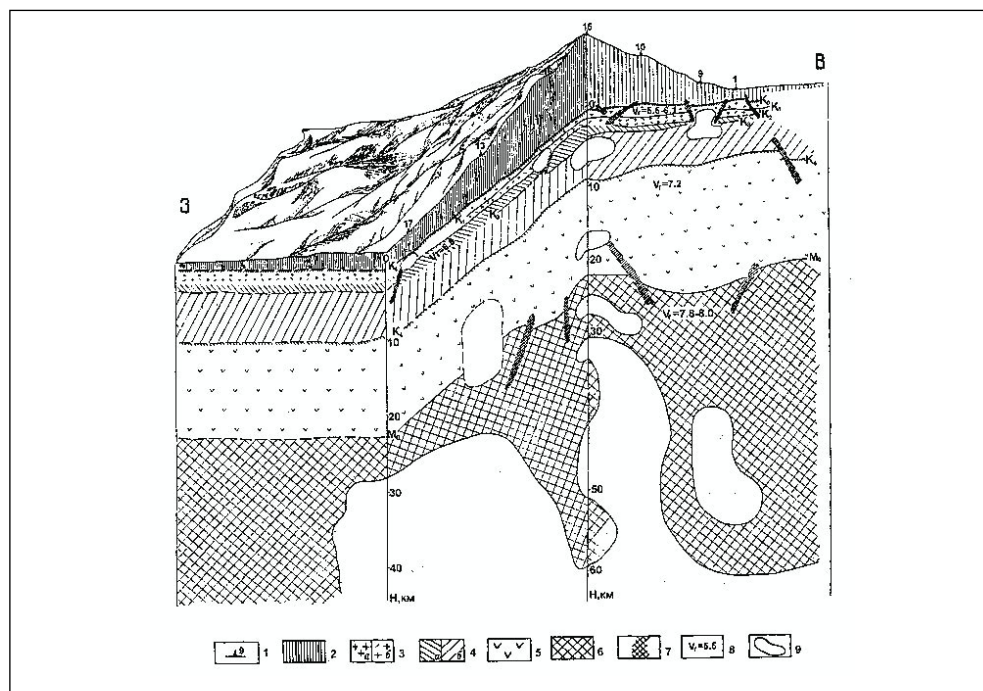


Рис. 3.23. Объемная трехмерная модель строения литосферы под вулканом Менделеева (Кунашир): 1 – пикеты установки сейсмических станций наблюдений; 2 – схематическое изображение вулканической постройки; 3 – 5 – слои земной коры (3 – верхняя (а) и нижняя (б) части гранитоидного слоя, 4 – гранулитогнейсовый слой; 5 – «базальтовый» слой); 6 – верхняя мантия; 7 – разломы; 8 – граничная скорость, км/с; 9 – области отсутствия обменов, связываемые с магматическими очагами и зоной магмообразования. Составил Т. К. Злобин [Злобин и др., 1997].

на Гекла в 1947–1948 годах – всего за 20 минут [Раст, 1982]. На Камчатке известны случаи сейсмических предвестников за недели и месяцы, а на Южных Курилах на вулкане Тятя сейсмографы зарегистрировали первые признаки вулканического дрожания за час до извержения. Особо отметим П. И. Токарева, давшего точные прогнозы извержений камчатских вулканов Безымянный (1955), Шивелуч (1964) и Плоский Толбачик (1975). Он выявил гиперболический закон нарастания условных деформаций и сейсмической энергии за 30–50 дней до извержения (рост графика), а за один-три дня до извержения – резкое уменьшение числа землетрясений и их энергии.

Сейчас прогноз извержений вулканов опирается на их мониторинг комплексом методов (сейсмичность, деформации, теплоток и др.). Иногда намечается периодичность извержений, например, на вулкане Мауналоа с периодом от 2 до 210 месяцев (17 лет), на вулкане Михара (Япония, о-в Осима) сначала 115–230, затем 6–87, а с 1938 года – до 10 лет.

ГЛАВА 4. ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ

4.1. Внешние оболочки Земли

Кроме внутренних геосфер у Земли есть и внешние. В настоящей работе они детально не рассматриваются, отметим лишь некоторые данные о них. К внешним сферам относят гидросферу, криосферу, атмосферу, ионосферу, магнитосферу, околоземное и космическое пространство. Некоторые авторы выделяют и биосферу.

Гидросферу, или водную оболочку Земли, считают непрерывной, несмотря на то, что Мировой океан составляет только 2/3 площади ее поверхности. Это объясняется тем, что вода на Земле представлена во всех состояниях (жидкое, твердое и газообразное) и присутствует во всех геосферах. К гидросфере относятся океаны, моря, озера, реки, болота, ледниковые покровы на суше, в морях и океанах. Все эти воды взаимосвязаны, и поэтому могут быть отнесены к единой гидросфере. Ее динамика сложна и многообразна и проявляется в большом числе явлений различного масштаба и скорости [Злобин, 2006].

Криосфера, или криозона, представлена наземными, плавучими и под-земными (вечная мерзлота) льдами. В основном она охватывает полярные шапки Земли и прилегающие к ним регионы Евразии, Северной Америки, Антарктики.

В воздушной оболочке Земли выделяют тропосферу, которая простирается от ее поверхности до 7–10 км над полярными областями и 16–18 км в тропиках, стратосферу – до 45–55 км и выше ионосферу (до нескольких тысяч км). В связи с вращением планеты все слои атмосферы подвижны. Сильные ветры и осадки, в основном связанные с динамикой тропосферы, определяют темпы и характер процессов денудации и эрозии на поверхности Земли. Вертикальная конвекция определяет образование облаков, особенно мощно-кучевых и кучево-дождевых (грозовых).

Ионосфера, или плазменная оболочка Земли, характеризуется довольно высокой плотностью ионов. Отметим, что «динамика ионосферы изменяется с высотой и очень чувствительна к турбулентным и волновым процессам, происходящим в нижних слоях атмосферы» [Хаин, Короновский, 2007, с. 94]. Ионосфера откликается на подготовку и само землетрясение, то есть можно говорить о ее связи с динамикой земной коры и литосферы.

Особо отметим магнитосферу Земли (см. пятую главу). Она обладает асимметричным строением: со стороны Солнца ее толщина достигает до десяти земных радиусов, а с противоположной – 100 и более. Динамика магнитосферы очень ярко выражена и связана с солнечным ветром. Он представляет собой потоки солнечной плазмы, летящие со скоростью 500 км/с, которые обтекают магнитосферу и оказывают на нее давление, сжимая и деформируя.

4.2. Экзогенные процессы в верхней части земной коры

С самыми верхними слоями земной коры и ее поверхностью связаны процессы, называемые экзогенными. Внешняя динамика проявляется в таких процессах, как выветривание (физическое и химическое); деятельность ветра (дефляция и коррозия, эоловая транспортировка и аккумуляция); деятельность морских (абразия), поверхностных (реки, озера) и подземных (карст) вод; разнообразные гравитационные явления на склонах; деятельность снега, подвижного льда и ледников [Короновский, 2006; Якушова и др., 1988 и др.]. Поскольку настоящая работа посвящена геодинамике, ниже рассмотрены только основные экзогенные процессы, способные приводить к большим катастрофам.

Кратко отметим следующее. Физическое выветривание может быть температурным или механическим. Последний вид может происходить под действием агентов, например, замерзающей воды. Говоря же о химическом выветривании, надо заметить, что главными факторами его являются вода, кислород, углекислота и органические кислоты. Одни из самых распространенных и изученных экзогенных процессов – плоскостной склоновый сток и русловые потоки.

4.3. Экзогенные катастрофы, связанные с гравитационными процессами

Первоначально рассмотрим гравитационные процессы, а затем водно-гравитационные, гравитационно-водные, подводно-гравитационные, лавины, сели и их механизм, а также меры борьбы с этими видами катастроф. Раздел изложен в основном по работе А. Ф. Якушовой, В. Е. Хаина и В. И. Славина [1988].

4.3.1. Виды гравитационных процессов и причины связанных с ними экзогенных катастроф

Гравитационные, или так называемые склоновые, процессы проявляются в перемещении горных пород и рыхлых отложений на склонах под влиянием силы тяжести. Известно, что горные породы обычно находятся на поверхности Земли в устойчивом равновесии. Но когда они контактируют с пограничной воздушной или водной средой, то могут выходить из равновесия. Его нарушение может произойти из-за землетрясения, дополнительной нагрузки на склон или его подрезания рекой (эрозия), морем (абразия) или благодаря деятельности человека. Это может происходить быстро, почти мгновенно (обвалы, камнепад, осыпи), но могут иметь место и медленные движения, называемые крипом (англ. *to creep* – ползти, скользить) или длительной ползучестью. С помощью последнего объясняют разрядку напряжений в коре и верхней мантии без землетрясения.

С учетом аквального (вода) фактора склоновые процессы можно разделить на собственно гравитационные, водно-гравитационные, гравитационно-водные и подводно-гравитационные.

4.3.2. Собственно гравитационные процессы

Среди этих процессов можно выделить три группы: а) провальную; б) обвальную; в) криповую. При этом первые обычно происходят достаточно быстро, последние – медленно. Для провалов предварительным условием является наличие подземных пустот и полостей (карст), куда под действием силы тяжести или землетрясения (триггер или спусковой механизм) породы, нависающие над полостями, проваливаются. Они характерны для карстовых полей и районов подземной добычи полезных ископаемых (каменный уголь, соль, руды, нефть и др.).

Обвалы происходят на крутых, обрывистых склонах. Сначала у его бровки возникают трещины отпора, которые со временем под воздействием физического выветривания расширяются и углубляются. Ограниченный ими блок наклоняется в сторону склона, отрывается и опрокидывается. При падении его породы обычно дробятся, формируя обвальный коллювий в основании склона (рис. 4.1). Но иногда бывают обвалы крупных глыб и целых массивов. Один из хрестоматийных примеров такого обвала произошел на Памире в 1911 году, когда одновременно рухнула глыба пород массой 8 млрд. тонн, перегородившая р. Мургаб плотиной высотой 600 м. Он был вызван землетрясением, что является частым явлением в сейсмоактивных регионах.

Таким же ярким примером является обвал в 1984 году в Крыму части горы Демерджи длиной 460 и шириной 300–400 м. Обвальное тело образовало плоский конус шириной 900 м в ее основании. Обвал снес расположенные у подножия горы несколько домов в одноименном селе [Якушова и др., 1988]. В горах обвальные массы иногда приобретают значительную скорость и способны подняться на противоположный склон речной долины. Объясняют это захватом воздуха, когда обломочная масса скользит по нему, как по воздушной подушке. И кроме того, там распространены камнепады (движение по склону отдельных камней и глыб) и осыпи (смещение щебня и дресвы).

4.3.3. Водно-гравитационные процессы

Одним из основных результатов водно-гравитационного процесса являются оползни, которые образуются вследствие связанного перемещения горных пород и масс рыхлых отложений по склонам. Оползни приводят к относительно быстрому (иногда менее 15 минут) разрушению склона. Медленное (см/год) смещение масс на склонах называют крипом или ползучестью. Предложены различные классификации наземных и позднее подводных оползней. Так, Гейм [1932] разделил оползни в основном по слагающему их материалу (рыхлые грунты, скальные породы). При этом важно знать, образовалась ли поверхность скольжения во время скольжения или она существовала ранее (разновозрастные, составные оползни). Заруба и Менкл [1969] классифицировали оползни в зависимости от материала и глубины поверхности скольжения (подошва оползня). Каменов и др. [1971] разделили оползни по глубине поверхности скольжения. Немкок и др. [1972] классифицировали склоновые движения по скорости (ползучесть, скольжение, течение и обрушение). Одна из возможных схем строения оползня скальных пород представлена на рис. 4.1.

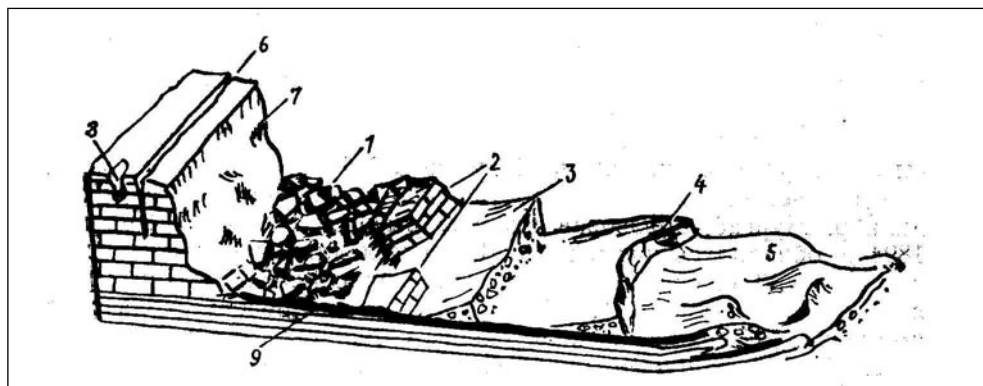


Рис. 4.1. Типы коллювиальных тел [Якушова и др., 1988]:

- 1 — обвальное; 2 — блоково-оползневое; 3 — террасовидное;
4 — цирковое; 5 — бугры выпирания; 6 — трещина отрыва;
7 — стенка отрыва; 8 — провал; 9 — ложе оползня.

Описанное тело сползает по глинистым породам (водоупор) с обводненной (смазка) кровлей. Грунтовая или дождевая вода заметно снижает сцепление между ложем и оползнем, способствуя его смещению вниз по уклону, поэтому оползни следует рассматривать как водно-гравитационные явления. В течение года они могут сместиться на расстояние от 0,1 до 100 м. Так, в конце 80-х годов прошлого века в Дагестане блоковый оползень в 200 млн. куб. м сполз на 2 км.

Оползни распространены практически во всех регионах, в том числе и на Сахалине. Они наносят большой вред народному хозяйству, уничтожая пахотные земли, постройки, мосты и дороги.

4.3.4. Гравитационно-водные процессы

Согласно названию, к этим процессам относятся те, в формировании которых основную роль играет вода, а твердые частицы в ней во взвешенном состоянии. Среди них различают оползни-потоки, сели или грязекаменные потоки, лахары (см. третью главу) на суше, подводные турбидитные и обломочные потоки по каньонам.

Оползни-потоки связаны с избыточной (снеготаяние, сильные продолжительные дожди) водонасыщенностью рыхлых склоновых отложений, когда сцепление между частицами ослабляется и они способны течь вниз по уклону. В оползне-потоке основная масса вещества теряет первичную текстуру, и поэтому после отложения и высыхания она приобретает новую. Поверхность потока бугристая. Оползни-потоки напоминают по форме языки, что сближает их с горно-долинными ледниками (глетчерные оползни).

Сели, или селевые потоки, распространены в горах и предгорьях и давно изучаются. По-арабски «сель» означает бурный поток. Их классификация основана на различии размеров переносимого материала. Так, грязекаменные сели в равной степени насыщены мелкими и крупными обломками. В водно-каменных селях преобладают крупные обломки, ва-

луны, глыбы. Грязевые потоки в основном насыщены глинистыми частицами. Характерными особенностями селей являются большая скорость и внезапность появления. При движении селя грубообломочный материал концентрируется в его фронтальной части. Образование селей в основном связывают с сильными продолжительными дождями и запасом рыхлого, обломочного материала в речном бассейне, поэтому селевые отложения заполняют предгорные и межгорные впадины. Нередко сели могут быть инициированы землетрясениями, например, Хаитский сель, вызванный землетрясением в 1949 году (Средняя Азия). Он уничтожил село Хаит, а мощность его наносов достигла 60 м.

Сели на Сахалине и Курилах представляют особый интерес, поскольку это сейсмоактивный регион с муссонным климатом и тайфунами, несущими обильные осадки. Селевые комплексы на Курилах в основном распространены на Парамушире [Казаков, 1997]. Они прорезают прибрежные уступы и по объему невелики (10–15 тыс. куб. м). Еще меньше объем селей на Шикотане (5 тыс. куб. м). По Н. А. Казакову [1997], межселевой интервал для курильских селей объемом более 10 тыс. куб. м составляет 50–100 лет. Обычно они связаны со снеготаянием в мае–июне и продолжительными дождями в июле–октябре.

4.3.5. Подводно-гравитационные процессы

Объединяют широкий круг экзогенных процессов на подводных склонах, лучше изученных геолого-геофизическими методами на континентальных окраинах Атлантики, Индийского и Тихого океанов. Неплохо изучены блоковые оползни и оползни-потоки, нередко имеющие гигантские размеры, а также отложения обломочных и турбидитных (мутевых) потоков обычно с градиационной слоистостью и циклическим строением (дебриты и турбидиты соответственно). Блоковые оползни в основном картированы на открытых склонах, в меньшей степени в подводных каньонах. Дебреты и турбидиты формируют глубоководные конуса выноса в устьях каньонов. Протяженность конусов иногда достигает 2 000–4 000 км (Бенгальский конус). Спуск механизмы подводных оползней в основном связаны с землетрясениями и глубинной эрозией в каньонах, когда происходит подрезание их склонов и возникают так называемые висячие оползни кайнозойских осадков (Камчатский каньон, по данным В. Л. Ломтева). Стеkanie молодых неконсолидированных донных осадков на сверхмалых ($0,1^\circ$ по К. Льюису) уклонах дна обнаружено на внешнем крае авандельты Миссисипи. Одна из нерешенных проблем – возможность и особенности трансформации оползневых масс во время движения в подводные лавины, обломочные и турбидитные потоки и, следовательно, защита подводных линий связи (окрестности Большой Ньюфаундлендской банки, землетрясение 1929 года, повлекшее обрыв телеграфных кабелей, описанный в литературе) или устьевого оборудования глубоких нефтяных и газовых скважин (Бразилия, Мексиканский залив).

4.3.6. Меры борьбы с гравитационными явлениями

В основном такие меры проводятся в районах частого схода оползней и обвалов для защиты населенных пунктов, особенно крупных (Сочи

и др.), объектов промышленной и транспортной инфраструктуры. Они в большей мере ориентированы на различные методы укрепления склонов и их последующий мониторинг (закрепленные металлические сетки, подпорные стенки, высадка кустарников и деревьев и др.).

4.3.7. Меры борьбы с селевыми потоками

В основном они связаны с укреплением склонов в водосборных бассейнах селеопасных рек (высадка кустарников и деревьев). Для защиты крупных городов, например, Алма-Аты, пришлось строить большую плотину на р. Малая Алмаатинка. «Сели на Алмаатинке – явление частое: сели средней силы происходят там раз в 5 лет, а гигантские, аналогичные образовавшемуся в 1921 г., – раз в 100 лет. В 1966 г. путем крупного взрыва в долину Малой Алмаатинки было отвалено более 2 млн. куб. м горных пород и образована плотина высотой 65 м и шириной (в основании) около 400 м. Но и эта плотина могла не выдержать мощного натиска селя, в связи с чем в 1967 году плотину нарастили до высоты 93 м. Ширина плотины на вершине теперь достигает 60 м при ширине у подножья 450 м. Эта плотина сдержала селя в 1973 году, но он заполнил долину на три четверти высоты плотины, поэтому плотину еще нарастили до 145 м» [Якушова и др., 1988, с. 282]. Автор неоднократно имел возможность оценить новую плотину после реконструкции и образованное в ущелье Медео водохранилище и одноименный высокогорный каток.

4.4. Катастрофы, связанные с лавинами

4.4.1. Общие данные о катастрофах, связанных с лавинами

Крупные снежные лавины являются распространенным типом природных катастроф в горах. Раз в 50 лет сходят огромные лавины. За год от них гибнет около 100 человек. Но бывают случаи гибели и большого числа людей. Так, во время похода Ганнибала погибло от лавин 18 тыс. солдат, а в 1916 году в Тироле (Австрия) 80 тыс. солдат нашли свою смерть от лавины, которую они же и спустили. В 1911 году в штате Вашингтон (США) лавина погребла три поезда и унесла жизни 129 человек. В наше время, когда зимний спорт привлекает многих людей, далеко не все из них знают о снежных лавинах и нередко становятся их жертвами.

4.4.2. Особенности лавин на Сахалине и Курилах

Отметим некоторые особенности лавин на Сахалине и Курилах. По лавиноопасности Сахалин занимает первое место в России. Здесь они сходят в 42 населенных пунктах, в том числе в г. Невельске, Холмске, Корсакове. В окрестностях Южно-Сахалинска лавиноопасны гора Российская и верховья р. Рогатка. Лавины на Сахалине сходят на юге с ноября по апрель, в Восточно-Сахалинских горах – в октябре–мае. Лавиноопасный период на Северных Курилах длится с ноября по май, на Южных – с декабря по апрель. Лавины максимального объема сходят в конце февраля – начале марта, на северных островах – в декабре–январе. Объемы лавин достигают 200 тыс. куб. м на юге в районе Южно-Сахалинска и Сусунайского хребта, а в Восточно-Сахалинских горах – 800 тыс. куб. м [Иванов, 1991].

Пробег лавин достигает трех километров. Почти ежегодно есть жертвы. В 1945 году в пос. Октябрьский Александровск-Сахалинского района лавина разрушила девять двухэтажных домов, погибло 149 человек (объем лавины – около 150 тыс. куб. м). В Северо-Курильске лавина с вулкана Эбеко снесла до основания больницу, остался один фундамент, погибли все. В этой связи на Сахалине и Северных Курилах (начиная с 1965 года) осуществляется комплексная программа по исследованию снежных лавин, опасности, разработке и внедрению противолавинных мероприятий, организована служба наблюдений на семи снеголавинных станциях.

Относительно районирования горных территорий Сахалина и Курильских островов можно отметить, что они относятся к умеренному типу, тихоокеанскому подтипу лавинного режима [Древило, Казаков, 1997]. Отмечено, что сход крупных лавин с предельной дальностью выброса обусловлен не только сильными снегопадами, но и метаморфизмом снежной толщи с появлением в ней лавиноопасных слоев. Важную роль играет и рельеф Курильских островов. Так, С. П. Жируев и В. И. Окопный [1997] пишут, здесь «характерны следующие геоморфологические структуры: 1. Вулканические хребты и массивы представлены отдельными конусами вулканов с абсолютными высотами до 2 300 м (вулкан Алайд) и глубоко расчлененными эрозией вулканическими образованиями. Здесь формируются лавины максимальных объемов: до 1 млн. куб. метров. 2. Для холмисто-волнистых возвышенностей и лавовых плато лавиноопасными являются их крутые нерасчлененные склоны и эрозионные врезы. Объемы лавин могут достигать 100–150 тыс. куб. метров. 3. Со склонов морских террас и равнин сходят лавины объемом до 50 тыс. куб. метров.

Многообразие форм рельефа и сложный климатический режим создают условия для формирования лавин всех типов, свойственных для всех горных стран» [с. 89].

Замечено, что снежные лавины возникают на открытых травянистых склонах крутизной 25–60°. В лесу на склонах, поросших кустарником, и скальных выступах лавины образуются редко. Одиночные деревья не препятствуют возникновению лавин. На южных склонах в начале зимы лавин меньше, снег там быстрее уплотняется и оседает, но в конце зимы они становятся лавиноопасны из-за таяния снега и потери устойчивости.

Различают два основных типа лавин: I – пылевые; II – пластовые.

Лавины пылевые образуются бесформенной смесью снежной пыли. Между смещающимся и подстилающим снегом нет плоскости скольжения. Снизу добавляется все новый и новый снег, и лавина растет. Такие лавины часто возникают в одном месте или на ограниченном участке.

Лавины пластовые отделены плоскостью скольжения от основания. Они возникают, как и оползни, вдоль поверхности отрыва и оползают в виде пласта по нижележащим напластованиям снега и по коренному склону. Такие лавины более опасны, чем пылевые, и по форме делятся на лотковые, скатывающиеся по ложбинам (лоткам), и плоские осы, смещающиеся по ровным, открытым склонам.

Скорость снежных лавин колеблется в широком диапазоне. Быстрее движутся пылевые лавины, развивающие скорость до 120–360 км/ч, тогда как осы смещаются медленнее (25–36 км/ч).

Возникновение лавин. Их связывают с гравитационной неустойчивостью снежных масс на крутых склонах, перекристаллизацией снега на глубине с образованием потенциальной плоскости скольжения, сотрясениями, в том числе сейсмическими (иногда камень, упавший на снежный склон, может вызвать лавину).

4.4.3. Механизм лавин

Многие исследователи гравитационных процессов на склонах считают, что с точки зрения механики снежные лавины подобны оползням. Снежная лавина представляет собой смесь кристалликов снега и воздуха. После выпадения снег быстро меняет свойства, подвергаясь метаморфизму. Его кристаллики растут, пористость снежной массы уменьшается, и на некоторой глубине может возникнуть потенциальная поверхность скольжения с ослабленным сцеплением.

По этим вопросам Т. К. Злобин и Н. А. Казаков в отчете «Исследования строения и динамики литосферы Сахалина и Курил и связанных с ними природных катастроф», выполненном СахГУ по проекту фундаментальных исследований Министерства образования в 2000 году, отмечали следующее. Механизм активизации лавинного процесса при флуктуациях сейсмического фона может быть описан в рамках представлений о снежном пласте как диссипативной системе, в которой происходит непрерывный процесс самоорганизации упорядоченных структур. На одной из стадий этого процесса происходит самоорганизация *временной периодической структуры* снежной толщи [Казаков, 2000], возникающей в результате нелинейных автоколебаний снежного пласта. Эта структура представлена системой стоячих поперечных волн, узлы и пучности которых могут занимать в лавиносборе определенное положение. Частотный спектр автоколебаний снежного пласта лежит в интервале от 0,02 до первых Гц и зависит как от размеров снежного слоя, так и от стадии метаморфизма. Резонансное усиление автоколебаний снежного пласта способно привести к его разрушению в зонах концентрации изгибных напряжений и, как следствие, к возникновению лавины. Добавим, что флуктуации сейсмического фона также способны вызвать снежные лавины. По данным наблюдений на Сахалине в 1980–1997 годы метаморфизм снежной толщи является причиной формирования 90 % лавин, объем которых превышает 1000 куб. м. Обязательным условием включения спускового механизма лавин (в том числе при сейсмических колебаниях) является достижение хотя бы одним снежным слоем стадии конструктивного метаморфизма и формирование в слое волокнистой текстуры. Такие слои наименее прочные в снежной толще.

При землетрясениях возникают продольные и поперечные волны, механизмы воздействия которых на снежный покров существенно отличаются. Возбуждение в литосфере или земной коре поперечных волн с частотами, близкими к частотам автоколебаний снежного пласта и совпадающими по фазе, способно привести к возникновению резонанса и разрушению снежного пласта в пучностях его стоячей волны. Прежде всего нас интересуют поверхностные волны Лява и Рэлея, характеризующиеся медленным затуханием при удалении от источника и большими амплитудами. Частотный спектр, формирующий наиболее интенсивную часть акселерограмм

колебаний грунта, лежит в интересующем нас интервале (0,28–7,8 Гц). Следует учесть также тот факт, что наименьшие коэффициенты затухания с расстоянием уровней спектральной плотности ускорений колебаний грунта лежат в инфразвуковой (менее 1 Гц) части спектра [Чернов, 1991].

Помимо частоты колебаний, интерес представляют такие характеристики сейсмических волн, как ускорение и максимальные амплитуды смещений. Они в значительной степени определяют реакцию снежной толщи на внешнее воздействие – от релаксации напряжений в снежном слое до его хрупкого разрушения.

Рассматривая вопрос о возможности образования сейсмогенных лавин, необходимо ответить на вопрос о силе толчков. В свете вышеизложенного с образованием в снежной толще лавиноопасного слоя их сила в районе лавиносбора может не превышать один-два балла (при условии совпадения фаз сейсмической волны и автоколебаний снежного пласта). При выполнении этого условия возможно разрушение пласта при раскачке его даже микросейсмками с частотой 0,15–0,25 Гц и ускорениями до 0,25 см/с². В случае противофазы сейсмической волны амплитуда автоколебаний снежного пласта уменьшается и снежный склон становится более устойчив.

Вопрос о минимальном значении магнитуды землетрясения и максимальном расстоянии от его очага до лавиносбора достаточно сложен. Необходимо учитывать эффект усиления амплитуды сейсмических колебаний среды за счет сейсмической жесткости пород и волноводных эффектов в снежной толще. Дальность распространения сейсмических волн зависит также от критического угла подхода волны [Чернов, 1991]. Анализ материалов наблюдений за лавинами и землетрясениями на Сахалине позволяет выделить ряд случаев совпадения дат схода лавин с датами землетрясений. При этом отмечены следующие закономерности: 1) за период 1928–1996 годы 85,7 % случаев совпадений приходятся на середину декабря – конец марта, когда снежная толща состоит из 10–24 слоев; коэффициенты вторичного расщепления в ней 0,80–0,90, а коэффициенты перекристаллизации – 0,50–0,80; 2) магнитуда в районах лавинообразования в большинстве случаев не превышала 1–3; 3) объемы лавин, инициированных землетрясениями, обычно на порядок выше объемов лавин, сошедших в предшествующий период; 4) в случаях совпадения событий с вероятностью 80 % расстояние от очага землетрясения до лавиносбора варьировало от 20 до 240 км при интенсивности сейсмических колебаний один-три балла. Обращает внимание факт совпадения случаев схода лавин максимальных объемов с расстоянием до очага землетрясения 100–240 км. Такая картина вполне объясняется характером распространения колебаний в низкочастотной части спектра. Максимальное расстояние от лавиносбора до очага землетрясения составляет 350–420 км при магнитудах 7–8 и глубине очага до 30 км; 300–350 км при магнитуде 5–6; не более 240 км при магнитуде 3–4 и глубине очага 15 км.

Отметим, что в ряде районов Сахалина возможно резонансное усиление колебаний сейсмических волн на частотах два-три Гц при больших расстояниях от источника [Чернов, 1991].

За период с 1945 по 1993 год интенсивность землетрясений в горах Сахалина обычно не превышала одного-трех баллов. Однако объем снежных лавин, с большой долей вероятности вызванных землетрясениями,

значительно превышает объемы лавин, сошедших в период, предшествовавший событию. Так, объем лавины, сошедшей в районе Чамгинского перевала (Восточно-Сахалинские горы) 24 апреля 1984 года, составил 40 тыс. куб. м. Объемы лавин, формировавшихся в соседних лавиносборах в период с 16 по 22 апреля и с 24 апреля 1984 года, не превысили 2 тыс. куб. м (в среднем менее 1 тыс. куб. м).

Таким образом, задача снеголавинной службы может быть сведена к регулярным наблюдениям за толщиной снежного покрова на склонах, динамикой его уплотнения и метаморфизма и не выходит за рамки составления специализированного прогноза лавин для групп лавиносборов. Необходимые оценки вероятности схода лавин, сейсмические характеристики могут быть рассчитаны методами, принятыми в сейсмологии.

4.4.4. Защита от лавин

В основном защита от снежных лавин связана с тем, что лавиноопасные склоны в принципе известны по материалам предшествующих наблюдений. Для прогноза лавин значение имеют направление ветра и особенно количество осадков. Так, при выпадении 25 мм свежего снега возникновение лавин возможно, при 55 мм – оно всегда вероятно, а при 100 мм – допускается возможность их возникновения через несколько часов (осадки приведены в миллиметрах эквивалентного слоя воды).

Защита от лавин может быть пассивной и активной. При пассивной защите избегают лавиноопасных склонов, ставят заградительные щиты, высаживают деревья и кустарники. Активная защита заключается в обстреле лавиноопасных склонов с артиллерийских орудий или минометов и принудительном сходе небольших лавин.

Отметим, что даже при незначительной численности населения, например, на Курилах, известны многочисленные случаи попадания людей в снежные лавины с трагическим исходом. Поэтому и необходимы мониторинг лавин и своевременная информированность населения, транспортных и иных организаций.

4.5. Катастрофы на дне океана

На дне океана происходят катастрофы, связанные в основном с подводными оползнями. При оползании молодых осадочных отложений за счет их водонасыщения могут возникнуть обломочный и затем турбидитный потоки, которые перемещаются по континентальному подножию и ложу смежных батимальных и абиссальных котловин на сотни – первые тысячи километров. Известны случаи перемещения оползней на 260 км и на 650 км – в Гранд Бэнксе. Последний случай, имевший место 18 ноября 1929 года в окрестности Ньюфаундлендской банки, стал классическим. Сначала здесь произошло ощутимое землетрясение, затем возник крупный подводный оползень, видимо, трансформировавшийся в обломочный поток, разорвавший несколько трансатлантических телеграфных кабелей. Интересно, что в Татарском проливе в 2008 году разорван телефонный оптоволоконный кабель, следующий через Сахалин на материковую часть России, но о причинах пока не сообщалось.

ГЛАВА 5. ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ

В настоящей главе рассмотрим гидросферу, процессы, проявляющиеся в ней, и связанные с ними катастрофические явления (цунами, штормовые нагоны, наводнения).

5.1. Общие сведения

К гидросфере, или водной оболочке Земли, относят водные массы океанов, морей, озера, болота, реки, искусственные водоемы, льды Антарктиды и Гренландии, вечную мерзлоту. По данным Р. К. Баландина [1982], гидросфера распределяется так: Мировой океан – $1,37 \cdot 10^9$ куб. км, подземные воды – $6 \cdot 10^7$ куб. км, реки – $1,2 \cdot 10^3$ куб. км, атмосфера – $1,4 \cdot 10^4$ куб. км. Интенсивный обмен идет между атмосферными водами ($5,25 \cdot 10^5$ куб. км в год) и Мировым океаном ($4,25 \cdot 10^5$ куб. км в год). Суммарный речной сток в течение года достигает 50 тыс. куб. км [Косыгин, 1988]. Объем воды в озерах составляет 176–275 тыс. куб. км при площади их в миллионы квадратных километров. В водохранилищах сосредоточено 6 тыс. куб. км. Крупнейшими озерами-морями являются Каспийское, Аральское, а также пресноводные озера Байкал, Верхнее, Виктория, Гурон, Мичиган, Танганьика и др. В Байкале сосредоточено 234 тыс. куб. км воды. Общая площадь болот – 3 млн. кв. км., объем воды в них равен 12 000 куб. км. Большая часть гидросферы, особенно в нашей стране, относится к *криосфере*, включающей ледниковые и снежные покровы, подземные льды (вечная и сезонная мерзлота), морские льды и айсберги. Объем криосферы оценивается в 25 млн. куб. км, причем ледники составляют 16,2 млн. кв. км. Соотношение между криосферой и гидросферой меняется в связи с парниковым эффектом.

Гидросфера является одной из наиболее динамичных сфер Земли. Поэтому в ней происходит немало процессов, относящихся к природным катастрофам. Ими являются цунами, волны-убийцы, моретрясения, зоны кавитации, штормовые нагоны, приливы, паводки и наводнения.

5.2. Цунами

Такое опасное явление, как цунами, тесно связано с землетрясениями, оползнями и извержениями вулканов. Охарактеризуем кратко природу цунами, особенности проявления и меры защиты.

5.2.1. Общие сведения

Цунами – переводится с японского языка как «большая волна в гавани». Широко распространенный научный термин для их обозначения – «сейсмические морские волны-цунами». Однако он не включает метеоцунами, поэтому Ван Дорн [1968] дал расширенное толкование: «Цунами – это

японское название системы гравитационных волн, возникающих в море вследствие крупномасштабных непродолжительных возмущений свободной поверхности».

Прежде всего отметим основные физические особенности (характеристики) этих волн, причины их возникновения, а затем – разрушительные последствия. Основным параметр волны – *скорость* распространения. Она характеризуется глубиной океана и определяется по формуле Лагранжа, приведенной ниже. В открытом океане скорость достигает 700–800 км/час. За счет уменьшения скорости распространения цунами на шельфе и в прибрежной зоне происходит резкое увеличение *высоты волны*, которая в некоторых случаях достигает 20–40 м.

Дальность пробега волн такова, что они способны пересечь весь Тихий океан, а также Индийский и дойти до Атлантического, то есть на тысячи километров. Количество волн обычно бывает три-пять при длине до 400 км. Основной диапазон периодов – 10–40 минут.

На морских побережьях цунами было известно более 2 000–2 500 лет назад. Рассказы очевидцев с тех времен передавались как легенды, а 2 500 лет назад появились и письменные свидетельства. Согласно одному из них, от цунами погибла легендарная Атлантида.

Представление о десяти последних катастрофических цунами, происшедших с 1992 по 2004 год, дает таблица 5.1 (из работы Левина, Носова, 2005).

Таблица 5.1.

№	Дата	M*	H** _{max} , М	Количество жертв	Район события
1	12/12/1992	7,5	26,2	1500	Индонезия, Флорес
2	12/07/1993	7,7	31,7	330	Япония, Окушири
3	02/06/1994	7,8	13,0	250	Индонезия, Ява
4	04/10/1994	8,3	10,4	11***	Россия, Шикотан
5	14/05/1995	6,9	4,0	11	Индонезия, Тимор
6	17/02/1996	8,1	7,7	96	Индонезия, Ириан Джая
7	17/07/1998	7,1	10	2182	Папуа, Новая Гвинея
8	17/08/1999	7,4	2,5	10000***	Турция, Измир
9	23/06/2001	8,1	10	50	Перу
10	26/12/2004	9,3 (M _w)	36	300000	Индийский океан, Суматра

* – магнитуа землетрясения

** – максимальная высота волн

*** – включая жертвы землетрясения

В Европе одним из первых самых значительных документированных событий было катастрофическое цунами в 1755 году в результате сильнейшего Лиссабонского землетрясения (Португалия). Оно привело к гибели более 50 тыс. человек. В России самым катастрофическим было Камчатское цунами 1952 года, обрушившееся на Северные Курилы и Камчатку. Оно практически смыло город Северо-Курильск и погубило 2 336 человек (по опубликованным данным). Однако, как свидетельствовали Б. И. Пийп и А. Я. Светловский (камчатские вулканологи), обследовавшие Северо-Курильск сразу после цунами, число погибших составляло несколько десятков тысяч.

Наибольшее число жертв было вызвано крупнейшим цунами 26 декабря 2004 года. Оно произошло после Суматра-Андаманского мегаземлетрясения с магнитудой 9,3. Причиной его были тектонические движения на границе Индийской и Бирманской плит. В результате этого цунами погибло более 230 тыс. человек, а по некоторым оценкам – около 300 тыс. Это цунами обрушилось на Индонезийский архипелаг и прошло по 12 странам мира в бассейне Индийского океана. Упомянутое число погибших превысило число жертв от всех цунами за 300-летнюю историю наблюдений.

Представление об этом цунами дают запись на рис. 5.1 и карта северо-восточной части Индийского океана с изохронами, показывающими расчетное положение его фронтов (рис. 5.2).

В целом в последние три столетия на Земле многими специалистами отмечались как крупные следующие цунами: 1737 год, Камчатка, Курилы, Сахалин, высота волны – свыше 20 м, сотни погибших; 1755 год, Лиссабон, высота волны – 15 м, 50 тыс. человек; 1872 год, Бенгальский залив,

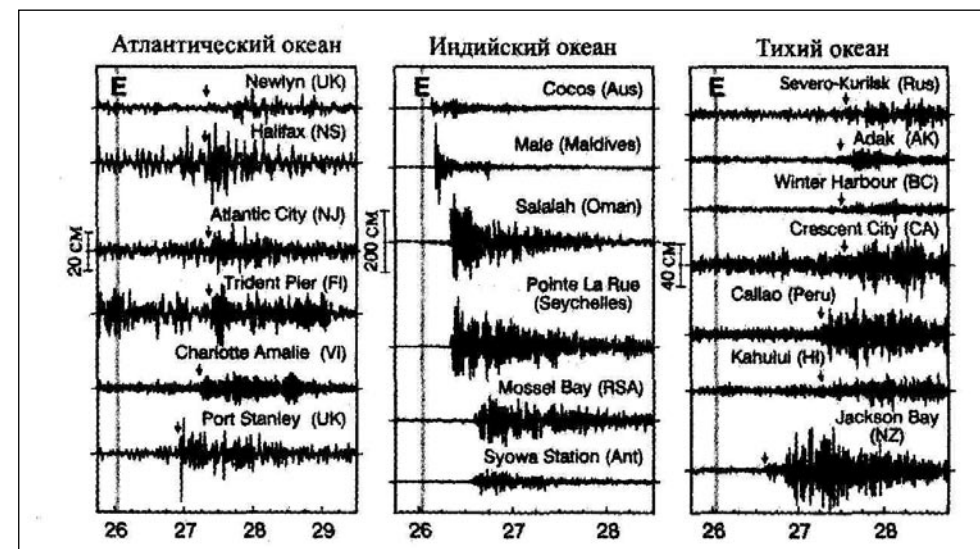


Рис. 5.1. Запись волн-цунами, вызванных землетрясением 26 декабря 2004 г. [Titov et., 2005 et., 2005]. Момент землетрясения отмечен символом «Е». Стрелками показаны времена вступлений лидирующей волны-цунами.

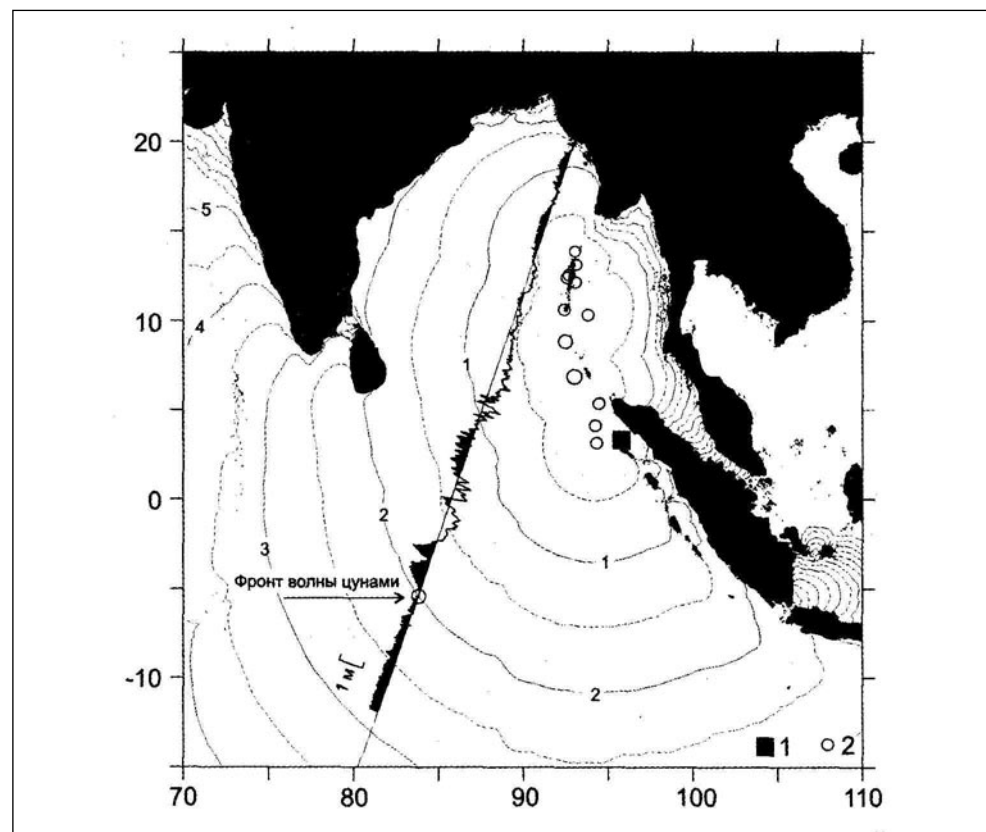


Рис. 5.2. Карта северо-восточной части Индийского океана с изохронами, показывающими расчетное положение фронта цунами 24 декабря 2004 г. с интервалом 0,5 часа [Куликов и др., 2005]: 1 – эпицентр главного землетрясения; 2 – эпицентры основных афтершоков. Трасса спутника JASON-1 (виток 109–129) и вдоль нее – профиль уровня океана по данным альтиметрии.

высота волны – 20 м, погибло 20 тыс. человек; 1883 год, Кракатау, высота волны – 35–40 м, погибло 36 тыс. человек; 1896 год, Санрику, Япония, высота волны – 15 м, погибло более 27 тыс. человек; 1908 год, Сицилия, высота волны – 10 м, погибло от цунами и землетрясения 80 тыс. человек; 1937 год, Санрику, Япония, высота волны – 8 м, погибло около 3 тыс. человек; 1944 год, Ронанкай, Япония, высота волны – более 10 м, погибло около тысячи человек; 1946 год, Гавайи, высота волны – 120 м, погибло 156 человек; 1952 год, Камчатка, Курилы, Япония, высота волны – 8–18 м, скорость – более 500 км/час, погибло 2336 человек; 1953 год, Аляска, высота волны – 17–35 м, десятки погибших; 1960 год, Чили, три группы волн со скоростью 700 км/час, более 200 погибших; 1979 год, Колумбия, высота волны – 5 м, погибло 125 человек; 1986 год, Гавайи, высота волны – до 20 м, погибло 26 тыс. человек; 2004 год, Индонезия, высота волн – до 35 м, погибло около 300 тыс. человек.

Общее распределение цунами таково: Тихий океан – 75 %; Атлантика – 9 %; Индийский океан – 3 %; Средиземное море – 12 %; прочие моря – 1 %.

На территории России (и бывшего СССР) цунами в основном проявляются на побережьях Камчатки, Курил, Командорских островов, частично Сахалина и Приморья. Изучению этих волн были посвящены многочисленные работы, прежде всего, сахалинских ученых С. Л. Соловьева, Б. В. Левина, В. В. Ефимова, А. А. Поплавского, Го Ч. Н., В. А. Куликова, А. Б. Рабиновича, В. М. Жака, В. М. Кайстренко, П. Д. Ковалева и многих других [Соловьев, 1968; Соловьев, Го, 1974; Жак, Соловьев, 1971; Кайстренко, 1997, 1998; Ковалев, 1993; Левин, 2005].

Известны также цунами в Черном море. Так, 12 июля 1966 года произошло землетрясение с эпицентром около Анапы. Образовавшееся в результате землетрясения цунами можно считать третьим из известных в Черном море. Два предыдущих были 4 и 21 октября 1905 года. Есть информация и о более ранних цунами в Крыму в 1869, 1908, 1919, 1927 годах.

За последние 50 лет на Курилах Н. А. Щетников [1981] и другие авторы выделяют следующие основные цунами: Камчатское (Северо-Курильское) 05.11.1952 г., $M=8,2$; Урупское 13.10.1963 г., $M=8,1$; Аляскинское 28.03.1964 г., $M=8,3$; Шикотанское 11.08.1969 г., $M=8,2$; Монеронское 06.09.1971 г., $M=7,2$; Шикотанское 04.10.1994 г., $M=8,1$; Симуширское 15.10.2007 г., $M=8,3$.

Всего с начала XVII века по 2007 год на тихоокеанском побережье СССР было более 60 цунами, в том числе 30 разрушительных. В среднем получается одно цунами в пять лет. Есть также цунами в Японском море, отмеченные на побережье западного Сахалина 29 сентября 1878 года с очагом в Татарском проливе (Дуз), 15 марта 1924 года с очагом в том же проливе (Углегорск), 1 августа 1940 года с очагом в Японском море, 6 сентября 1971 года с очагом в районе острова Монерон. Также известны такие цунами, как Ниигатское 1964 года, Алеутское 1983-го и Окуширское 1993 года.

В целом в Тихом океане повторяемость цунами отражена ниже на рис. 5.3.

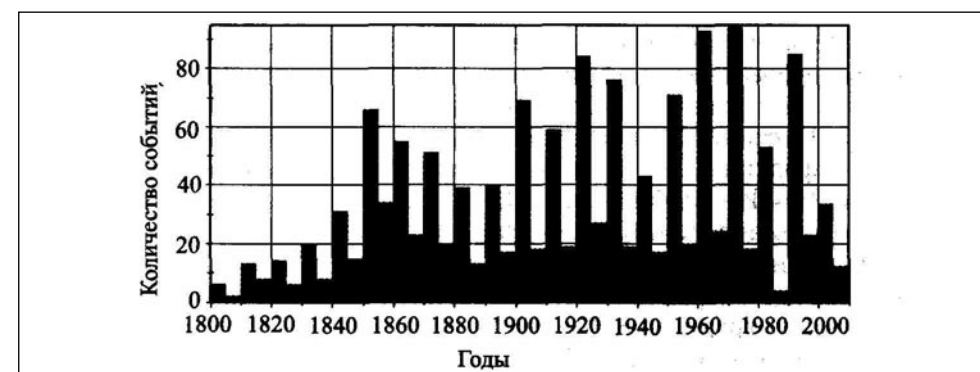


Рис. 5.3. Повторяемость цунами (число событий за 10 лет) в Тихоокеанском регионе за период с 1800 по 2005 г. Вертикальными черными полосами показаны все известные цунами, залитые черным цветом – цунами с интенсивностью по шкале Соловьева – Имамуры $I \geq 1$ [Левин, Носов, 2005].

Цунами Сахалино-Курильского региона можно подразделить на *три типа*: 1 – далекие (океанические); 2 – морские, то есть такие, очаг которых расположен в Охотском или Японском морях; 3 – близкие океанические (местные). В этом разделении важным является то, что цунами *первого типа* имеют далекий очаг, достаточное время пробега и информация о них может быть получена заблаговременно от японских или американских станций наблюдений. Такие волны, подходящие к Курилам с востока, могут иметь высоту заплеска ~ 10 м.

Непосредственно на Курилах расчетная высота цунами *первого типа* повторяемостью не реже одного раза в 100 лет следующая: Шикотан – 7, Кунашир – 4, Итуруп (центр и север) – 8 и 10, Уруп (юг и север) – 17 и 8, Симушир – 9, Матуа – 10, Шиадокотан – 14, Онекотан – 12, Парамушир (север) – 18, Шумшу (север) – 17 м [Иващенко, Ким, 1993].

Волны *второго типа* характеризуются тем, что их очаг находится в Охотском море. Они будут приходить к Курилам с запада и иметь максимальную высоту заплеска до 5 м.

Помимо далеких океанских и охотоморских цунами можно выделить *третий*, самый главный для нас тип – местные цунами. Они могут быть связаны с неглубокими землетрясениями в Курило-Камчатской зоне и наиболее опасны тем, что их очаги находятся на незначительном расстоянии и, соответственно, имеют малое время пробега волны.

Для классификации цунами применялись разные шкалы интенсивности, например, Зибберга – Амбразейса. Она была разработана в 1927 году Зиббергом [Sieberg, 1927], а затем модифицирована Амбразейсом [Ambraseys, 1962]. Позднее Имамура ввел, а Иида усовершенствовал определение силы цунами, предложив определять ее по формуле:

$$m = \log_2 H_{\max}, \quad (5.1)$$

где $H_{\max}$ – максимальная высота волны в метрах, наблюдаемая на побережье или измеряемая мареографами. Эта первая шкала была шестибальной.

Во второй шкале интенсивности цунами Пападопулоса–Имамуры было выделено 12 баллов. Впоследствии ее модифицировали С. Л. Соловьев, Абе и Хатори. Согласно С. Л. Соловьеву [Soloviev, 1970], она определяется по формуле:

$$I = \frac{1}{2} + \log_2 H, \quad (5.2)$$

где H – средняя высота цунами на побережье.

Сходная формула предлагается и в работе Murty, Loomis, 1980.

5.2.2. Причины возникновения цунами

По результатам многолетних исследований и наблюдений цунами вызывают землетрясения, оползни, вулканические извержения, обрушения края ледника, глубокие подвижные циклоны (метеоцунами), падение космических тел (см. ниже).

5.2.2.1. Землетрясения

Землетрясения являются причиной цунами в 79 % случаев. Землетрясения, в свою очередь, происходят в результате тектонических движений, связанных главным образом с литосферными плитами, как это было и при крупнейшем Суматро-Андаманском землетрясении 26 декабря 2004 года с длиной сейсморазрыва 1200 км [Ребецкий, Маринин, 2006 и др.].

При этом цунами возбуждаются в большинстве случаев землетрясениями с магнитудой равной или более 8,0. Могут возникнуть цунами и при магнитуде меньше 8, например, при $M > 7$. Именно данная величина принята в качестве пороговой магнитуды для объявления тревоги цунами, хотя при этом существенна вероятность ложной тревоги.

В цунами выделяют три стадии: генерацию волны, ее распространение в открытом океане и взаимодействие с берегом (накат). Землетрясения вызывают цунами только при мгновенных смещениях дна, приводящих в движение водные массы. Однако не каждое землетрясение способно вызывать цунами, даже если оно довольно сильное.

Назовем *четыре условия* образования цунами.

1. Очаг расположен под дном моря или океана (бывает, правда редко, несовпадение очагов землетрясения и цунами) или в сравнительной близости от тех крупных блоков земной коры, которые, смещаясь вследствие землетрясения в горизонтальном направлении в сторону океана, соприкасаются с водными толщами.

2. Над эпицентральной областью землетрясения находится слой воды значительной мощности.

3. Глубина очага землетрясений не велика (10–60 км).

4. Землетрясение должно быть большой силы (если речь идет об оползне или обвале, то масса пород, участвующая в образовании цунами, должна иметь достаточно большой объем).

Наиболее разрушительной силой обладают, как правило, цунами с очагами в глубоководных зонах. Можно рассчитать основные параметры возможного цунами по следующим *основным расчетным формулам*.

В открытом океане цунами невысоки (при самых сильных землетрясениях предположительно не превышают двух-трех метров), имеют длину 200–300 км и скорость 750–1000 км/час. Скорость движения волны определяется по формуле Лагранжа [Мурти, 1981]:

$$V = \sqrt{gh}, \quad (5.3)$$

где g – ускорение силы тяжести, h – глубина бассейна в месте определения скорости.

Исходя из нее, видим, что при глубине моря в эпицентре 5000 м скорость волны составляет около 800 км/час, а при глубине 200 м падает до 152 км/час, а при меньшей глубине моря – и еще меньше.

Таким образом, при подходе к берегу в зависимости от прибрежного рельефа дна и конфигурации береговой линии высота цунами растет от одного-двух метров высоты в открытом океане до нескольких десятков на берегу. Увеличение высоты связано в основном с уменьшением глубины океана и может быть вычислено по формуле Эри – Грина [Мурти, 1981]:

$$h_m = h_g \sqrt[4]{\frac{H_g}{H_m}}, \quad (5.4)$$

где h_m – высота волны на мелководье глубиной, H_m , h_g – высота волны на глубине H_g .

Преобразование и рост волны начинается от внешнего края шельфа на глубинах менее 200 и происходит наиболее интенсивно на взморье с глубин 10–15 м. Попадая в мелководную прибрежную зону, волна деформируется: растет ее высота с одновременным увеличением крутизны переднего фронта. С приближением к берегу она начинает опрокидываться, создавая бурлящий водяной поток, который при выходе на берег и производит разрушения на нем (заплеск). Можно проследить динамику изменения высоты волны. Несложные расчеты по этой формуле показывают следующее. При высоте волны в море 2,5 м и глубине моря в очаге 5000 м высота волны на взморье глубиной в 50 м составит 7,9 м. С приближением к берегу ее высота на глубине 10 м составит уже 11,8 м, а на глубине 1 м высота волны будет уже 21 м. Приведенный пример показывает, как растет высота волны при приближении к берегу и уменьшении глубины моря.

Распространение волны-цунами от источника и динамику волнового возмущения на больших временах можно видеть на рис. 5.4.

Разрушительная сила цунами также зависит от рельефа и конфигурации береговой линии. При очень крутых уклонах дна и прямолинейных берегах,

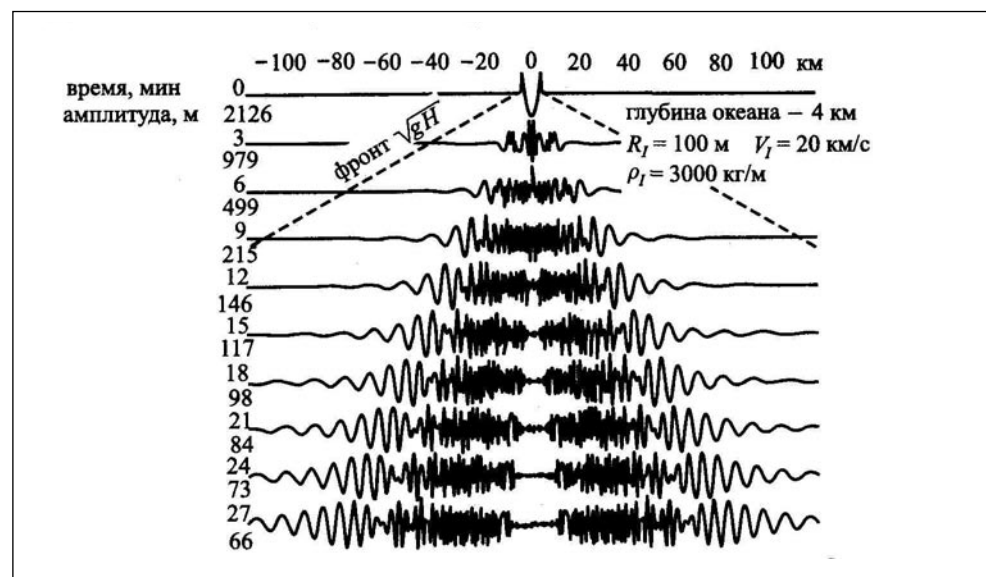


Рис. 5.4. Динамика волнового возмущения на больших временах [Левин, Носов, 2005]. Основа рисунка заимствована из статьи «Ward and Asphaug», 2000.

а также на участках с достаточно высокими берегами цунами вырастает не сильно и не причиняет сколько-нибудь значительных разрушений. Особую опасность представляют собой *суживающиеся* бухты и проливы, в которых происходит значительное увеличение высоты, а, стало быть, возрастает и разрушительное действие волн. При этом в случае низменного побережья волны затапливают большие участки суши, сметая все на своем пути.

Особую опасность представляют собой цунами для районов устья рек, по которым волна может проникать вглубь территории на расстояние несколько километров. Уменьшается высота волн только в закрытых, расширяющихся бухтах с узким входом.

Выше мы назвали только самые основные формулы определения главных параметров цунами: скорости движения волны по Лагранжа и высоты ее по формуле Эри-Грина и привели примеры их конкретного применения. Однако при изучении цунами широко исследуются физические процессы в очаге сейсмостектонического происхождения, физика формирования цунами, источники несейсмического происхождения, распространение цунами в океане и др. Широко выполняются модельные исследования (С. Л. Соловьев, А. С. Алексеев, Е. Н. Пелиновский, Б. В. Левин, М. А. Носов, Г. С. Подъяпольский, В. К. Гусяков, Е. А. Куликов, А. Б. Рабинович и др.). Для этого применяется достаточно сложный математический аппарат, использовать который в рамках настоящей монографии, посвященной всем видам природных катастроф, не представляется возможным. Примеры некоторых видов модельных расчетов (положения фронта волны-цунами в изохронах или динамики волнового возмущения) приведены выше на рис. 5.2 и 5.4.

5.2.2.2. Вулканы

Вулканические извержения также могут быть источником сильных цунами (до 5 % от общего числа). Причиной появления волны-цунами при извержении подводного вулкана являются провалы морского дна (кальдеры) или взрывной выброс тefры и глыб вулканической постройки в море. В Тихоокеанском регионе известно 66 цунами вулканического происхождения. При этом в десяти случаях высота волн достигала 10 м и более, а максимальная ее величина – 55 м [Левин, Носов, 2005].

Наиболее характерный пример – извержение вулкана Кракатау (Индонезия), которое началось 26 августа 1883 года. Облако пепла и пирокластики поднялось на высоту около 25 км. На следующий день после ряда мощных последующих взрывов произошло обрушение кальдеры вулкана, и в нее хлынула морская вода. Последующие взрывы разорвали на куски оставшуюся часть вулкана, что привело к мощнейшему цунами, прокатившемуся по берегам Индийского, Тихого и Атлантического океанов. У берегов о-вов Ява и Суматра высота волн достигала 30–40 м, а вглубь они проникли на 5 км. Голландский корабль был выброшен на сушу и оказался в 4 км от берега на высоте 10 м над уровнем моря. В результате цунами произошли колоссальные разрушения: на островах были смыты 300 поселений с низких берегов Западной Явы и Южной Суматры, уничтожены прибрежные леса и посевы. Около 36 тыс. человек погибло.

Расчеты показывают, что при внезапном образовании кальдеры заполнение ее водой происходит за время T :

$$T \approx D / \sqrt{gh}, \quad (5.5)$$

где D – диаметр кальдеры, h – характерная глубина. В случае, аналогичном извержению, например, Кракатау, величина T изменяется от 30–300 с.

Извергаемый объем воды будет идентичен объему вытесненной воды, который распределится по площади круга радиусом r , и успеет пробежать длинная волна за время извержения:

$$r = r \sqrt{gh}. \quad (5.6)$$

Объем воды (V), задействованной в процессе, можно оценить как $V \approx \pi D^2 h / 4 \approx 0,3\text{--}30 \text{ км}^3$. Полученные данные соответствуют величине очага цунами [Левин, Носов, 2005]. При этом амплитуда начального возвышения воды составит:

$$\xi_0 = V_0 / \pi r^2 gh. \quad (5.7)$$

В третьей главе настоящей работы мы писали про кальдеру вулкана Львиная Пасть на курильском о-ве Итуруп. Отмечалось, что высота гребня этой кальдеры составляет до 550 м над поверхностью моря, а дно под водой находится на глубине 500 м. Таким образом, общая глубина кальдеры составила более 1 км, а диаметр воронки взрыва был 7–8 км. Это показывает, какой колоссальной силы был взрыв данного вулкана.

Заметим, что на Курилах много подобных вулканов, а на планете известно 933 действующих, из которых 195 подводные [Левин, Носов, 2005; Пелиновский, 1996]. Поэтому можно считать вполне реальной опасность, которую несут извержения вулканов.

О возможности возникновения обвального-оползневого мегацунами на Гавайях на о-ве Оаху высказался американский геолог Дж. Прайт. В результате исследования он обнаружил, что в случае серии извержений вулкана Муаналоа в океан может обрушиться его крутая западная сторона высотой 1500 м. Возникшая волна-цунами со скоростью 70 км/час через 30 мин. ударит по Гонолулу.

5.2.2.3. Оползни

Согласно исторической базе ИВМиМГ СО РАН (Новосибирск), оползни являются причиной 6 % цунами. В Тихоокеанском регионе известно 80 цунами, причиной которых были оползни. Несмотря на относительно локальный характер таких цунами, особенно опасно их возникновение в узких проливах, закрытых заливах, небольших бухтах и фиордах [Murty, 1977].

Для того, чтобы возбудить цунами, оползни должны обладать большой массой и скоростью. Предполагается также, что цунами могут вызвать турбидитные (мутьевые) потоки, стекающие по каньонам. Донные осадки при землетрясениях даже небольшой силы способны к быстрому разжижению и смещению вниз по уклону дна, что создает предпосылки для воз-

никновения цунами. Мощность слоев турбидитов варьирует от нескольких миллиметров до шести метров. В их составе обычно пески, алеврит, пелит (илы, сложенные частицами менее 0,01 мм).

В геологии дна Мирового океана крупнейшим считают оползень Сто-рега на норвежской континентальной окраине [Левин, Носов, 2005]. Подводные оползни вызваны землетрясениями с $M_w = 7,1$ у Папуа-Новая Гвинея и 12 декабря 1992 года с магнитудой $M_w = 7,7$ на о-ве Флорес (Индонезия). В последнем случае оно сопровождалось цунами высотой до 26 м. Хорошо известно обрушение скальных пород вместе со льдом в бухте Литуя, описанное ниже.

5.2.2.4. Ледники

Четвертая причина возникновения цунами – обрушенные в залив ледники. Это уникальное явление. Ярким примером может служить событие на Аляске 9 июля 1958 года. Первопричиной было землетрясение с магнитудой $M = 8,3$, эпицентр которого находился в 21 км от бухты Литуя. Оно вызвало обрушение 30 млн. куб. м горных пород и льда. Лед, обрушившийся с высоты примерно 900 м в узкую длинную бухту, выплеснул на противоположный борт всю воду, несшуюся со скоростью 112 км/час и достигшую почти 600-метровой высоты. В это время в бухте находились четыре судна в 10 км от центра катастрофы. На глазах потрясенных людей огромнейшая волна поглотила подножие северной горы и прокатилась по заливу, сдирая со склонов гор деревья, разрушая все. Она прошла через высшую точку острова, возвышающуюся на 50 м. Волна закрутила одну из лодок, капитаном которой был Г. Ульрих, с огромной скоростью пронеслась над верхушками 12-метровых деревьев и скал величиной с дом и перебрала лодку через остров. Это уникальный случай, но история знает немало других примеров цунами, которые хотя и уступают по силе этому, но не менее тяжелы своими последствиями.

5.2.2.5. Атмосферные процессы, вызывающие метеоцунами

Гравитационные волны большой амплитуды, подобные цунами, могут возникнуть под воздействием глубоких циклонов и тайфунов (тропические циклоны) на поверхности моря. Такие события редки, поскольку только 3 % цунами вызвано метеорологическими причинами. В Тихоокеанском регионе к 2000 году насчитывали 36 метеоцунами. Они близки штормовым нагонам (storm surges), о которых мы будем говорить в разделе 5.3.

Еще в 1935 году Т. Номитзу [Nnomitsu, 1935] изложил теорию волн-цунами, названных им как анемобарические волны, а возбуждаемые ими цунами – метеоцунами.

Причину их возникновения он видел в атмосферных возмущениях типа шквала. При близости скорости распространения шквала и длинных волн и из-за собственных колебаний полузамкнутых акваторий могут возникать резонансные эффекты. Они многократно усиливают эти возмущения и вызывают волны-цунами. Так, в бухте Нагасаки в результате двойного резонанса высота волн возросла более чем в 100 раз [Левин, Носов, 2005].

Цунами помимо атмосферных волн и шквалов могут возбуждаться глубоким циклоном. Экстремальные значения давления и скорости ве-

тра в тропических циклонах достигают 870 Гпа. Например, циклон ТИР на Курилах, очевидцем прохождения которого был автор настоящих строк, проводивший научные исследования в это время на Южных Курилах. Он описан в шестой главе. Максимальная скорость ветра при нем достигала 55–70 м/с и более, а в циклоне Linda в сентября 1997 года – 82 м/с. Примеры аномального характера сейшевых колебаний в бухте Нагасаки (о-в Кюсю, Япония) приводит А. Б. Рабинович [1993]. Так, если обычная амплитуда сейш достигала ~0,5 м, то 31 марта 1979 года она выросла до 4,78 м.

Метеоцунами на Шикотане недавно было описано Е. Н. Литвиным и др. [2000].

5.2.2.6. Космогенные цунами (падение космических тел)

Это редкое экзотическое явление, при котором катастрофические волны-цунами вызваны падением в океан небесных тел. Для их изучения привлекают исторические и геологические данные, в том числе морские геофизические исследования кратеров (астроблемы), образовавшихся при падении метеоритов. Форма их отражена на рис. 5.5.

Специальные расчеты позволили оценить связь глубины полости и ее размеров. В целом можно сказать, что диаметр ее обычно в два с половиной-три раза превосходит глубину. Например, в случае падения в океане космического тела радиусом 200 м диаметр полости составит около 10 км. Глубина ее при этом будет около 3,5 км. Нетрудно заметить, что при падении небесного тела радиусом более 300 м образуется полость, глубина которой может превысить глубину океана, средняя величина которого оценивается в 3,8 км [Злобин, 2006]. Таким образом, не

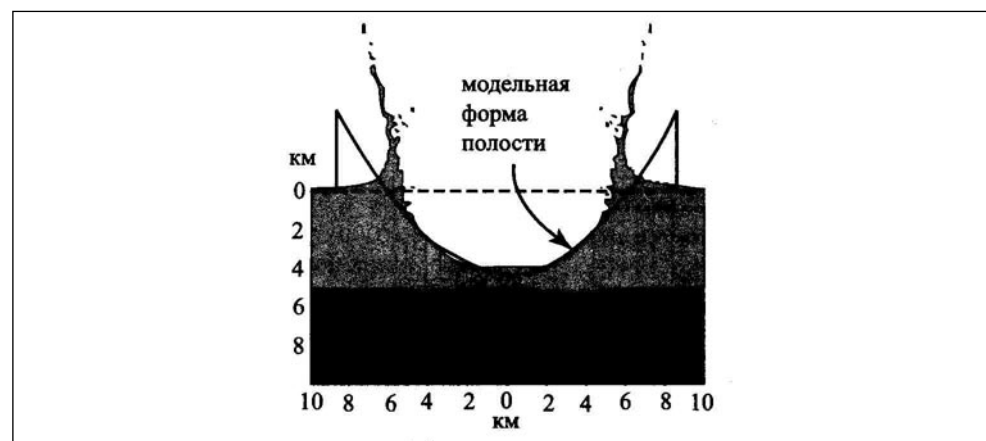


Рис. 5.5. Форма полости, образующейся в воде при падении метеорита: сопоставление результатов численного моделирования [Crawford and Mader, 1998] и идеализированной модели [Ward and Asphaug, 2000]. Расчет выполнен для момента времени 25 с при диаметре астероида 500 м, скорости падения 20 км/с, плотности 3,32 г/см³, глубине океана 5 км.

только может образоваться кратер в воде, но и останется след падения на дне океана.

Очень интересен расчет высоты волны-цунами, выполненный по формулам, предложенным в работе Ward, Asphaug, 2000. Согласно им, при падении небесного тела радиусом 100 м и плотностью 3000 кг/м³, движущегося со скоростью 20 км/с в океане глубиной около 4 км, в первые минуты после падения в непосредственной близости от точки падения высота цунами может достигать 1 км и более. Со временем она падает. Если на третьей минуте после падения небесного тела она составляла 2 км, то через 27 минут высота волны снизится до 70 м. При этом она успеет распространиться всего на 100 км. Для сравнения заметим, что обычные длинные волны от сейсмотектонического цунами за это же время (27 мин.) покрыли бы расстояние более 300 км. Таковы особенности и отличия космогенного цунами.

К настоящему времени на Земле найдено уже более 150 астроблем диаметром от 1,2 до 100 км (Попигайская астроблема). Несмотря на редкость, их в океане, безусловно, больше, хотя обнаружение там несравненно сложнее (кратер ИМГиГ в абиссальной котловине Картографов, СЗ Пацифика).

Исследование космогенных цунами состоит из трех этапов. На первом определяют характеристики метеоритов и астероидов (размеры, плотность и скорость), которые могут попасть в Мировой океан, и вероятность такого события. На втором этапе необходимо описать нелинейный процесс их взаимодействия с водным слоем. На третьем анализируются особенности распространения космогенного цунами в открытом океане и накат волн на берег [Левин, Носов, 2005].

Помимо мелких метеоритов есть и более крупные тела, такие, как кометы и астероиды диаметром более 1 км. Столкновение с ними наиболее опасно. Считается, что столкновение с Землей небесного тела размером более 2 км приведет к глобальной катастрофе [Paine, 1999]. Более подробно о них в седьмой главе.

5.2.3. Последствия цунами

Крупные цунами несут разрушительные последствия. Противостоять массе несущейся воды практически невозможно. Она выбрасывает на берег суда, повреждает волноломы, причалы, здания, железные дороги, переворачивая железнодорожные составы и все, что попадает на пути. Помимо непосредственного воздействия волны, тяжелые последствия имеют так называемые вторичные последствия. Это, например, возникновение оползней, засоление почвы. Приведем пример описания самого разрушительного цунами на Курилах, происшедшего 5 октября 1952 года. Вот как его описывает Н. А. Щетников [1981, с. 33]: «В ночь с 4 на 5 ноября 1952 г. около 4 час. по местному времени жители Северо-Курильска были разбужены 7-балльным землетрясением. Через 45 мин. после начала землетрясения послышался громкий гул со стороны океана, и уже через несколько секунд на город обрушилась огромная волна, двигавшаяся с большой скоростью и имевшая наибольшую высоту в центральной части города, где она катилась по долине реки. Через

15–20 мин. на город обрушилась вторая, еще большая волна, достигшая 10-метровой высоты. Она нанесла особо сильные разрушения, смывая все постройки на своем пути, сохранились лишь цементные фундаменты домов. Прошедшая через город волна достигла склонов гор, после чего начала скатываться обратно в котловину, расположенную ближе к центру города. Здесь образовался огромный водоворот, в котором с большой скоростью вращались всевозможные обломки строений и мелкие суда. Откатываясь, волна ударила с тыла в береговой вал перед портовой территорией и в обход горы прорвалась в Курильский пролив. Участок берегового вала и гора на несколько минут стали островом. На перемычке между этим островом и горой волна нагромодила груды бревен, ящиков и т. п. и даже принесла из города два дома. Через несколько минут после второй волны пришла более слабая, третья, которая вынесла на берег много обломков. Все это было разбросано по территории города и по берегам пролива. В 9 час. утра наблюдались сильные колебания уровня океана, которые, слабея, повторялись в течение всего дня 5 ноября». Чтобы реальнее оценить картину бедствия, необходимо представить себе, что это происходило в холодную ноябрьскую ночь с леденящим ветром.

Для оценки ущерба сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН (В. М. Кайстренко и др.) был организован поиск сведений о жертвах и прямых убытках, который производился в Государственном архиве Сахалинской области и архиве Главного управления по делам ГО и ЧС по Сахалинской области. В результате количество погибших оценивается сейчас в 2336 человек, был нанесен огромный ущерб народному хозяйству. Так, из докладной директора Океанского рыбокомбината Бердникова от 10 ноября 1952 года: «...В живых осталось 542 человека, погибло 460 человек. Волной была смыта вся производственная база полностью как на центральной базе Океанская, так и на базах Галкино и Боевой, в т. ч.: консервный завод Лососевый – 3 линии, закусочная линия, цех разделки с приемной площадкой и транспортерами, икорный цех, жировой цех, цех обработки с посольной бетонной емкостью 4 000 центнеров, склад готовой продукции с консервами лосося и печенью 5700 ящиков, рыбы 70 тонн, механическая мастерская, кузнечный цех, судощех, новая э/станция с 2 двигателями, 11 котельных действующих установок с 4 лебедками и 4 резервных котла, два холодильника действующих на 400 тонн, бондарный цех, сетеповивочный цех, стройцех, склады центральный и горючесмазочных материалов, все оборудование новое гидростанций и тукового завода, волнолом бетонный – 120 метров, здание управления комбината со всей документацией, больница, клуб на 130 мест, помещение д/сада на 60 человек, помещение радиостанций со всем оборудованием, баня на 60 мест, две автомашины грузовые, одна пожарная и трактор «Алтаец», вся водная магистраль на 3000 метров, все проезды дороги, весь жилой фонд комбината около 3000 кв. метров, катеров – 30, кунгасов – 30, школа на 130 учеников, уголь – 1000 тонн, соли – 700 тонн, лес – 100 м³, соляры – 50 т, тара, лепка...».

И аналогичных документов множество. Однако, листая архив, как пишет В. М. Кайстренко, «...вновь убеждаемся в нашей беспечности, в не-

умении извлечь урок из опыта. И подтверждением тому цунами 6 сентября 1958 года». Комиссия, организованная Сахоблисполкомом, 7 ноября 1958 года констатировала факты ущерба: «Наибольшие разрушения имеются в п. Горячие Ключи и в пос. Мало-Курильск. В п. Горячие Ключи около 100 жилых домов, казарм, различных складских хранилищ, госпиталь, школа, ясли и других сооружений полностью разрушены. Разрушения происходили главным образом потому, что все они были построены на рыхлых и мягких грунтах, в пойме рек, на склонах и на низменных заболоченных местах... Все сооружения, даже наиболее крупные, как многоместные казармы, госпиталь, школа и другие, построены без учета сейсмических норм...

Ущерб, нанесенный землетрясением в п. Горячие Ключи, исчисляется около 14 млн. руб. В п. Мало-Курильск полностью разрушены пирсы, частично разрушены складские помещения, выведены из строя 3 рыболовных судна, волной унесен годовой запас картофеля (40 тонн), 3 семьи военнослужащих сверхсрочной службы и вольнонаемных потеряли личное имущество. В п. Крабозаводск также разрушены пирсы, базы отстоя и ремонта кораблей, выброшены на берег 5 рыболовных катеров. В Курильском, как и в Южно-Курильском, районе разрушены многие мосты, среди них есть протяженностью по 20–50 метров, связывающие населенные пункты».

Вспомним также о Шикотанском землетрясении 4 (5) октября 1994 года и цунами, погубившем 11 и ранившем 32 человека. На Шикотане смыто четыре дома, выброшен на берег и разрушен рыболовецкий сейнер, повреждена портовая часть Крабозаводского. На Шикотане высота цунами достигла 8,5 м в бухте Снежкова [Информационно-аналитический..., 1994]. По ручьям оно проникло вглубь острова на 250–350 м. На Кунашире высота волны была 2–3 м. В Южно-Курильске затопило значительную часть города шириной 30–50 м в портовой части и 100–200 м – на остальной (низкая терраса). В долину р. Серебрянка морская вода проникла на 800 м. На о-ве Зеленый (Малая Курильская гряда) высота волны была 5 м, повреждения и затопления имели место и на о-ве Итуруп.

На рис. 5.6 показан деревянный дом, перенесенный цунами в Южно-Курильске.

Данные по ущербу от Шикотанского цунами 5 октября 1994 года приведены в табл. 5.2 [Кайстренко и др., 1998].



Рис. 5.6. Дом, перенесенный цунами 4 октября 1994 года на о-ве Кунашир [Королев и др., 1997].

Таблица 5.2.

Объект	Описание	Ущерб (млн. руб., 1994)
Мосты	Четыре – разрушены полностью, два – частично	2214
Водопропускные сооружения	Разрушены полностью	440
Автомобильные дороги	Трещины, размывы	2195
Рыболовный флот	На Шикотане одно судно затонуло, три выброшены на берег; на Кунашире также одно судно затонуло, три подняты на причал	8586
Гидротехнические сооружения, пирсы...		8600

Итого ущерб составил 22 035 млн. рублей (в ценах 1995 года).

Показателен пример ущерба, нанесенного цунами 1964 года на Аляске, США (рис. 5.7). Это цунами отмечалось по побережью всего Тихоокеанского бассейна, а наибольшие разрушения произвело в заливе Принс-Вильям. Высота волн в отдельных районах достигала 10 м, погибших 120 человек, «общий ущерб от землетрясений и цунами составил несколько сот миллионов долларов» [Щетников, 1981, с. 34].



Рис. 5.7. Поезд, сброшенный с рельсов волной во время цунами 1994 г. (Аляска, США).

5.2.4. Меры защиты от цунами

Зная особенности возникновения, распространения и наката цунами на берег можно сформулировать основные меры защиты от цунами. Они бывают активные и пассивные.

5.2.4.1. Активные меры защиты

Лучшей защитой является своевременная эвакуация. Ниже рассмотрены ее правила и особенности, а также поведение в случае невозможности эвакуации.

Меры активной защиты в случае возможности эвакуации

Для принятия мер защиты надо знать признаки цунами. Один из главных – толчок сильного местного землетрясения (см. табл. 3.2) и наиболее запоминаемый его признак – колебания поверхности Земли. Первая волна может подойти через 15–20 мин., поэтому нужно срочно подняться на возвышенность. Имейте в виду, что с интервалом от несколько минут до часа может подойти несколько волн, при этом самой сильной может быть не первая волна. Так же показательны отлив или отход воды от берега (за 10–15 мин.) и обнажение дна на сотни метров – первые километры, которые могут растянуться от 5 до 35 мин. Дополнительными признаками могут быть стихание прибоя, необычный дрейф льда и других плавающих предметов, трещины в припае, необычные волны у кромки льда или рифов, толчея, свечение воды и аномальное поведение животных, стремящихся уйти подальше от воды.

Действия по эвакуации начинаются после объявления тревоги «Внимание всем!», которое подается сиреной, по радио и телевидению. Необходимо взять с собой минимум теплых, непромокаемых вещей, продуктов питания, деньги, отключить газ, электричество, предупредить об эвакуации соседей. Переждите тревожный период в безопасном месте в течение трех часов после прихода последней волны-цунами.

5.2.4.2. Меры защиты в случае невозможности своевременной эвакуации

Как мы говорили выше, самый лучший способ защиты от цунами – немедленная эвакуация. Однако могут быть случаи, когда по каким-то причинам вы не сделали этого и вам пришлось остаться в цунамиопасной зоне. В связи с этим рассмотрим случаи вашего нахождения: а) в помещении; б) вне помещения; в) в волне.

В помещении рекомендуется подняться на верхние этажи и закрыть все двери на запор; занять безопасное место (как и в случае землетрясений – см. выше); держаться подальше от зеркал, окон, стеклянных дверей, тяжелых предметов, которые могут упасть.

Вне помещения: прежде всего осмотритесь и найдите наименее подверженное удару волны место (скальная или бетонная преграда, большое дерево). Сбросьте обувь и верхнюю одежду и постарайтесь избежать встречи с волной-цунами на открытом пространстве между зданиями.

Оказавшись в волне, необходимо делать следующее: а) вздохнуть и набрать больше воздуха, под водой сгруппироваться, закрыть голову

руками; вынырнув на поверхность, освободиться от намокшей одежды, если вы ее не сняли раньше; б) помнить о том, что мы говорили выше – вслед за первой волной-цунами приходит вторая и, возможно, третья, поэтому, зная, что вода начнет возвращаться, воспользуйтесь временем, чтобы найти плавающий предмет или что-нибудь возвышающееся над водой; в) пережив первую волну, активно готовьтесь к следующей (их бывает от трех до девяти, а интервалы между ними возможны примерно от трех минут до полутора часов); ищите более безопасное место или возможность по сильнее зацепиться, чтобы вас не смыло и не унесло последующей волной.

5.2.4.3. Действия после цунами

Необходимо знать не только то, что надо делать до прихода волны-цунами и как спастись во время ее подхода, но и что делать после нее. Когда пройдет очередная волна, подождите два-три часа. Не пытайтесь после первой волны приблизиться к побережью, чтобы понаблюдать за цунами, поскольку последующая волна может двигаться значительно быстрее вас, и вы можете не успеть спастись. Об отбое цунами должны сообщить сиреной. По возвращении в дом убедитесь, что он не рухнет из-за повреждений, причиненных волной стенам, или подмыва фундамента. Особенно будьте внимательны к электрическим проводам, первое время не зажигайте открытого огня из-за опасности пожара, утечки газа, химических аварий. Если вы не получили значительных повреждений, активно включайтесь в спасательные работы под руководством служб МЧС по Сахалинской области или местного штаба по стихийным бедствиям.

5.2.4.4. Действия на море

Отдельный вопрос – опасность цунами в море. Поскольку на всех судах есть средства связи, то в случае предупреждения цунами или появления его признаков им необходимо отойти от берега на 6–8 км. В открытом море цунами почти незаметны, поскольку их высота менее 2–3 м, длина – 200–300 км, период – около 15 мин. В очаге землетрясения или подводного вулкана толчки могут сбить команду с ног, повредить двигатель и оборудование. Суда в очаге Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 года испытали ударное воздействие, кавитацию, короткопериодное волнение и другое. Они содрогались, наблюдалась сильная вибрация, спавшие просыпались, выходили из строя электрогенераторы, лопались воздушные и паровые трубопроводы, ломались лебедки и вентиляторы, наблюдались сильные удары по днищу, кипела вода вокруг [Кайстренко, 1997]. Эти явления могут длиться от 15 с до 2 мин или более.

5.2.4.5. Меры пассивной защиты от цунами

Существуют следующие способы избежать последствия цунами: 1) переселение людей; 2) цунамистойкое строительство; 3) прогноз, осуществляемый по землетрясениям, на основе мареографических наблюдений в океане, по аномальному поведению животных; 4) строительство волноломов, бункеров; 5) наличие службы оповещения.

Переселение людей

Казалось бы, это наиболее простая и действенная мера, решающая все проблемы. Однако это далеко не так, поскольку не всегда возможно ее реализовать. Например, порт не перенесешь. Также невозможно перенести и ряд производств, которые связаны с работой на акваториях (выращивание марекультуры, рыбоперерабатывающие предприятия и т. п.). Поэтому необходимо применение нижеизложенных мер.

Цунамистойкое строительство

В тех случаях, когда здания или сооружения нельзя перенести из опасной зоны, естественно, их надо строить так, чтобы объект мог выдержать удар цунами. Однако необходимо иметь в виду следующее. Во-первых, разрушительная сила максимально возможных цунами чрезвычайно велика, поэтому очень трудно выполнить необходимую и достаточную прочность. Во-вторых, стоимость такого строительства высока и может превышать экономическую целесообразность. Поэтому эффективнее использовать другие способы.

Прогноз цунами

Прогноз цунами осуществляется в основном двумя методами.

Первый – путем регистрации землетрясений с магнитудой более порогового уровня (обычно $M=7,0-7,5$), которые способны вызвать цунами. В случае если сейсмические станции зарегистрируют такое землетрясение, дается цунами-тревога. Однако это не прямой, а косвенный метод. Тревога не означает появление волн-цунами, сигнал говорит, что она может быть. Преимуществом этого метода является возможность заблаговременного (часы) предупреждения о вероятном цунами. Это происходит благодаря тому, что скорость сейсмических волн намного превышает скорость волны-цунами. Недостатком является то, что очень часто даже мощные землетрясения не вызывают волну-цунами. Выше мы указали, какие условия должны быть, чтобы возникла волна-цунами. Поэтому, когда произошло землетрясение, помимо знания магнитуды, необходимо определить район очага (он может быть вообще на суше) и другие параметры. Однако это требует время, и необходимо либо давать тревогу, не установив всех данных о землетрясении, либо выяснить все, но можно упустить время. Большим недостатком этого главного, по сути, метода прогноза является большое число ложных тревог. Они расхолаживают население, сеют неверие в прогноз, в необходимость принятия мер защиты, побуждают игнорировать сигнал тревоги, а потом, когда происходит действительно цунами, люди, не поверившие в предупреждение, могут погибнуть.

Второй метод – мареографические наблюдения в океане. Он позволяет непосредственно зарегистрировать сам приход волны-цунами с помощью специальных датчиков. Они устанавливаются вблизи побережий и имеют кабельную или радиосвязь с берегом. Это могут быть более дорогие буйковые станции, устанавливаемые на удалении от суши. Конечно, они позволяют раньше обнаружить цунами. Информация, полученная таким образом, является однозначной и прямо указывает на наличие волн. Это самый надежный способ прогноза. Однако такие наблюдения требуют специальной аппаратуры и разработки теории.

Одними из первых аппаратуру для записи цунами в открытом океане разработали ученые в Гавайском институте геофизики [Vitousek, Miller, 1970]. Они создали сложные и тонкие приборы, которые позволяли измерять цунами в открытом океане при глубинах до 6000 м, хотя уникальные наблюдения за волной-цунами в океане были выполнены еще Ван-Дорном [Van Dorn, 1959] во время надводного атомного взрыва, произведенного в 1956 году в районе атолла Бикини. Прогноз цунами на основе мареографических наблюдений был осуществлен впервые в районе Гавайских островов и других местах.

Однако для его осуществления необходимы специальные наблюдения и мониторинг, а также создание теоретической базы распространения волн. Для этого начиная с 60-х годов XX века во многих научно-исследовательских институтах, в том числе и в СССР [Войт, 1967], выполнялись большой комплекс теоретических работ по акустике океана [Нефедов, 1974; Пелиновский, 1982 и др.] и наблюдения на море. Теоретические гидрофизические, а также и экспериментальные работы по изучению волн-цунами проводились, в частности на Курильских островах, научными сотрудниками Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. В последующие годы эти работы получили развитие и осуществляются до настоящего времени [Кайстренко, 1997, 1998; Ковалев, 1993; Королев, 1997 и др.].

Рассматривая особенности прогноза цунами на Дальнем Востоке России, необходимо сказать, что предупреждение жителей об угрозе цунами осуществляется специальной службой. Она создана у нас в стране в 50-х годах и основывается на оперативных сейсмологических данных о положении эпицентра и магнитуде (энергии) подводного землетрясения. По существу, такой прогноз цунами дается, как мы сказали выше, по косвенным признакам. Он имеет статистический характер и сопровождается значительным количеством ложных тревог. С такой же проблемой столкнулись и другие страны Тихоокеанского региона.

В 60–70-х годах С. Л. Соловьевым, академиком РАН, председателем Национального комитета СССР по цунами было предложено сочетать сейсмический прогноз с прямой регистрацией цунами в океане донными датчиками гидростатического давления и скорости массового переноса, обеспечив передачу информации на берег в реальном масштабе времени по проводному каналу [Соловьев, 1968; Жак, Соловьев, 1971].

Для выяснения принципиальной возможности такой регистрации на о-ве Шикотан была создана обсерватория. Согласно данным, предоставленным зав. лабораторией цунами ИМГиГ ДВО РАН, можно отметить следующее. Пионером развития гидрофизического метода в нашей стране был В. М. Жак, разработавший первые системы дистанционной уровенной регистрации цунами и осуществивший их постановку на шельфе о-ва Шикотан [Жак, Соловьев, 1971]. Летом 1979 года у Шикотана была проведена очередная постановка донных измерительных систем. Она состояла из датчика давления, установленного на глубине 113 м в 8 км юго-восточнее острова и связанного с обсерваторией 20-километровым кабелем.

23 февраля 1980 года в 05^h 50^m (GMT) к юго-востоку от него произошло землетрясение с магнитудой $M = 7,0$, ощущавшееся и на Хоккайдо. По югу Курильских островов была объявлена тревога цунами. Землетря-

сение вызвало небольшое цунами, которое было зарегистрировано мареографами на побережье от о-ва Итуруп на севере до о-ва Хонсю на юге. Анализ первой записи цунами в открытом море показал, что волна в начале записи донного мареографа представляет собой суперпозицию колебаний разных периодов. Далее следуют колебания меньшей амплитуды пакетной структуры, длящиеся более полусуток. Реальные времена пробега цунами согласуются с расчетными временами от области очага землетрясения. Спектрально-временной анализ выявил отчетливый захват волновой энергии шельфовой областью.

Первая запись цунами в открытом океане *явилась значительным научным фактом*. В прикладном смысле она со всей очевидностью подтвердила способность гидрофизического метода оперативного прогноза цунами серьезно улучшить работу службы предупреждения цунами.

Системы дистанционной уровенной регистрации цунами продолжали развиваться в стране и далее, но только в исследовательском варианте. К сожалению, в отличие от Японии, США и Чили гидрофизический метод не стал частью цунамислужбы в России, хотя и появился *впервые у нас*. Система уровенной регистрации цунами США в своем развитии практически стала Тихоокеанской, использующей спутниковые каналы связи для передачи информации в главный (Гавайи) и Аляскинский центры. Японская служба цунами также имеет несколько уровенных датчиков, соединенных кабелем с центром.

В последнее десятилетие появились теоретические работы по возможности локаторных методов дистанционной регистрации цунами. На материалах альтиметра (измерителя уровня), установленного на Европейском спутнике ERS-1, впервые выявлено цунами [Kaistrenko e. a., 1997], произошедшее 8 августа 1993 года, что позволяет надеяться на развитие спутниковых методов для целей цунами-службы.

Непосредственно службу цунами в пределах Сахалинской области в настоящее время реально несут сейсмические станции в Южно-Сахалинске и Северо-Курильске. Поэтому одной из важнейших мер по повышению безопасности является организация дополнительной станции наблюдения за этим стихийным бедствием. Принципиально такая возможность есть. Благодаря заинтересованности США и Японии в ведении таких наблюдений и желании их помочь России, решение данного вопроса может быть осуществлено без больших затрат на приобретение всей необходимой аппаратуры. Это позволит увеличить надежность прогноза цунами в северо-западной части Тихого океана.

Существует и еще один способ прогноза цунами. Он основан на наблюдении за аномальным поведением животных. Однако из-за слабой изученности, отсутствия научной обоснованности и достоверности на сегодняшний день его еще нельзя считать методом прогноза, хотя как признак его можно использовать.

Строительство волноломов

В классической книге по цунами известного ученого в этой области, индийского исследователя, вице-президента Комитета по цунами МГГС Т. С. Мурти [1981] раздел, посвященный мерам защиты от цунами,

начинается именно с вопроса о строительстве волноломов. Приводятся численные расчеты, модельные и лабораторные исследования. Дается сила воздействия цунами на сооружения, показано изменение уровня воды внутри гавани с волноломом и без него.

Показано, что волнолом действительно приводит к ослаблению цунами внутри гавани. Однако широкому применению этого метода и возможности рекомендовать его как метод, решающий проблему, препятствует ряд причин. Во-первых, это дорогое строительство; во-вторых, препятствие, которое он создает естественным обитателям моря; в-третьих, как сочли японцы, которые применяли этот метод, волнолом обезображивает вид гавани. Это также говорит не в пользу его применения.

Служба оповещения и предупреждения

Во многих прибрежных странах (США, Америка, Китай и др.) существуют национальные службы, которые входят в Международную службу предупреждения о цунами. Ее центр находится на Гавайских островах, в Гонолулу.

Впервые идея создания системы предупреждения цунами была предложена, по-видимому, Т. Финчем после Алеутского землетрясения 1923 года. Позже, после разрушительного цунами, вызванного другим Алеутским землетрясением 1 апреля 1946 года, когда погибло 173 человека и Гавайским островам был нанесен ущерб в 25 млн. долларов, группа ученых Береговой и Геодезической служб США предложила создать на Тихом океане Службу предупреждения о цунами. Такая идея была реализована в 1948 году.

Затем аналогичные наблюдения были созданы в Японии. С 12 декабря 1949 года был принят соответствующий проект, а с 1952 года служба вступила в строй. В дальнейшем такие наблюдения были осуществлены на регулярной основе в ряде стран, например, на островах Новая Каледония и Таити.

После Курило-Камчатского цунамигенного землетрясения 5 ноября 1952 года такая служба была создана и в СССР. Первоначально она включала три станции: в Петропавловске-Камчатском, Курильске и Южно-Сахалинске. Затем в нашей стране работало уже пять цунами-станций (в том числе в Северо-Курильске и Южно-Курильске). Однако в настоящее время из-за сложных экономических условий в стране ряд станций перестали нести службу цунами и число их сократилось.

Кроме непосредственных сейсмических наблюдений за появлением потенциально цунамигенного землетрясения, существуют и иные важные аспекты этой проблемы.

Прогнозы службы предупреждения дают возможность заранее объявить об опасности и времени прихода волны. Однако общий прогноз не учитывает всех индивидуальных особенностей каждого места, поэтому не дает информации о том, на какие участки берега волна обрушится, какова будет там ее сила. Да и точно прогнозировать пока не удается. Прогноз цунами оправдывается сегодня примерно на 20 %. Для точной информации о возможных последствиях в том или ином месте необходимо выполнять специальные исследования (цунамирай-

онирование). Оно позволяет, изучив подводный рельеф дна в каждом конкретном месте, рассчитать время подхода волны и ее параметры от потенциально опасных очаговых зон. Имея такой набор данных (в компьютере) и получив точную информацию о землетрясении (координатах и магнитуде), можно определить время подхода волны, скорость и ее высоту.

Исходя из состояния мониторинга цунами, необходимо отметить следующее. При получении предупреждения по радио или телевидению (а на Курилах, например, по сигналу сирены) нужно немедленно и без паники действовать. Если звук сигнала сирены говорит вам о том, что необходима немедленная эвакуация, то сообщения по местному радио могут содержать и более подробную информацию: о времени подхода волны, порядке действий населения, эвакуации, пунктах сбора и маршрутах следования. Однако все это должно быть службами ГО и ЧС заранее разработано (план эвакуации, маршруты движения и безопасные места сбора населения). Каждому предприятию эти данные должны быть известны. Такие планы, например, в администрации Южно-Курильского района есть. Причем каждому предприятию, которое еще работают внизу в связи с ограниченным местом на возвышенности на территории этого города, необходимо знать место расположения своих людей и техники на время цунами-тревоги.

Сигнал сирены, предупреждающей о цунами на Курилах (в Южно-Курильске), автору неоднократно пришлось слышать лично. Действия властей (мэр, органы милиции) можно было оценить как энергичные и правильные. Однако, как и в других регионах, в частности на Гавайских островах, даже слыша сигнал тревоги далеко не 100 % населения на него реагирует и спешит в безопасное место. (Поэтому и приходится милиции проверять все дома в опасной нижней зоне Южно-Курильска и спешно выпроваживать людей наверх, в безопасную зону.) Этот психологический фактор имеет большое значение. Он требует изучения и значительной работы служб МЧС. Объясняется он неверием людей в прогноз цунами. Это, в свою очередь, связано с большим числом ложных прогнозов. Поэтому одна из важных задач науки на сегодняшний день – снижение ложных прогнозов, тревог и пропаганда знаний и мер, которые необходимо принимать непосредственно населению и каждому человеку в случае подобного стихийного бедствия. На Курилах и в других цунамиопасных местах наиболее кардинальной мерой является полное переселение людей и перевод всех предприятий в цунамибезопасное место. Поэтому необходимы все вышеназванные меры и важнейшие из них – это те, которые могут быть предприняты самим населением в случае подхода волны-цунами на основе изучения этого явления.

5.3. Моретрясение

Помимо вышеназванных динамических процессов в океане наблюдаются и *моретрясения*. Имеется более 250 их описаний в разных районах Мирового океана. В разделе 5.2.4.4 приведен пример моретрясения в очаговой зоне сильного Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 года. Его испытали

восемь рыболовецких судов. Проявляется оно в том, что некоторая ограниченная область океана диаметром примерно 50–100 км испытывает локальное возмущение продолжительностью до 10 минут. Это вызывает резкое интенсивное движение волны, сопровождающееся внезапным, но кратковременным усилением вертикального обмена в океане. По аналогии с описанным выше подобным мантийным процессом во второй главе, в водной среде это можно назвать сейсмогенный апвеллинг, когда на поверхности моря образуются стоячие волны большой крутизны, отдельные вертикальные столбы воды, уединенные волновые образования, сопровождаемые сильными акустическими эффектами. Могут появляться султаны брызг, откол и разлет кавитационных слоев воды. При этом высота волн и выбросов воды может быть больше 10 м при скорости движения до 10 м/с. Амплитуда давления в подводной волне сжатия может быть до 2 Мпа, то есть 20 атмосфер. Как пишут Б. В. Левин и М. А. Носов: «Корабль, попавший в зону действия моретрясения, оказывается в окружении гигантских, стоячих волн, заполняющих все видимое пространство. Ужасный грохот и гул дополняются резкими ударами по днищу, сильнейшим сотрясением судна и разрушением палубных надстроек, выдержавших в прошлом немало штормов» [2005, с. 34]. Моретрясение, или сейсмогенный апвеллинг, влияет на ряд процессов в океане, приводящих к помутнению воды, изменению ее цвета, образованию температурных и погодных аномалий, оказывает влияние на планктон. Для установления полных причин моретрясения требуются дальнейшие исследования, так как физика этого явления окончательно не ясна.

5.4. Волны-убийцы

Кратко отметим такое уникальное явление, как волны-убийцы (rogue wave, или freak-wave) в океане. Они были отмечены у Юго-Восточной Африки, в Северном море и глубоких водоемах [Левин, Носов, 2005]. Так, 22 ноября 2001 года волна-убийца была зарегистрирована даже в Черном море с помощью волноизмерительного буя, зафиксировавшего волну аномальной высоты 10,3 м. Главная их особенность – возникновение аномально большой волны необычной формы. Они появляются внезапно, обладают высотой, в два и более раз превосходящей высоту обычного штормового волнения, чем и опасны для флота (рис. 5.8).

Волны-убийцы на шельфе Юго-Восточной Африки связывают с сочетанием неблагоприятных гидрофизических особенностей и сильным ветром. К первым относятся «линейная или с учетом нелинейных поправок фокусировка волновых групп в результате действий дисперсии, изменчивых условий распространения волн (переменная батиметрия, изменение направления и захват течениями); действие переменных атмосферных условий; нелинейная модуляционная неустойчивость; взаимодействие солитоноподобных волновых групп» [Левин, Носов, 2005, с. 40].

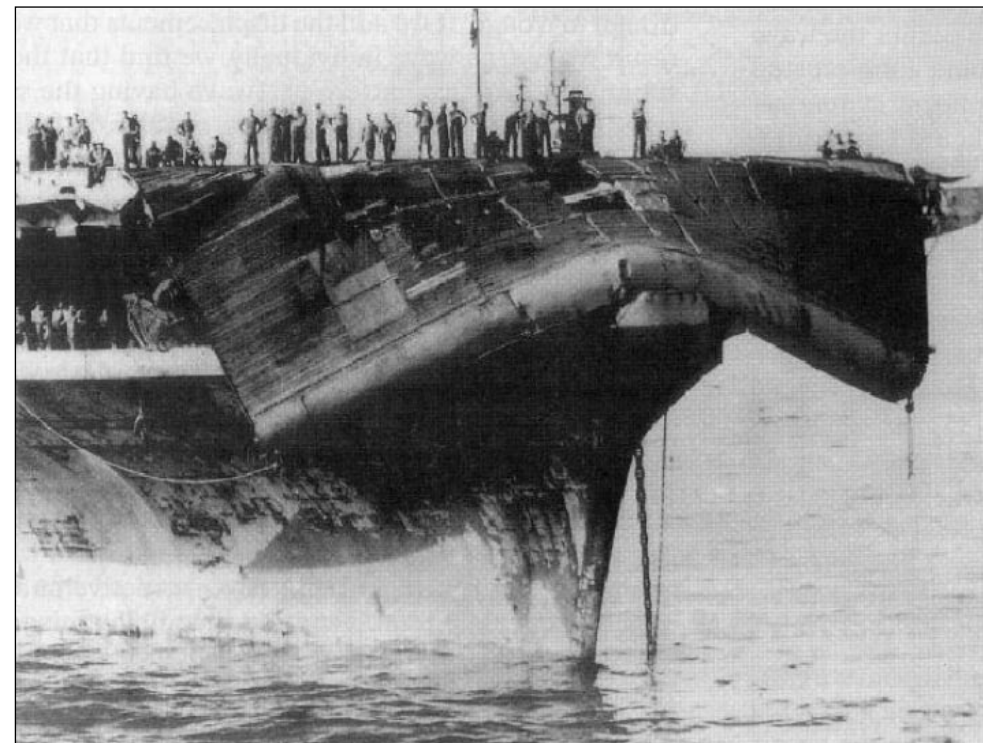


Рис. 5.8. Фотографии разрушений кораблей после встречи с волнами-убийцами
[Куркин, Пелиновский, 2004].

5.5. Штормовые нагоны

Штормовые нагоны (storm surges) представляют собой подъемы уровня моря, обусловленные падением приземного атмосферного давления и воздействием ветра на морскую поверхность при прохождении над прибрежной областью циклонов или тайфунов [Шевченко, 1997; Мурти, 1981; Левин, Носов, 2005; Кайстренко и др., 2002]. Вместе со штормовым волнением они представляют грозное явление.

Сильные штормовые нагоны высотой до пяти метров известны в Китае на побережье Желтого моря. В Бангладеш и Юго-Восточной Азии это колоссальное бедствие, за последние десятилетия погубившее несколько сотен тысяч человек. Отмечаются штормовые нагоны и в Европе. Так, нагон в Северном море с 31 января по 2 февраля 1953 года разрушил защитные сооружения и затопил площадь 25000 км², что привело к гибели 2000 человек в Великобритании и Голландии [Гилл, 1986]. В России штормовые нагоны являются причиной наводнений в Санкт-Петербурге, имеют они место в Черном, Азовском морях и особенно на Дальнем Востоке – Сахалин, Западная Камчатка [Левин, Носов, 2005; Шевченко, 1997; Кайстренко и др., 2002; Като и др., 2001]. Так, через Сахалин в среднем в год проходит 30 циклонов с давлением в центре менее 1000 миллибар. С 1990 по 1995 год порт Корсаков в заливе Анива пять раз подвергался воздействию штормовых нагонов, когда затапливались причалы, повреждались портовые сооружения, машины и механизмы, большое количество грузов смывалось в море, подмачивалось или получало механические повреждения. В основном нагоны возникали при ветрах юго-западного направления, характерных для циклонов с центрами в южной части Татарского пролива. Эти циклоны приходят из тропиков и акватории Японского моря и при приближении к Сахалину замедляются. Давление в их центре опускается до 965 миллибар, как это было, например, 10 ноября 1990 года. В 1995 году циклон был еще глубже с давлением в центре 945 миллибар. Он «притормозил» примерно в том же месте, и в течение трех стандартных (три часа) сроков наблюдений положение его центра – в 80 км к югу от Холмска оставалось неизменным. В этой связи юго-западный ветер продолжительное время сохранял свою силу, что и обусловило нагон. Согласно отчету штаба ГО и ЧС по Сахалинской области, штормовой нагон 8–9 ноября 1995 года подтопил дома по ул. Свердлова, повредил железнодорожный мост, размыл 400 м ж/д полотна, потопил четыре судна, повредил десять и село на мель четыре. На базе океанического рыболовства (БОР) был разрушен причал длиной 175 м² и размывы подкрановые пути (150 м); на нефтебазе было разрушено берегоукрепление длиной 25 м, повреждена изоляция двух резервуаров и разрушен нефтепровод на расстоянии 200 м; на консервном заводе были разрушены цех, четыре складских помещения; повреждены хлораторная и насосная, снесен рыбокопильный цех и рыбокопильный цех в поселке Третья Падь. По данным «Сахалинавтодора», были размывы автодорога Корсаков–Новиково на расстоянии 1400 м и железная дорога Корсаков–Южно-Сахалинск (местами на глубину до двух метров).

Приведенные примеры наглядно демонстрируют, какую значительную

угрозу представляют штормовые нагоны. Наибольшие их высоты – в заливе Терпения. Здесь высота экстремального нагона 100-летней повторяемости составляет 1,4 м. Средняя частота нагонов с высотой не менее 0,4 м – около трех-четырех в год. Циклоны, вызывающие штормовые нагоны, часто наблюдаются над Сахалином в октябре–декабре.

Высокая циклоническая активность обусловлена положением острова между материковыми и тихоокеанскими воздушными массами, вдоль границы которых обычно распространяются циклоны. Образованию штормовых нагонов у берегов Сахалина также способствуют наличие обширных прибрежных, мелководных зон и топография берега.

5.6. Наводнения, паводки

Для оценки актуальности изучения наводнений можно сравнить число жертв от них с количеством пострадавших от землетрясений и тайфунов. За последние 40 лет XX века от землетрясений и тропических циклонов погибло 2 млн. человек. И столько же жизней унесло одно наводнение в Китае в 1959 году. Причем в 1931 году при прорыве дамбы на р. Янцзы погиб 1 млн. человек.

Естественно, и в более древние времена наводнение наносило большой урон людям и воздействовало на них больше, чем сейчас. Так, сильнейшее наводнение произошло примерно 5 600 лет назад в долине рек Тигр и Ефрат в Месопотамии (Ирак), в устье рек, которые впадают в Персидский залив. Оно было столь значительным, что нашло отражение в Библии как всемирный потоп, а плот Ноя, как сказано там же, нашли в Армении (гора Арарат) на расстоянии 300–400 км от Ирака.

Впоследствии катастрофические наводнения происходили не раз в истории Земли. Задача науки – найти пути, позволившие свести к минимуму жертвы и ущерб.

Они столь хорошо и практически всем людям известны, что, казалось бы, почти не требуют описаний. Причины всем очевидны. Рассмотрим это катастрофическое явление.

Наводнение – это затопление местности в результате подъема уровня воды в реке, озере или море. Причины: осадки в виде дождя; таяние снега, ледников; ветровые нагоны при заторах (обвалы, оползни) в виде землетрясений.

Что считать наводнением? Вот разные точки зрения: а) река выходит из своего обычного русла; б) вода поднимается выше поймы; в) население и хозяйство потерпели ощутимый урон.

Видимо, в каждом конкретном случае должны быть свои критерии, учитывающие природную и социально-экономическую специфику. Но, думается, что затопление большей части поймы можно считать наводнением.

«Однако бывают ливневые наводнения, которые буквально обрушиваются на 2–3 часа. Так случилось в центре Москвы 29 июля 1924 года: по Тверской и Кремлю неслась настоящая река, и по ней плыли газетные киоски. Пруды зоопарка вышли из берегов и слились в озеро с соседними улицами» [Гостюшин, 1995, с. 407]. Другим примером внезапного наводнения был июльский ливень 1948 года в Кишиневе, превративший некоторые улицы в овраги глубиной пять-шесть метров.

Гидрогеологи выделяют четыре типа наводнений: низкие, высокие, выдающиеся и катастрофические.

Низкие наводнения наблюдаются на равнинных реках. Они бывают обычно раз в пять-десять лет. Этот вид наводнений, как правило, не нарушает обычной жизни.

Высокие наводнения на речных долинах могут заливать большие участки. Иногда они значительно нарушают привычный ритм работы и жизни людей. В некоторых случаях приходится прибегать даже к эвакуации. Такие мероприятия предпринимались ранее, в прошлом веке, один раз в 20–25 лет. Однако в последнее десятилетие прошлого века и тем более в начале XXI века такие явления стали значительно чаще, иногда они следовали буквально через год. Современникам хорошо известны наводнения в Европе, России в недавние годы (2005-й, 2006-й и др.).

Выдающиеся наводнения (раз в 50–100 лет) затопляют не менее 50 % городов и населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий и требуют массовой эвакуации населения.

Катастрофические наводнения происходят раз в 100–200 лет, при них затопляется несколько речных систем, что полностью меняет уклад жизни людей в этой местности.

Кроме наводнений, описанных выше, могут иметь место явления, известные как *паводки*. Это сравнительно кратковременный и непериодический подъем уровня воды, возникающий в результате быстрого таяния снега, ледников, обильных дождей. Следуя один за другим, они могут образовывать *половодье* и вызвать наводнение.

О половодье обычно заранее сообщают гидрометеорологи, гидрогеологи, МЧС через средства массовой информации. То есть время подъема воды от весеннего таяния снегов известно, и население об этом оповещается. Однако паводок в виде кратковременного подъема воды, происходящего из-за ливней или зимних оттепелей, прогнозировать значительно труднее.

Еще сложнее прогнозировать подъем уровня в реках из-за нагона воды с моря или водохранилища. Тем более сложнее предсказать и прогнозировать наводнения, вызванные прорывом плотины. Величина паводка может быть значительной. Заметим, что самый большой за всю историю наблюдений в Москве был в апреле 1908 года. Он достигал девяти метров. Большая часть территории Москвы была затоплена.

Пути решения: прогноз и регулирование

Для прогноза необходимо первоначально оценить максимально возможные наводнения. Это не так просто, так как период наблюдений зачастую исчисляется десятками и сотнями лет, а глобальные процессы, чтобы оценить и установить максимальные события, длятся сотни и тысячи лет.

Рассмотрим типичный для Русской равнины гидрограф стока (рис. 5.9).

Как видно на рисунке, основной пик обусловлен весенним половодьем, меньший – осенними дождями. Но на Дальнем Востоке, например, очень часты наводнения в летний период. Здесь они вызваны муссонными дождями, циклонами, тайфунами. Муссоны (*фр.* mousson, от *араб.* маусим – сезон) – это сезонные ветры, меняющие два раза в год свое направление, обусловлены нагреванием материка. Зимние муссоны направлены с суши

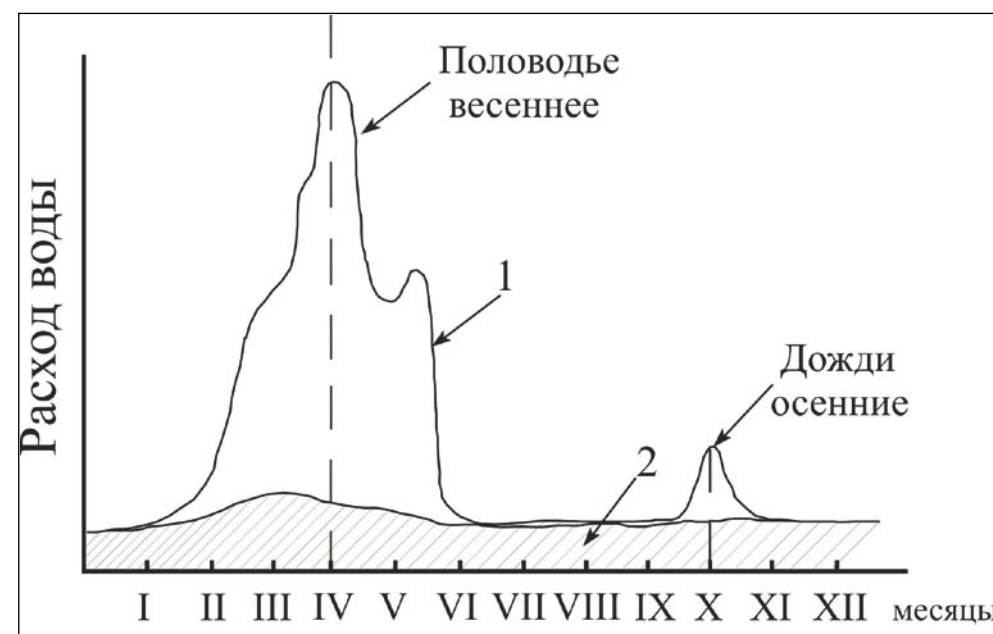


Рис. 5.9. Гидрограф стока: 1 – поверхностная составляющая речного стока; 2 – подземная составляющая речного стока.

на море, летние – с океана на сушу. Сопровождаются они обильными осадками.

Сложность прогноза наводнений в том, что преувеличение возможного максимального расхода воды ведет к удорожанию гидротехнического строительства, поэтому нужен оптимальный и обоснованный, максимально реалистичный прогноз.

Меры защиты от наводнения общеизвестны. Это строительство заградительных дамб и эвакуация людей и имущества. Для борьбы с ними строят гидротехнические, агроомелиоративные сооружения. В России и государствах СНГ и Прибалтики полезный объем водохранилищ составлял более 500 куб. км. Это позволяло уменьшить паводок на 15 %, благодаря чему ущерб от наводнений и паводков уменьшился на 30 %. Заметим, что в мире полезный объем водохранилищ 3 тыс. км.

В случае, если наводнение произошло, прежде всего необходимо знать главное: при эвакуации необходимо принять меры безопасности – отключить газ, воду, электричество, погасить огонь в печках, перенести на верхние этажи ценные предметы и вещи, закрыть окна и двери, при необходимости забить их на первых этажах досками или фанерой.

Разрушение населенных пунктов происходит при прямом воздействии, то есть когда вода заливают улицы, дворы и первые этажи зданий, а также при подтоплении, когда она проникает в подвалы через канализацию и резко поднимается уровень грунтовых вод. В обоих случаях повреждаются фундаменты зданий, происходит обрыв труб, газопроводов, магистралей электричества и связи.

ГЛАВА 6. ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И СВЯЗАННЫЕ С НЕЙ ПРОЦЕССЫ

Атмосфера является одной из самых динамичных сфер вращающейся Земли. Перемещение воздушных масс быстротечно, так как среда реагирует, и почти мгновенно, на малейшие изменения физических параметров (температуры, плотности, вязкости и т. д.).

6.1. Глобальная циркуляция и основные атмосферные явления

Глобальная циркуляция воздушных масс хорошо известна и связана с распределением атмосферного давления с полярными максимумами, субполярной зоной пониженного давления, максимумом близ 35° северной и южной широты и минимумом вблизи экватора (рис. 6.1).

Первоначально воздух, нагреваясь над экватором, поднимается и движется на большой высоте к полюсу. При этом он опускается в зоне *штилей* и перемещается вблизи поверхности к экватору. Пассатные ветры образуются в результате действия силы Кориолиса, которая отклоняет воздушные массы от меридионального направления к востоку. Циркуляция вне зоны пассатных ветров носит более сложный характер. Типичное распределение и направление ветров в Северном полушарии на высоте 5 км показывает рис. 6.2.

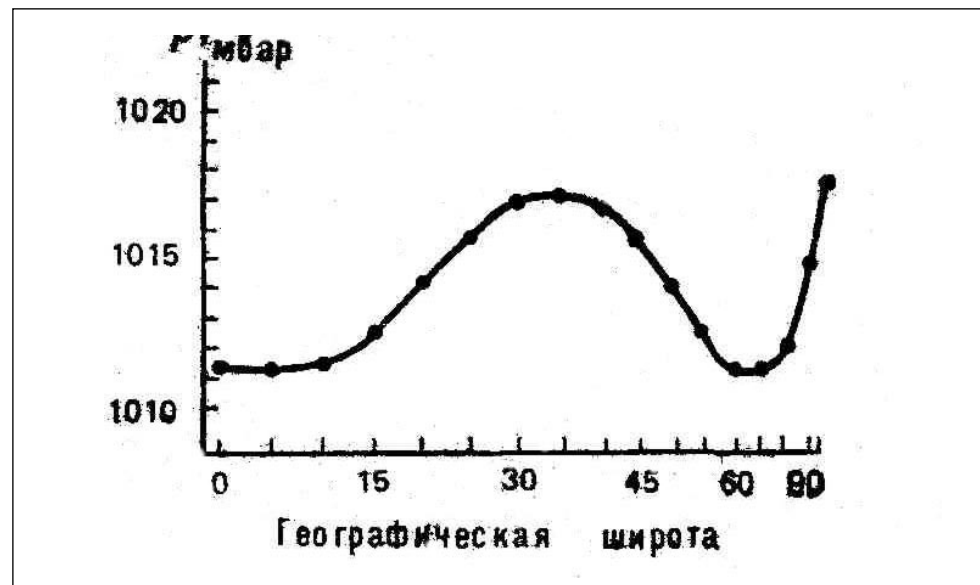


Рис. 6.1. Типичное распределение атмосферного давления на уровне моря по R. L. Pfeffer [Шейдеггер, 1981].

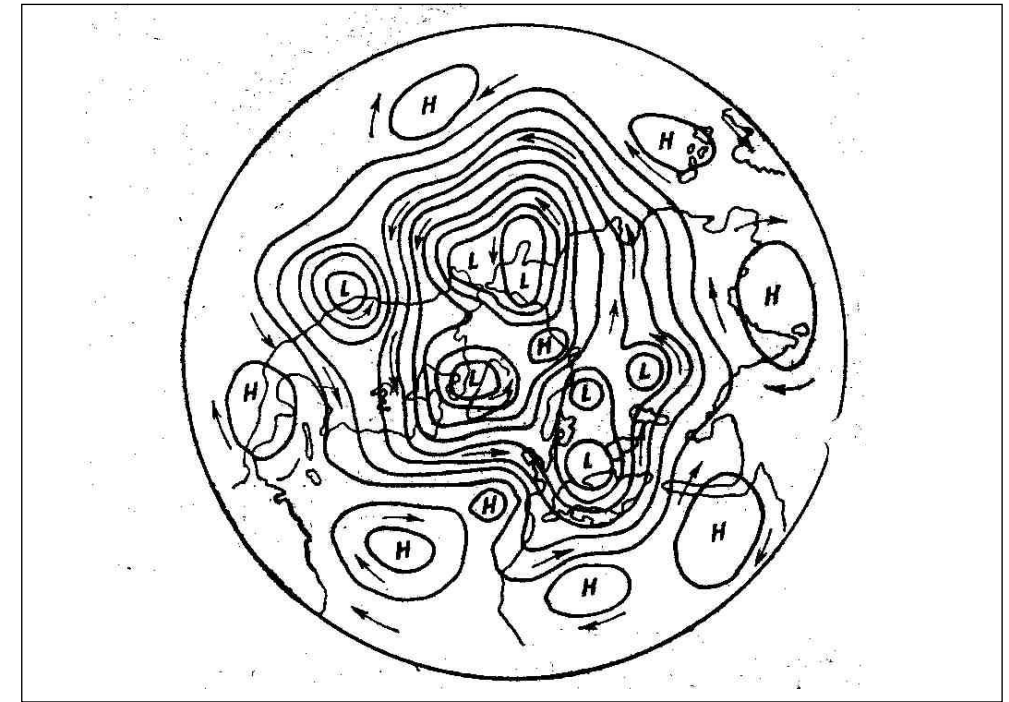


Рис. 6.2. Типичное распределение давлений и направлений ветра в Северном полушарии на высоте около 5 км по R. L. Pfeffer [Шейдеггер, 1981]: H (high) — центры антициклонов с высоким давлением; L (low) — центры циклонов с низким давлением.

Ветры возникают в результате перемещения воздушных масс из области высокого в область низкого давления. Сила ветра зависит от барического градиента (разность атмосферного давления) и расстояний между взаимодействующими областями. Чем ближе они находятся, тем быстрее происходит выравнивание перепадов давления и тем выше скорость ветра. При этом движение воздушных масс происходит почти вдоль изобар. Под влиянием вращения Земли происходит отклонение воздушных потоков вправо в Северном полушарии. Направление ветра зависит от взаиморасположения областей высокого и низкого давления, вращения Земли и прогрева ее поверхности. Сильные, до ураганных, порывы ветра могут вызвать значительные повреждения и угрожают жизни людей.

В начале прошлого века адмирал Бофорт разработал шкалу для определения силы ветра в баллах. Ею моряки пользуются до сих пор. Зависимость между силой ветра и его скоростью выражается уравнением:

$$V = 0,88 V^{1,44}. \quad (6.1)$$

Ветер начинает вызывать повреждения при скорости около 20 м/с. Центральноевропейский рекорд по скорости держит чехословацкая метеостанция на оз. Скальное Плесо (78,6 м/с, или 283 км/час). Скорость ветра

в глубоких тропических циклонах иногда превышает 50–100 м/с. Человек удерживается на ногах при скорости ветра до 36 м/с (130 км/ч).

Движение воздушных масс в циклонах и антициклонах обусловлено силой Кориолиса (сила инерции вращения – отклонение точки в направлении, перпендикулярном к ее относительной (V) и угловой скорости (ω) и перепаду температур и давлений [вертикальный температурный градиент близок 1°C на 100 м подъема]). Сила Кориолиса F_c направлена по нормали к вектору скорости ветра V вправо в Северном полушарии и влево – в Южном:

$$F_c = 2\omega V \cdot \sin\phi, \quad (6.2)$$

где ϕ – широта, ω – угловая скорость Земли ($7,29 \times 10^{-5}$ рад/с). Вторая сила F_p связана с горизонтальным градиентом давления. Обозначив его как $\partial P / \partial n$, получим:

$$F_p = 1/\rho \cdot \partial P / \partial n, \quad (6.3)$$

где ρ – плотность движущегося воздуха. F_c должна быть равной F_p в стационарном положении, поэтому, приравняв, получим:

$$V = \frac{1}{2\rho\omega \cdot \sin\phi} \frac{\partial p}{\partial n}. \quad (6.4)$$

Стационарные центры атмосферы (ЦДА) формируют среднее многолетнее барическое поле и атмосферную циркуляцию, в том числе над Тихим океаном и прилегающими материками. «Сезонная смена температуры воздуха над этими материками создает в западной части океана муссонную изменчивость давления и направлений ветра. Большая часть акватории океана находится под влиянием стационарных субтропических антициклонов Северного и Южного полушарий. Они существуют весь год и летом усиливаются, центры их сдвигаются в субтропические широты, а площадь действия увеличивается. Зимой среднее месячное давление в центральной части уменьшается на 5–7 мб (миллибар), и центры их также смещаются на $10\text{--}15^\circ$ по направлению к экватору по сравнению с летом. Сезонное смещение центра и изменение давления в северном тихоокеанском максимуме больше, чем в южном» [Тихий океан, 1982, с. 16].

Над северной частью Тихого океана зимой формируется Алеутский минимум с давлением 1000 мб и менее, который летом сменяется северо-западной периферией субтропического антициклона. В Южном полушарии в умеренных и приполярных широтах весь год сохраняется низкое давление. Барическое поле в центральной и восточной частях Тихого океана приводит к постоянным ветрам, которые направлены от тропиков к экватору с западной составляющей. С востока на запад приблизительно до 150° в. д. уклонение ветра от меридионального направления возрастает. Пассатные ветры в Тихом океане наиболее стабильны как по скорости, так и по направлению. В его западной части с сезонным ходом давления

над прилегающими материками связана смена поля давления и циркуляции в атмосфере, которая обуславливает муссоны.

Северные и северо-западные потоки над западом Тихого океана создают обширный (до 1040 мб) зимний антициклон над Центральной Азией и Сибирью. В теплое время года он сменяется областью пониженного давления.

В областях волновых возмущений на тропических фронтах образуются тайфуны с давлением в центр 890–900 мб, большими градиентами внутри и ветрами до 50 м/с и более. Они возникают в Северном полушарии в зоне от $5\text{--}10$ до 30° с. ш. и от 110 до 150° в. д., а в Южном полушарии – от $5\text{--}10$ и 40° ю. ш. и 130° в. д. и 150° з. д. [Тихий океан, 1982].

Для детального анализа временного хода давления и географического положения ЦДА могут использоваться специальные каталоги параметров атмосферной циркуляции и архивы среднего месячного атмосферного давления на уровне моря Национального центра атмосферных исследований США (National Center of Atmospheric Research – NCAR), называемые архивом Тренберса, и другие каталоги, например для Азиатско-Тихоокеанского региона. Известны характеристики центров действия атмосферы. Так, Японское море находится в переходной зоне между морскими и континентальными ЦДА. Причем зимой градиенты давления увеличиваются в три-четыре раза, следствием чего являются муссоны и рост циклонической активности этой зоны в целом [Дашко, Варламов, 2000].

Большинство грозных атмосферных явлений, способных нанести большие разрушения, представлено различными формами вихрей. Их кинетическая энергия, по L. J. Battan [Шейдеггер, 1981], достигает у циклонов $4 \cdot 10^{17}$ Дж, ураганов $4 \cdot 10^{16}$, торнадо $4 \cdot 10^{10}$, пылевых смерчей $4 \cdot 10^7$ Дж. Заметим, что энергия рядового урагана больше энергии, вырабатываемой всеми гидроэлектростанциями мира.

6.2. Циклоны: общие сведения

Дадим определения вихрям, именуемым циклонами и ураганами. *Циклон* (от гр. *kyklōn* – кружащийся) – это область пониженного давления в атмосфере с минимумом в центре [Большой..., 1991]. Ветер в нем дует против часовой стрелки в Северном полушарии, в Южном – наоборот. Диаметр циклонов обычно не превышает трех-четырёх тысяч км, скорость поступательного движения – около 60–90 км/час с максимумом днем и минимумом ночью. *Ураган* (фр.) – это тропический циклон со скоростью ветра более 35 м/с. В разных частях света тропические циклоны называют по-разному: ураган, хурикан или циклон – в Америке, Атлантике, в Карибском бассейне и Бенгальском заливе; уилли-уилли – в Австралии и Океании и багио – на Филиппинских островах. В Юго-Восточной Азии и на Дальнем Востоке их называют *тайфунами* (от *kit.* «тай фын» – большой ветер).

Таким образом, можно говорить о тропических и внетропических циклонах.

Внетропические циклоны имеют диаметр в пять-десять раз больший, то есть от тысячи до нескольких тысяч километров. Они характеризуются

сравнительно малыми перепадами давлений, лишь в исключительных случаях давление в них падает ниже 970 мбар. В тропических циклонах давление ниже 950 мбар совершенно обычно (рекорд представляет давление в 877 мбар, наблюдавшееся в 1958 году в тайфуне Ида).

Существуют различия и в величине барического градиента. Для внетропических циклонов типичным является барический градиент 1–3 мбар на 100 км (абсолютное исключение представляет градиент 10 мбар), в то время как для тропических циклонов он достигает 60 мбар на 100 км, в центре циклона может равняться и 20 мбар на 20 км.

При прохождении тропического циклона давление за 10–20 мин. может измениться приблизительно на 40 мбар, отсюда и разница скорости ветра: для внетропических циклонов нормальная скорость ветра – 5–10 м/с, в тропических – 50–70 м/с при рекордной скорости около 100 м/с.

Ежегодно образуется в целом 70–80 тропических циклонов, однако лишь небольшая их часть достигает разрушительной силы, и только часть из них, в свою очередь, захватывает сушу. В качестве одного из последних примеров можно привести ураган Нандис, прошедший в Юго-Восточной Азии 3 мая 2008 года, погубивший 35 000 человек и нанеший наибольший урон г. Ньяма.

Иногда тропические циклоны относят к ряду наиболее разрушительных природных катастроф. Число жертв от них за историческое время приближается, по-видимому, к миллиону. Губительная сила циклонов, тайфунов и ураганов заключается в первую очередь в колоссальной скорости ветра, который воздействует на сушу и вызывает волнение на море (ветер, наводнения, штормовые волны).

Причем надо отметить, что возникновение циклонов, ураганов, торнадо тесно связано с температурой воздушных масс в атмосфере. Перераспределение же тепла – это необходимое и полезное действие в целом для всей Земли. Возникновение торнадо в первую очередь прямо связано именно с нагреванием воздушных масс над экватором, смещением их в более прохладные широты к полюсам. Затем наблюдается столкновение холодных и теплых масс, перемешивание их, вращение, растягивание вращающейся области вверх и вниз к земле, образование воронки и так называемого «хобота», перемещающегося по земле и приносящего большие бедствия. В начале же этого процесса лежит нагрев воздушных масс. Поскольку в настоящее время наблюдается общее и значительное (даже резкое) повышение температуры атмосферы Земли, можно сказать, что в дальнейшем следует ожидать увеличения числа атмосферных вихрей (ураганов, торнадо).

Разрушительность действий циклонов связана с турбулентным вихревым перемещением воздушных частиц. Сильный, разрушительный ветер при циклонах связан с низким давлением в их центре (глазе циклона). Губительно действуют также чрезвычайно обильные дожди, которые вызывают наводнения.

Зарегистрированы случаи, когда количество осадков достигало до 200 мм. Однако бывают и исключения: некоторые циклоны могут быть сухие. Влияние тропических циклонов иногда сказывается не только в верхних слоях тропосферы (до 11 км), но и выше (до 15 км).

Рассмотрим структуру тропического циклона (рис. 6.3).

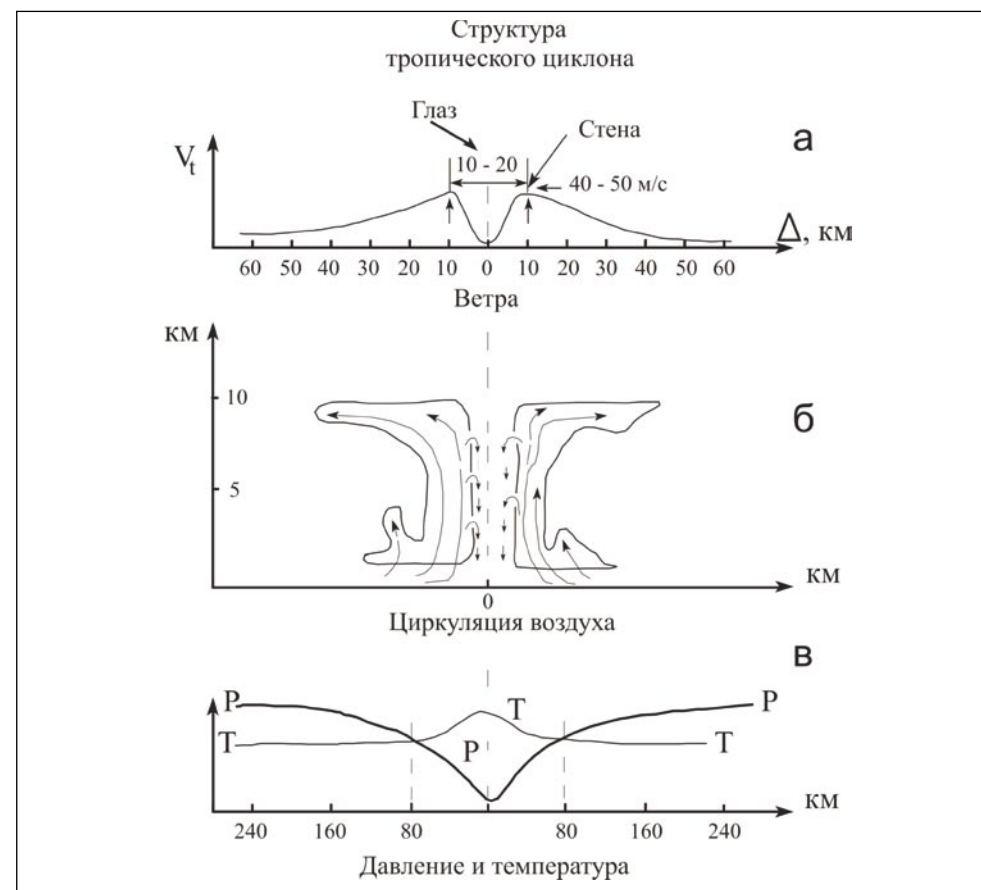


Рис. 6.3. Структура тропического циклона (а), циркуляция воздуха (б) и кривые давления и температуры (в) в циклоне [Кукал, 1985].

Диаметр внутренней части циклона, называемой *глаз*, чаще всего составляет 10–20 км. Здесь царит спокойствие, небо ясное (рис. 6.3, а). Глаз окружен *стеной*, где ветры достигают максимальной скорости. В стене осуществляются не только вихревые, но и восходящие потоки воздуха (рис. 6.3, б). Часть воздуха в окраинных зонах циклона втягивается внутрь, другая выпускается. Соотношение давления и температуры в циклоне отражает рис. 6.3, в.

6.2.1. Причины возникновения тропических циклонов

Они достаточно сложны и продолжают изучаться. При возникновении циклонов или тайфунов большое количество влаги поднимается вверх при первоначально небольших скоростях вертикального движения воздуха. В дальнейшем, конденсируясь на высотах в облаках, пар выделяет огромное количество скрытой теплоты. Это приводит к углублению циклона и усилению вертикальной конвекции в его центре, также к увеличению кинетической энергии и скорости ветра. Как правило, тайфуны

возникают над океаном с температурой поверхностных вод выше $26-27^{\circ}$ в слое толщиной несколько метров. Такие условия имеют место в юго-западной части Тихого океана [Тихий океан, 1982].

Что касается тропических циклонов Атлантики и Карибского моря, то они также возникают над поверхностными водами, прогретыми выше $26-27^{\circ}$ С. При этом их площадь нагретой морской поверхности должна быть достаточно велика ($\sim 8,5 \times 10^6 \text{ км}^2$). Теплый и влажный воздух вовлекается в циркуляцию и обеспечивает процесс энергией.

Тропические циклоны зарождаются постоянно. Происходит это вблизи экватора, чаще всего в полосе между 5 и 10° северной или южной широты. На первой стадии еще отсутствует полная круговая циркуляция воздуха, глаз циклона еще не виден, скорость ветра не превышает 30 м/с , а давление не падает ниже величины в 1000 мбар . Такое состояние сохраняется около 12 часов, затем циклон перемещается и созревает. Он еще мал: диаметр его $D = 50-60 \text{ км}$, однако его барический градиент повышается, давление падает ниже 1000 мбар .

Затем наступает стадия зрелости, когда захватываются соседние воздушные массы, вращательное движение охватывает зону шириной в несколько сотен километров, образуется глаз циклона, ограниченный стеной, давление в глазе падает ниже 950 мбар . Эта стадия длится $12-24$ часа, в исключительных случаях – более недели. После этого циклон начинает движение. Пройдя зрелую стадию и сместившись в средние широты, циклон утрачивает симметрию. Над сушей он не существует долго, так как для пополнения энергии ему необходим океанский теплый и влажный воздух.

Тропические циклоны чаще всего перемещаются со скоростью $30-50 \text{ км/час}$. В Атлантике и Тихом океане они сначала движутся на запад, затем поворачивают на север и северо-восток. Над сушей их трассы становятся незакономерными: они поворачивают, возвращаются вспять и пересекают свою трассу. Такие циклоны очень опасны. Их называют блуждающими. Энергия тропических циклонов колоссальна, точно вычислить ее трудно. Считается, что циклон средней силы выделяет приблизительно такое же количество энергии, сколько $500\,000$ атомных бомб, аналогичных сброшенной над Хиросимой.

6.2.2. Распределение циклонов

Образование тропических циклонов в пределах года неравномерно. Так, в Карибском море и Мексиканском заливе они обычно возникают в сентябре и октябре, а в декабре–марте изредка. В Южном полушарии, наоборот, циклоны наблюдаются в начале календарного года. Тропические циклоны могут проявлять свою губительную силу и в областях, расположенных за пределами тропиков, но они никогда не возникают на экваторе (между 0 и 5° северной и южной широты), видимо, потому что там Кориолисова сила слишком мала. В своем поступательном движении на север циклоны могут достигать даже широты 45° . Случается, что, пересекая Атлантику, они достигают Европы. В западной части Тихого океана тайфуны доходят до 45° с. ш., достигая Сахалина и Камчатки.

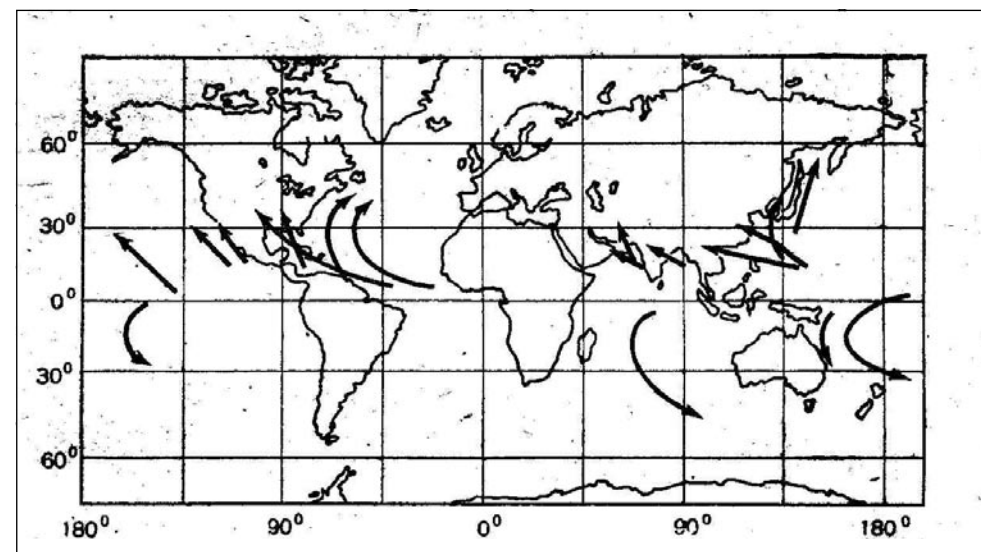


Рис. 6.4. Основные области развития ураганов и главные направления их движений [Шейдеггер, 1981].

После прохождения стены тайфуна, где ветры самые сильные, давление резко падает, а температура повышается, ветер может совершенно стихнуть. Это положение сохраняется недолго: глаз тайфуна перемещается, и надвигается противоположная стена.

6.2.3. История, предупреждение и защита

С тропическими циклонами хорошо знакомы моряки. Так, несколько раз он застигал Христофора Колумба, который в 1493 году попал в слабый циклон у Азорских островов, а на следующий год у Гаити – в сильный. О циклоне 1502 года на Гаити известно, что он потопил 20 судов и погубил 50 человек.

Английский инженер С. У. Рейд описал ураган на о-ве Барбадос в 1831 году, а в 1847 -м опубликовал инструкцию по прогнозу. В 1873 году было организовано три первые станции для наблюдения и предупреждения о зарождении циклонов: две на Кубе и одна на Ямайке.

Первое предупреждение о надвигающемся тайфуне было выдано 23 августа 1873 года. В США централизованная служба была организована в 1935 году (77 станций на атлантическом побережье на расстоянии 100 км друг от друга).

В 1943 году американский летчик Дж. Дакворт пролетел через глаз циклона и получил важные данные, а с 1960 -го стали использовать метеорологические спутники.

На Кубе централизованная служба осуществляется Метеорологическим институтом в Гаване. Исследованиями циклонов заняты 300 научных сотрудников, и в сезон циклонов прогнозы выдаются четыре раза в сутки. Когда в океане зарождается циклон, вычисляется его предполагаемая траектория и за 36 час. до его прихода дается предупреждение. Если

предполагаемая трасса подтверждается, за 24 час. до ожидаемого прихода циклона объявляется тревога.

Американским национальным центром по исследованию ураганов составлен их подробный перечень с указанием числа жертв, класса и интенсивности. Самым сильным стал ураган в 1936 году на п-ове Флорида, отнесенный к пятому классу с давлением в центре 892 мбар.

Наибольший ущерб (21 млн. долларов) нанес ураган Агнес в 1959 году, который охватил штат Миссисипи, он также отнесен к пятому классу. Хорошо известен в США и недавний ураган Катрин, затопивший Нью-Орлеан.

На Кубе ураганы в соответствии с силой ветра делятся на три класса. Например, с 1800 по 1963 год их зарегистрировано 152. Из них самых сильных (со скоростью ветра 40–52 м/с) – 46, умеренных (скорость ветра от 31–52 м/с) – 76.

На Курилах в 1976 году памятен тайфун Тип, на Сахалине в 1981-м – Филлис.

Тайфуны Бенгальского залива (Индийский океан) имеют на своем счету много жертв. Они способствуют возникновению штормовых нагонов, затапливающих низменные, густозаселенные побережья. Территория нынешней Республика Бангладеш тяжело пострадала в 1937 году, когда 100 тыс. человек были смыты штормовым нагоном, а еще 200 тыс. погибли от эпидемий и голода.

Тайфун в октябре 1881 года, достигший восточного побережья Вьетнама и его тогдашней столицы Хайфона, считается вообще самым губительным, поскольку он унес не менее 700 тыс. жизней.

Упомянем еще о двух тайфунах, которые вошли в историю, так как разрушили до основания целые города. Один из них случился 3 сентября 1930 года в Санто-Доминго (ныне столица Доминиканской Республики) и не оставил в городе ни одного неповрежденного здания. Тайфун Жаннет 27 сентября 1955 года полностью уничтожил мексиканский город Четумаль (там осталось четыре целых дома). Число жертв этих ураганов точно не названо, однако ясно, что речь должна идти о тысячах погибших.

Циклоны изменяют ландшафт. На что природе в ее нормальной жизнедеятельности и при обычных темпах потребовалось бы 50 лет, одному циклону удастся сделать за несколько часов. Некоторые изменения, вызываемые циклоном, необратимы, это означает, что природа уже никогда не сможет их исправить.

6.2.4. Защита от циклонов

Защититься от тропических циклонов – это значит принять меры защиты от действия ветра и затопления. Ветер разрушает и убивает, губительными могут быть и летящие по ветру обломки. Ветер со скоростью 28 м/с оказывает давление 55 кг/м². При скорости 56 м/с оно составит уже 280 кг/м². Отмечено и действие низкого давления в глазе тайфуна: случилось, что дома и предметы разрушались за счет избыточного внутреннего давления. Меры защиты от наводнений известны и описаны в разделе 5.6. Заметим, что с помощью радиолокаторов удастся обнаружить циклон на расстоянии 280–320 км, а их облачность четко распознается на фотографиях с метеоспутников.

При приближении тайфуна нужно проверить радио- или телеприемник и следить за сообщениями; избегать пляжей и прибрежных участков; забить окна и витрины толстой фанерой или досками; приготовить запасы воды и продуктов; открыть окна и двери с подветренной стороны – это поможет выровнять давление; во время прохождения глаза циклона можно выйти из укрытия и осмотреться. Помните, что при скорости смещения 60 км/час время прохождения глаза циклона составит 20 минут, поэтому не отходите от укрытия далее 50 м: последующие порывы ветра начнутся внезапно.

Защита от тайфунов может быть и активной. Первый опыт их разрушения был осуществлен в 1947 году. Он заключается в том, чтобы рассеять энергию циклона. В этих целях в стене тайфуна распыляли сухой лед, который должен был послужить в качестве ядер кристаллизации, а в 1960 году – йодид серебра. В результате распыления удалось снизить скорость ветра на 10 %, а в 1969-м – даже на 30 %.

6.3. Торнадо

6.3.1. Общие сведения о торнадо

Торнадо – воронкообразная область низкого давления диаметром от 0,1 до 1,5 км. Представляет собой атмосферный вихрь, возникающий в грозовом облаке и распространяющийся вниз, часто до поверхности Земли. В этом вихре скорость ветра может достигать чрезвычайно большой величины – 300 м/с, или более 1000 км/ч. Такая скорость не может быть измерена никакими приборами, она оценена экспериментально и по степени воздействия торнадо. Например, отмечалось, что при торнадо щепка вонзается в ствол сосны. Это отвечает скорости ветра выше 200 м/с.

Торнадо возникают на периферии малоподвижных циклонов (со скоростью движения ниже 30 км/ч). В других случаях они от циклонов не зависят. Типичные торнадо, спустив, словно слон, свой «хобот» диаметром несколько десятков или сотен метров из низкого грозового облака, движутся по незакономерной трассе, разрушая полосу земли шириной несколько сот метров. Скорость поступательного перемещения торнадо составляет 40 км/ч. Различна и длина их пути: одни исчезают, не пройдя нескольких километров, другие способны пройти более ста. В миниатюре торнадо напоминает циклон, например, своим круговым вихревым движением воздуха и низким (на 100–200 мбар по оценочным данным) давлением, чем за его пределами. В пустынях США существует два вида вихревых ветров, называемые классическими торнадо и «пустынными дьяволами». Последние напоминают перевернутые воронки и не связаны с облаками.

Процесс возникновения торнадо до конца не ясен. Очевидно, они образуются в моменты устойчивого расслоения воздуха, когда нагревание земной поверхности приводит к нагреванию и нижнего слоя воздуха. Выше оказывается воздух более холодный, поэтому такое положение неустойчиво. Теплый воздух устремляется вверх, холодный опускается. Часто это происходит над небольшими холмами.

Сильные торнадо оставляют за собой полосу опустошенной земли. Опубликованы снимки домов без крыш, деревьев, вырванных с корнем из

земли, поднятых в воздух людей, автомобилей, отброшенных на десятки метров и пробитых четырехметровых стволов. Известен случай, когда в центре точки всасывания был поднят железнодорожный вагон весом 13 т. Когда путь торнадо пролегает по густонаселенной местности количество жертв достигает значительной величины. Так, 11 апреля 1965 года над территорией Среднего Запада США возникло 37 торнадо, которые обусловили гибель 270 человек. В 1999 году в США было зарегистрировано 1 225 торнадо, от которых погибло 94 человека.

Кроме США торнадо нередки в Индии, Бангладеш, Японии, Аргентине, Австралии. В Европе тоже могут возникнуть сильные торнадо. Опасные вихри образуются иногда в бассейне р. Дон и кубанских степях. Например, в Ростове-на-Дону 24 августа 1953 года случилось торнадо со скоростью ветра 60–80 м/с, то есть 216–288 км/ч. 10 июля 1968 года сильный торнадо зародился в ФРГ недалеко от границы Чехословакии. Он прошел 125 км от р. Рейн до северных отрогов Черного леса. В этот период в ФРГ наблюдались прямо-таки субтропические погодные условия: температура воздуха превышала 30° С при влажности 96 %. На высоте 1000–2000 м произошло резкое охлаждение, и холодный воздух, закручиваясь винтообразно, устремился к земле. Торнадо оставил после себя 200-метровые лесные заломы, а отдельные населенные пункты уничтожил более чем наполовину. Ветер сносил крыши и выкидывал из домов предметы. Торнадо стал причиной гибели несколько десятков человек и причинил ущерб в размере 50 млн. марок ФРГ.

6.3.2. Защита от торнадо

Защита от торнадо проблематична. Они возникают неожиданно. Определить их траекторию невозможно. Помочь может передача предупреждений по телефону от города к городу, от фермы к ферме. Иногда предупреждения доставляли автомобилем. Наилучшая и, по-видимому, единственная защита от торнадо – это подвал либо прочное здание.

6.4. Пыльные бури

6.4.1. Общие сведения

Пыльные, или черные, бури – известное опасное явление в пустынях, полупустынях и распаханных степях, когда миллионы тонн пыли и песка переносятся жарким сухим ветром на сотни – первые тысячи километров. Обычно они случаются летом. При пыльных бурях одни территории площадью многие тысячи кв. км эродированы, другие оказываются занесенными бесплодной пылью или песком, включая города. Пыль вызывает удушье и приводит к болезням, от нее в значительной мере страдают приборы и любая техника. Пылевые бури могут разносить опасных паразитов, которые являются причинами тяжелого заболевания, именуемого болотной лихорадкой. Такого отрицательного воздействия пыльных бурь, а некоторые из них могут стать настоящими катастрофами.

Пыльным бурям подвержены несколько областей Земли. В первую очередь, конечно, это пустыни, например Сахара. Стена пыли длиной до 2500 км и шириной 600 км может даже пересечь Атлантику и быть об-

наружена в Южной и Центральной Америке. Другой областью распространения пыльных бурь является Судан, страны Аравийского п-ова и соседние Ирак и Сирия. Там пыльные бури налетают главным образом с северо-запада и носят арабские имена *Хамсин* или *Шамаль*. В Багдаде до 15 дней в году пыльные бури, в Южном Кувейте – 18. Но не только далеким от нас странам и пустыням свойственны такие явления, как пыльные бури. От них страдают Поволжье, северные предгорья Кавказа, юг Украины и особенно Средняя Азия, Монголия и равнинный Китай.

6.4.2. Предупреждение и защита

О пыльных бурях предупреждает метеослужба. Как правило, они возникают на периферии антициклона. Сначала спасаются бегством животные, затем у горизонта появляется черная полоса, которая ширится на глазах. За несколько десятков минут она затягивает весь небосвод. Внутри бури видимость ничтожна. Ощущается резкое понижение температуры (приблизительно на 10° С), и через некоторое время обычно начинается дождь.

Правила защиты: находясь в автомобиле, закройте окна и оставайтесь внутри машины; если вы без автомобиля, подыщите защищенное от ветра место, прикройте голову платком и ложитесь на живот лицом к земле; если укрытия нет, ложитесь головой в направлении, противоположном ветру, и лицом к земле. Главное – сохранять спокойствие и переждать пыльную бурю.

ГЛАВА 7. ЭНЕРГИЯ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И КАТАСТРОФ, СИНЕРГЕТИКА И НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА

7.1. Источники энергии геодинамических процессов и катастроф, их градации по силе, продолжительности, частоте, периодичности и бифуркации

Первое, что необходимо оценить при классификации, относить ли происшедшее к катастрофе или достаточно считать искомое событие лишь опасным природным явлением? Для оценки важно дать определение (критерии), а затем количественные характеристики отдельных видов катастроф. Саму формулировку (определение), исходя из названных критериев, мы дали во введении и более широко в первой главе.

Однако при кажущейся простоте в строгой форме это сделать непросто или даже невозможно. Причем если формулировку (определение) того, что является природной катастрофой, мы давали, и это в принципе сформулировать можно, то для объективной количественной и однозначной оценки требуется более широкое рассмотрение, так как не всегда можно сказать, что считать катастрофой. Это связано с тем, что некое событие, которое для отдельного человека или группы лиц является полной жизненной катастрофой (например, гибель самого близкого человека), для других людей это просто информационное сообщение. Более того, даже гибель довольно значительного числа незнакомых людей, например, в другой особенно далекой и малоизвестной стране, может для некоторых (даже многих) людей не являться катастрофой. Поэтому количеством погибших нельзя (неэтично) классифицировать катастрофы.

Рассмотрим, например, такое явление, как гроза. Обычно она неопасна. Однако иногда гроза может привести к катастрофе и большим жертвам. Например, гроза, сопровождающаяся молнией, попавшей в какой-нибудь объект на земле и вызвавшей пожар, может привести, например, к взрыву на нефтехранилище, что уже явится, безусловно, катастрофой.

Следующий пример – выпадение осадков, допустим, дождь – общеизвестное природное, зачастую вполне обычное и даже полезное явление. Но длительный и обильный дождь может привести к наводнению с материальным ущербом и человеческими жертвами. В другом случае – при отсутствии или прекращении этого процесса на длительное время, например, на годы, он может привести (и приводил неоднократно в истории человечества) к катастрофе (голоду).

Таким образом, важно не просто какое-либо явление, а процесс, его сила, продолжительность или, наоборот, отсутствие процесса. Именно это может привести и приводит к катастрофе. Поэтому в настоящей работе мы не только рассмотрели различные виды катастроф, но и наряду с ними различные процессы (геодинамические, экзогенные и т. п.) в различных сферах Земли и даже вне ее, которые тоже могут повлиять на жизнь на нашей планете.

Выше дана количественная и качественная оценка катастроф. Ранее данное определение термина «катастрофа» являлось качественной оценкой. Рассмотрим теперь некоторые количественные характеристики этих процессов.

7.1.1. Источники энергии геодинамических процессов и основных природных катастроф (землетрясений, извержений вулканов, цунами, вихрей)

Прежде всего следует отметить, что «массообменные и энергообменные процессы эндогенной и экзогенной природы вызывают явления, определяющие сложную структуру взаимодействия не только тектонических плит и отдельных блоков земной коры разного масштабного уровня, но также таких крупных структурных образований, как внутреннее ядро Земли, ее мантия и литосфера, атмосфера, ионосфера и магнитосфера. Из практики хорошо известно влияние атмосферных явлений в виде циклонов и антициклонов на геодинамический режим твердой оболочки Земли, и, наоборот, очень часто крупные геодинамические явления, например, в виде землетрясений, сопровождаются ярко выраженными атмосферными явлениями. Нередко крупные землетрясения, происходящие в глубине океанических областей Земли, возмущают ее гидросферу, порождая такие катастрофические явления, как цунами. Все это – свидетельства межгеосферных взаимодействий» [Адушкин и др., 2005]. Вышесказанное подчеркивает роль энергообменных процессов в геодинамике и катастрофических процессах, о которых речь идет ниже.

Назовем кратко *источники энергии геодинамических процессов*, а затем рассмотрим силу таких основных природных катастроф, как землетрясения, извержения вулканов, цунами, атмосферные вихри. Поскольку спектр источников энергии геодинамических процессов, способных привести к природной катастрофе, чрезвычайно широк (от космических явлений до процессов в глубинных недрах планеты и ее сферах, вплоть до движений воздушных масс в атмосфере), рассмотрим основные факторы.

Прежде всего это космические (галактические) явления. К ним относятся струйные потоки, падение метеоритов, астероидов и других небесных тел, взаимодействие и гравитационное влияние Солнца, Луны и других планет, процессы, связанные с Землей (ротационные, гравитационной дифференциации и т. д.), процессы в недрах – конвекция, смещения внутреннего ядра, радиоактивный распад, приливные воздействия Луны и др.

Одними из первых можно назвать источники энергии, связанные с воздействием на нашу планету процессов в Галактике. Они обусловлены периодическими пересечениями Землей струйных потоков и спиральных галактических рукавов. Вследствие этих пересечений Земля, как и все планеты Солнечной системы, подвергается интенсивным бомбардировкам галактическими кометами. Это происходит примерно раз в миллиард лет, при этом некоторые планеты меняют параметры своей орбиты. Большая энергия выделялась при бомбардировке поверхности Земли крупными космическими телами: астероидами и галактическими кометами. А. А. Баренбаум [2007] оценивает энергетическое воздействие от таких космических событий, как пролет Солнца через массивные облака звезд и мно-

жественные падения астероидов, величинами соответственно $\sim 10^{31}$ и $\sim 10^{28}$ ÷ 1029 Дж.

С преимущественной энергией столкновения планетезималей и метеоритной бомбардировкой связывает В. А. Ермаков [2002] источники тепла в нуклеарную стадию Земли. Причем образование протокры в первую стадию эндогенного породообразования (4,4–3,5 млрд. лет) он связывает с мелкочаеистой конвекцией.

Ю. В. Баркин пишет, что мощным источником энергии для всех эндогенных процессов является механизм «относительных смещений, покачиваний и деформаций ядра, мантии и других оболочек Земли, которые вызываются дифференциальными гравитационными воздействиями со стороны внешних небесных тел (Луны, Солнца и др.)» [Баркин, 2007, с. 60].

Ю. Н. Авсюк и И. И. Суворов [2007] считают, что в результате влияния Луны происходили смещения внутреннего ядра Земли в окружающем его внешнем, жидком ядре, что оценивается мощностью порядка $3\text{--}8 \cdot 10^{18}$ эрг/с. Это, кстати, соответствует необходимой мощности генератора земного магнитного поля. Энергия внешнего силового воздействия Луны и Солнца на Землю оценивается соответственно в $1,2 \cdot 10^{13}$ и 10^{12} Вт [Авсюк, 2001].

Относительно энергии радиоактивного распада можно полагать, что ее роль одно время переоценивалась в энергетическом балансе Земли и ее разогреве. Так, Ю. Н. Авсюк [2001] констатирует, что объяснить энергетику земного шара с позиций радиоактивного разогрева пород не удастся, считая ее для этого незначительной.

Мощность механизма тепловой конвекции оценивается в $3 \cdot 10^{13}$ Вт, упругая энергия приливных воздействий на мантию характеризуется величиной равной $5 \cdot 10^{24}$ эрг в цикле продолжительностью 13 часов, при этом приливные силы могут тратить на перестройку мантии мощность порядка $4 \cdot 10^{11}$ Вт [Стейси, 1972].

Важнейшей является энергия осевого вращения Земли, равная $3 \cdot 10^{36}$ эрг. При этом кинетический момент орбитального движения масс Земля–Луна вокруг Солнца: $L_1 = 2,703 \cdot 10^{47}$ эрг·с, а вокруг барицентра: $L_2 = 2,974 \cdot 10^{41}$ эрг·с.

Таким образом, известны мощнейшие источники энергии геодинамических процессов, причем мы не назвали энергию внутренних, глубинных процессов и процессов во внешних оболочках, которые приведем ниже.

Рассмотрение *количественной характеристики силы* уместно при анализе оценки уровня природного явления. Например, при землетрясениях основными их характеристиками являются сотрясаемость и магнитуда; при атмосферных явлениях – скорость ветра в циклоне (тайфуне, урагане) и температура воздуха; при наводнении – уровень и количество воды и т. п. Могут быть определены некие пороговые значения, которые применяются при оценке явлений. Существует ряд количественных параметров и шкал, по которым можно классифицировать явления. Рассмотрим энергию основных вышеперечисленных видов катастроф.

Землетрясения

Основными сейсмическими параметрами землетрясений являются магнитуда M , сейсмический момент M_0 , упругая энергия W очаговой области,

начальное τ_0 и конечное τ_1 напряжение в очаге, величина сброшенного и среднего напряжения, размеры разрыва L .

Важную количественную характеристику очага ввел в обиход в 1966 году японский сейсмолог Аки. Это сейсмический момент M_0 , который вычисляется по следующей формуле:

$$M_0 = \mu S \bar{b}. \quad (7.1)$$

Сейсмический момент M_0 равен величине механического момента фиктивной пары сил в источнике, которая вычисляется по формуле (7.1), где μ – модуль сдвига, S – площадь очага, $\bar{b}$ – средняя поддвижка в очаге.

Сейсмический момент является характеристикой длиннопериодной части спектра поверхностных волн и соответственно может быть определен по записям поверхностных волн с точностью до коэффициента $\approx 2\text{--}3$.

Следующей важной характеристикой является упругая энергия W очаговой области, высвобождающаяся при землетрясении. Ясно, что энергия сейсмических волн E_s составляет только часть W :

$$E_s = \eta W, \quad (7.2)$$

где η – сейсмический КПД $\eta < 1$. Характеристиками очага являются также начальное τ_0 и конечное τ_1 напряжение в очаге, величина сброшенного напряжения $\Delta\tau = \tau_0 - \tau_1$, среднее напряжение $\bar{\tau} = (\tau_0 + \tau_1)/2$. Пока что определить экспериментально W не удастся, но если это будет сделано, то заметно продвинет вперед сейсмологию. Упругая энергия W равна работе среднего напряжения $\bar{\tau}$ на разрыве:

$$W = S \bar{b} \bar{\tau} = \bar{\tau} / \mu \cdot M_0. \quad (7.3)$$

Размеры разрыва можно охарактеризовать радиусом a , если он близок к кругу, длиной L и шириной w , если он имеет прямоугольную форму. При рассмотрении размерных соотношений вводят характерный размер $\bar{L}$ очага, $S \sim L^2$. Изменение деформации при землетрясении $\sim \bar{b}/\bar{L}$, и если мы умножим его на модуль сдвига, то получим оценку сброшенного напряжения:

$$\Delta\tau \sim \mu (\bar{b}/\bar{L}). \quad (7.4)$$

Подставив μ , $\bar{b}$ из 7.4 в 7.1, мы получим связь M_0 с $\Delta\tau$ и S ($\bar{L} \sim S^{1/2}$):

$$M_0 \sim S^{3/2} \Delta\tau. \quad (7.5)$$

Для тех землетрясений, для которых известны как M_0 , так и S , формула 7.4 позволяет оценить величину сброшенного напряжения $\Delta\tau \sim 10\text{--}100$ бар. Известно, что для сейсмических поясов (межплитовые землетрясения) $\Delta\tau$ систематически меньше (~ 30 бар), чем для внутрислитовых землетрясений (~ 100 бар). Следовательно, межплитовые

зоны являются более ослабленными по сравнению с внутритриповыми.

Рассмотрим расчеты энергии землетрясений. Одним из важнейших параметров землетрясения является его магнитуда. Она связана с энергией землетрясения и может быть легко измерена инструментально, поэтому рассмотрим этот вопрос отдельно.

Магнитуда, как известно, определяется по максимальной амплитуде колебаний, записанных на сейсмограмме, снятой на расстоянии 100 км от эпицентра (если расстояние другое, вносится соответствующая поправка). Шкала магнитуд – экспоненциальная. Она пропорциональна логарифму максимальной амплитуде смещения частиц почвы.

Шкала магнитуд землетрясений была создана в 1935 году К. Рихтером, который предложил классификацию землетрясений по значениям максимальной амплитуды (B). В дальнейшем она была дополнена Б. Гутенбергом. Рихтер обнаружил, что если построить для разных землетрясений графики значений $\lg B$ как функции эпицентрального расстояния, то получаются приблизительно параллельные кривые. Относительная высота этих кривых зависит от силы землетрясения (при постоянной глубине очага). Таким образом, Рихтером была создана *шкала магнитуд*.

Магнитуды считаются разными способами и по разным волнам: объемным, телесейсмическим, поверхностным. Поэтому используют такие обозначения магнитуд, как M_w , M_s , M_b , MLH и др. В среднемировых шкалах определялась магнитуда M_b по телесейсмическим записям Р-волны в полосе периодов 0,8–1,8 с, как это делали Б. Гутенберг и Ч. Рихтер [Gutenberg, Richter, 1956]. Магнитуда M_b определялась Рихтером по поверхностным волнам в интервале периодов 17–23 с и расстояний 1500–15000 км. Моментная магнитуда M_w , связанная с сейсмическим моментом очага M_0 , определялась по записям объемных и поверхностных волн с периодом около 100 с [Hanks, Ramanori, 1979].

Помимо среднемировых шкал, для оценки величины землетрясений существуют иные системы магнитудно-энергетических шкал, например, на Дальнем Востоке. Здесь определялись магнитуды MLH , MLV по отношению к A/T , в максимальной фазе поверхностной волны на записях горизонтальной (H) или вертикальной (V) компоненты стандартной низкочастотной аппаратуры СК или СКД в диапазоне периодов от 5 до 7 с (при небольших расстояниях $\Delta \leq 10^\circ$) и от 12 до 17 с (при $\Delta > 10^\circ$). Кроме того, вычислялись MPV , MPH , $MPVA$ и MSH [Региональный..., 2006].

А. И. Захаровой и Л. С. Чепкунас [2006] были проведены специальные исследования корреляции между сейсмическим моментом M_0 , магнитудами M_w и M_s . Отметим, что моментная магнитуда M_w , полученная на основе сейсмического момента, считается опорной при переходе от одной шкалы магнитуд к другой [Гусев, Мельникова, 1990]. Массовые определения величины сейсмического момента M_0 по методу тензора момента центроида проводятся в Гарвардском сейсмологическом центре США. Аналогичные вычисления, выполненные в России (г. Обнинск), обозначаются M_w (OBN).

Так как магнитуда M_s , определяемая по поверхностным волнам, и сейсмический момент M_0 являются характеристиками длинноволнового спектра, то между ними должна существовать простая связь. Для ее установления необходимо рассмотреть вопрос о подобии землетрясений.

Поэтому введем кинематические характеристики процесса вспарывания сейсморазрыва и используем два времени: t_l и t_f [Жарков, 1983]. Первое из них называется локальным временем роста дислокации. Оно равно времени смещения в конечное положение точек разрыва, совпадавших до землетрясения. Величина $t_l = L/v$ определяется как среднее время образования разрыва, где v – средняя скорость его вспарывания. Три условия подобия землетрясений сформулировали Х. Канамори и Д. Андерсон:

$$W/L = c_1, \quad \bar{b}/L = c_2, \quad t_l/t_f = c_3, \quad (7.6)$$

где c_1 , c_2 , c_3 считаются константами. Первое условие требует подобия геометрии разрыва, второе – подобия снятой деформации, или снятого напряжения, и, наконец, последнее условие характеризует подобие кинематики (или динамики) разрыва. Для большинства изучаемых землетрясений ($M_s > 6$) выполнение условий подобия дает $M_s \sim \lg L^2$, а так как $M_0 \sim L^3$ (7.5), то

$$\lg M_0 \sim 3/2 M_s. \quad (7.7)$$

В той же области магнитуд $E_s \sim L^3$, и мы легко приходим к формуле Гутенберга–Рихтера, связывающей сейсмическую энергию E_s с магнитудой M_s .

Для сильнейших, катастрофических землетрясений ($L \geq 100$ км) выполнение условий подобия дает $M_s \sim \lg L \sim 1/3 \lg M_0 \sim \lg E_s$, и можно ожидать отклонений от соотношения Гутенберга–Рихтера (7.5). Это и не удивительно, так как сильнейшие землетрясения, видимо, слишком индивидуальны и, возможно, вообще плохо подчиняются статистике.

Оценка энергии землетрясений представляет большое значение для выявления их взаимосвязи и причин возникновения. Такая связь существует: слабые землетрясения могут являться предвестниками сильных. Важно классифицировать их по величине энергии. Последняя может быть рассчитана по данным сейсмических станций для любого зарегистрированного колебания, причем это будет величина, характеризующая не эпи-, а гипоцентральною область землетрясения.

Остановимся на понятии «энергия землетрясения». Причиной землетрясения являются значительные деформации земных слоев. С энергетической точки зрения землетрясение есть освобождение энергии деформации и переход ее в другие формы. Освобождающаяся энергия расходуется главным образом на разрушение горных пород в районе очага, часть ее переходит в тепло, и лишь небольшая доля этой энергии идет на образование упругих волн, излучаемых очагом. При исследовании взрывов эта доля оказалась равной 1–6 % от общей величины энергии; аналогия хотя и грубая, но возможная. Способность определять общую освобождаемую энергию позволила бы судить о потенциальной величине энергии деформаций, вызывающих землетрясение, оценивать по наблюдениям сейсмических станций силу сотрясения в эпицентральной области и т. д. Однако пока мы можем пользоваться только косвенными соображениями и непосредственно измерить лишь энергию различных упругих волн, вызы-

ваемых землетрясением в толще Земли. В связи с этим термин «энергия землетрясения» можно употреблять как для обозначения общей энергии, освобождающейся в очаге, так и для обозначения суммарной энергии упругих волн, излученных из очага. Мы будем применять этот термин во втором, более узком смысле. Учитывая реальные возможности, в настоящее время можно ставить задачу лишь о классификации землетрясений по величине суммарной энергии упругих волн.

Землетрясения очень различаются по величине энергии: например, энергия катастрофического землетрясения может быть в 10^{15} раз больше энергии наименьшего, едва регистрируемого сотрясения коры. Это заставляет нас сравнивать энергию разных по силе землетрясений по логарифмической шкале. Обычно достаточно определить значение энергии с точностью до порядка.

Помимо магнитуды, существует *балльная оценка силы землетрясений*. Впервые уравнение, связывающее балльность (I_0) в эпицентре с магнитудой (M), было получено Б. Гутенбергом и К. Рихтером для калифорнийских землетрясений в виде:

$$I_0 = 1,7M - 2,1, \quad (7.8)$$

где 1,7 и 2,1 – некоторые постоянные (для очагов с глубиной ≈ 20 км).

Зависимость I_0 (в баллах) от глубины очага (h) изучал Н. В. Шебалин, который получил зависимость:

$$I_0 = 1,5M - 3,5 \lg h + 3. \quad (7.9)$$

Следует отметить, что оценка силы землетрясений в баллах имеет существенный недостаток, обусловленный многообразием индивидуальных особенностей конструкций любых сооружений. Таким образом, сила землетрясений оценивается в двух характеристиках – интенсивности (сотрясаемость в баллах) и магнитуде. Сотрясаемость отражает интенсивность землетрясения в каком-либо месте и оценивается по результатам макросейсмического эффекта (ощущение и реакция людей, степень разрушения зданий, реакция рельефа).

Для оценки сотрясаемости (интенсивности) были разработаны шкалы. Первая подобная шкала была предложена итальянцами Меркалли и Канкани, затем уточнена немецким ученым А. Зинбергом. Американцы Вуд и Ньюмен модифицировали шкалу Меркалли (ММ). В 1973 году для количественной оценки интенсивности была разработана по рекомендации Международного совета по сейсмологии и сейсмостойкому строительству и принята 12-балльная шкала MSK-64 (по имени авторов Медведев – Шпонхойер – Карник). Ею в основном и пользуются в мире, хотя в 1971 году она была немного уточнена.

В сейсмологии используется также понятие об энергетическом *классе* (K) землетрясений, который определяется как логарифм E – энергии землетрясения.

Различают 18 энергетических классов. Можно записать: $K_c = \lg E$ [Дж]. Для вычисления класса землетрясений по магнитуде существует ряд фор-

мул, которые лучше применимы для какого-либо района или при определенной силе землетрясений и основаны на формуле 7.8.

Интенсивность I_0 связана с магнитудой различными соотношениями, подобными формуле 7.8. Например, по Б. Гуттенбергу: $K = \lg E$ (эрг) = $1,5M + 5$; по Г. П. Горшкову: $K = \lg E$ (эрг) = $1,6M + 11$. Для слабых землетрясений наиболее точна формула Раутиан: $K_r = 1,8M + 4$. Для Сахалинского региона лучше применима формула С. Л. Соловьева: $K_s = 2M + 1,2$, а для Камчатки формула С. А. Федотова: $K_f = 1,6M + 4,6$.

Примером являются шкалы землетрясений (MSK-64, японские шкалы, Меркалли), ветра, цунами, даже температур. Поэтому корректнее ограничиться именно этими уже известными и разработанными шкалами. Например, для оценки сейсмических явлений применяются шкалы сейсмической интенсивности, в основном 12-балльная шкала MSK-64, впоследствии модифицированная. Типичные признаки интенсивности по этой шкале приведены нами в третьей главе (табл. 3.2).

Уместно показать условные характеристики колебаний при землетрясениях различной силы (табл. 7.1).

Таблица 7.1.

Интенсивность, ускорение, скорость колебаний почвы и амплитуда смещения центра массы

Интенсивность, балл	a , см/с ²	γ , см/с ⁻¹	X_0 , мм
V	15–30	1,5–3,0	0,8–1,5
VI	31–60	3,1–6,0	1,6–3,0
VII	61–120	6,1–12,0	3,1–6,0
VIII	121–240	12,1–24,0	6,1–12,0
IX	241–480	24,1–48,0	12,1–24,0
X	481–960	48,1–96,0	24,1–48,0

Примечание: a – ускорение почвы для периодов от 0,1 до 0,5 с; γ – скорость колебаний почвы для периодов от 0,5 до 2,0 с; X_0 – амплитуда смещения центра массы маятника с периодом собственных колебаний 0,25 с и логарифмическим декрементом затухания 0,5.

Наиболее объективно оценивается сила землетрясения в магнитуде по шкале Рихтера. Она связана непосредственно с энергией землетрясения, ее определение дано в разделе 3.2.1. Соотношение магнитуд по шкале Рихтера, интенсивности в баллах по шкале MSK-64 и шкале интенсивности, принятой в Японии, даны нами в табл. 3.3.

Цунами

Для количественной оценки цунами важны главным образом такие параметры, как высота волны в океане и у берега, дальность и скорость заплеска, магнитуда и глубина цунамигенного землетрясения. В пятой главе мы привели формулы оценки этих количественных параметров (формулы 5.1–5.3).

Назовем диапазон основных параметров: скорость распространения – до 900–1000 км/час, высота волны в океане – до 2,5, на побережье – до

40 м (в историческое время – до 70 м), дальность пробега волн – тысячи км, периоды – от 20 мин. до 2,5 часа, количество волн – 3–5, дальность залеска – 1 км и более, магнитуда землетрясений, вызывавшая сильные и катастрофические цунами, – 7,1–9,3, количество жертв – до 300 тыс., повторяемость в целом, например, в Тихоокеанском регионе за 10 лет, – до 80.

Для оценки интенсивности цунами существуют известные шкалы (Зибберга – Амбразейса, Пападопулоса – Имамуры, Абе и Хатори, Мурти, Соловьева – Имамуры). Имамура ввел, а Иида усовершенствовал формулу для оценки силы цунами, приведенную нами в разделе 5.5 (формула 5.1). С. Л. Соловьев предложил вышеуказанную формулу 5.2, а для учета ослабления волн при удалении от источника – Абе и Хатори [1989]:

$$Mt = a \log h + b \log \Delta + D, \quad (7.10)$$

где h – максимальная амплитуда волн на побережье, измеряемая от подошвы до гребня в метрах, Δ – расстояние от эпицентра землетрясения до точки измерения в километрах, a , b и D – константы.

Мурти [Murty, Loomis, 1980] предложил расчет магнитуд основывать на вычислении потенциальной энергии цунами E , даваемой в эргах по формуле:

$$ML = 2(\log E - 19). \quad (7.11)$$

Естественно, расчет энергии сложен и не всегда возможен, но зато по формуле 8.11 мы определяем объективное выражение силы цунами в общепринятых в физике значениях.

Описательная шкала интенсивности цунами Пападопулоса–Имамуры, названная нами в пятой главе, дает определение до 12 баллов. Оно приводится подробно во многих специальных источниках [например, Левин, Носов, 2005]. Ниже кратко перечислим основные характеристики баллов:

- I – неощутимое (не ощущается воздействие, и нет ущерба);
- II – очень слабое (ощущается лишь некоторыми людьми на малых судах);
- III – слабое (ощущается большинством людей на малых судах, но без воздействия и ущерба);
- IV – наблюдаемое (ощущается всеми людьми на малых судах и большинством людей на побережье);
- V – сильно ощущается всеми людьми на больших судах, наблюдается всеми людьми на побережье, некоторые испуганы и выбегают из домов, малые суда выносятся на берег, ограниченное подтопление культивируемых участков побережья, а также прибрежных конструкций, построек и территорий жилых домов;
- VI – слабо разрушительное (многие люди напуганы и выбегают на возвышенности, большинство малых судов выносятся вглубь суши, разрушение и подтопление некоторых деревянных строений);

VII – разрушительное (большинство людей напуганы и пытаются убежать на возвышенности, большая часть малых судов повреждена, объекты перевернуты и перемещены со своих мест, плавучие конструкции смыты волной в море);

VIII – сильно разрушительное (все люди убегают на возвышенности, некоторые смыты волной в море, большинство малых судов повреждено, многие унесены волной, некоторые большие суда вынесены на берег, крупные объекты смыты со своих мест, обширные наводнения, многие плавающие конструкции унесены волной, некоторые частично повреждены, разрушения первой степени и подтопления);

IX – деструктивное (многие люди унесены волной, большинство малых судов разрушено и унесено волной, значительная часть больших судов вынесена вглубь суши на приличные расстояния, некоторые разрушены, обширная эрозия и замусоривание побережья, почти все плавучие конструкции унесены, многие частично повреждены, разрушения третьей степени во многих кирпичных строениях, некоторые железобетонные здания пострадали от разрушения второй степени);

X – сильно деструктивное (всеобщая паника, большинство людей унесено волной, почти все большие суда вынесены вглубь суши на значительные расстояния, многие разрушены, машины перевернуты и сдвинуты со своих мест, разливы нефти, пожары, обширное проседание грунта, разрушения четвертой степени во многих кирпичных домах, некоторые железобетонные здания пострадали от разрушений третьей степени, разрушены искусственные дамбы и портовые волноломы);

XI – опустошительное (разрушены жизненно важные коммуникации, обширные пожары, машины и другие объекты смыты в море, булыжники, валуны с морского дна принесены на сушу, разрушения пятой степени во многих кирпичных зданиях, некоторые железобетонные строения пострадали от разрушений четвертой степени, многие – от разрушений третьей степени);

XII – полностью опустошительное (практически все кирпичные здания стерты с лица Земли, большинство железобетонных строений пострадали от разрушений не меньше третьей степени).

Атмосферные явления

Энергия различных опасных атмосферных явлений – от циклонов до пылевых смерчей различается на девять порядков. Значения кинетической энергии этих явлений отражены ниже.

Таблица 7.2.
Энергия опасных атмосферных явлений [Battan, 1961]

Опасные атмосферные явления	Кинетическая энергия, Дж
Пылевые смерчи	$4 \cdot 10^7$
Торнадо	$4 \cdot 10^{10}$
Шквал	$4 \cdot 10^{12}$
Ураган	$4 \cdot 10^{16}$
Циклон	$4 \cdot 10^{17}$

Количественная оценка разрушений, причиненных торнадо, увязана с их максимальной скоростью ветра. На этой основе Фуджита [Fujita, 1971] разработал шкалу разрушений, в которой пять классов. Скорость ветра v выражена формулой:

$$v=6,30(F+2)^{3/2}, \quad (7.12)$$

где F – показатель шкалы Фуджита. Соответственно при различных значениях скорости будут разные значения показателя F .

Таблица 7.3.

Показатель шкалы Фуджита в зависимости от скорости ветра

v , м/с	18	33	50	70	93	117
F	0	1	2	3	4	5

Из этой таблицы видно, что максимальной энергией обладают циклонические вихри (тайфуны, торнадо, ураганы и т. д.), а также землетрясения и вулканические извержения.

Энергия видов природных явлений

Для оценки энергии природных процессов и явлений приведем их количественные характеристики (табл. 7.4).

Таблица 7.4

Энергетические характеристики природных процессов

Землетрясения ($M = 4,0 \div 8,5$)	$6,3 \cdot 10^{10} \div 3,6 \cdot 10^{17}$ Дж
Вулканические извержения	$10^{15} \div 10^{18}$ Дж
Смерчи, торнадо, ураганы и т. п.	$10^7 \div 10^{17}$ Дж
Обрушения склонов, лавины	$10^6 \div 10^{10}$ Дж
Обрушения при карстообразовании	$10^8 \div 10^{10}$ Дж
Средняя мощность циклонических процессов в атмосфере	10^9 Вт

Для оценки извержений разработана шкала Тсуя ([Tsuya, 1955]; табл. 7.5).

Таблица 7.5.

Интенсивность, объем, магнитуда и энергия вулканических извержений

Интенсивность	Объем, км ³	Класс А		Класс Б	
		магнитуда	энергия, эрг	магнитуда	энергия, эрг
I	10^{-5}	5,8	$2 \cdot 10^{20}$	5,3	$3 \cdot 10^{19}$
II	10^{-4}	6,4	$2 \cdot 10^{21}$	5,9	$3 \cdot 10^{20}$
III	10^{-3}	7,0	$2 \cdot 10^{22}$	6,6	$3 \cdot 10^{21}$
IV	10^{-2}	7,6	$2 \cdot 10^{23}$	7,2	$3 \cdot 10^{22}$
V	10^{-1}	8,2	$2 \cdot 10^{24}$	7,8	$3 \cdot 10^{23}$
VI	1	8,8	$2 \cdot 10^{25}$	8,4	$3 \cdot 10^{24}$
VII	10	9,4	$2 \cdot 10^{26}$	9,1	$3 \cdot 10^{25}$
VIII	100	10,0	$2 \cdot 10^{27}$	9,7	$3 \cdot 10^{26}$
IX	>100	10,6	$9 \cdot 10^{27}$	10,3	$3 \cdot 10^{27}$

Энергетические характеристики Земли, космических событий и источников техногенного происхождения

В целом считается [Жарков, 1983], что Земля должна ежегодно производить около $1 \cdot 10^{21}$ Дж/год энергии. Это количество должно выделяться в земном ядре для генерации геомагнитного поля. Кроме того, выделение энергии, примерно равное $3 \cdot 10^{19}$ Дж/год, может быть обусловлено приливными воздействиями Луны. Однако, как считает А. А. Баренбаум [2007], на Землю воздействуют мощнейшие процессы в Галактике. Он составил хронологическую шкалу космических событий (табл. 7.6) и оценил энергетическое воздействие.

Таблица 7.6.

Хронологическая шкала космических событий

Космическое событие	Подразделение шкалы*	Время (t) или период (T) повторения событий	Энергетическое воздействие, Дж
Пролеты Солнца через массивные облака звезд, множественное падение астероидов	Эон (эонотема)	$t=3,6,2,6, 1,65, \sim 1,05$ млрд. лет	а) $\sim 10^{31}$; б) $\sim 10^{28} \div 10^{29}$
Бомбардировки кометами Галактики: сильные; средние; слабые	Эра (эратема); период (система); эпоха (отдел)		$\sim 10^{29}$ $\sim 10^{27} \div 10^{28}$ $\sim 10^{26} \div 10^{27}$
Столкновения Земли с крупными одиночными астероидными телами: диаметром более 3,5 км; диаметром менее 3,5 км	Век (ярус); зона, (раздел)	2,9 млн. лет $\sim 0,01 \div 1,0$ млн. лет	$\sim 10^{22} \div 10^{23}$ $< 10^{22}$

* В скобках указаны соответствующие подразделения стратиграфической шкалы.

Энергию космических событий (табл. 7.6) уместно сопоставить с энергетическими характеристиками Земли (табл. 7.7).

Таблица 7.7.

Энергетические характеристики Земли

Гравитационная энергия Земли	$2,5 \cdot 10^{32}$ Дж
Энергия вращения Земли	$2,1 \cdot 10^{29}$ Дж

Мощность теплового потока Земли: через земную поверхность; через раздел Мохоровичича; через границу ядро – мантия	$(3 \div 4) \cdot 10^{13}$ Вт $2,4 \cdot 10^{13}$ Вт $(0,4 \div 1,6) \cdot 10^{13}$ Вт
Мощность приливного воздействия Луны	10^{13} Вт

Для сравнительной оценки вышеназванных источников энергии и источников техногенного происхождения приведем энергетические характеристики последних (табл. 7.8).

Таблица 7.8.

**Энергетические характеристики источников
техногенного происхождения**

Энергия, потребляемая человечеством за сутки	10^{18} Дж
Запас энергии крупных гидроузлов	10^{15} Дж
Обрушения выработанных пространств	до 10^6 Дж
Ядерные взрывы	$10^{12} \div 2,4 \cdot 10^{17}$ Дж

Из рассмотренных характеристик земных процессов, представленных в табл. 7.2–7.5, ясно, что, несмотря на гигантскую энергию циклонов, вулканов и землетрясений, гравитационная энергия Земли и энергия ее вращения на 11–14 порядков выше, чем эти мощные процессы. Очень высока и энергия воздействия возможных космических событий. В то же время из сопоставления энергии источника в техногенного происхождения, включая ядерные взрывы, с энергией земных процессов, видно, что вся энергия, потребляемая за сутки человечеством, не превышает энергии одного катастрофического землетрясения или извержения вулкана.

Заметим, что дело не только в энергии, но и в плотности потока; как писал академик П. Л. Капица, для практического использования важна именно достаточная концентрация потока энергии.

**7.1.2. Периодичность, продолжительность,
случайность и закономерность катастроф, бифуркация
Длительность процессов**

Далее необходимо отметить, что процессы, приводящие к катастрофе, могут иметь различную *длительность*. Как мы уже отмечали во введении, природные катастрофы имеют чрезвычайно широкий диапазон по длительности. При этом существенно различаются по данному параметру процессы, приводящие к катастрофам. Например, столкновение с метеоритом, считая от времени вхождения его в атмосферу, может длиться несколько секунд.

Аналогично длительность землетрясения (главного толчка), при котором

имеет место разрыв сплошности среды, образование трещины в земле или разлома, сопровождаемые сильными колебаниями, может длиться около десяти секунд. Так, при Невтегорском землетрясении 27 мая 1995 года на северном Сахалине разрыв длился 13,5 с. Протяженность разлома (правый сдвиг) на поверхности составила 37 км, а в недрах протяженность сейсмо-разрыва – около 80 км. При этом скорость вспарывания пород в недрах составила 4,0 км/с и выделилось сейсмической энергии около $2,8 \cdot 10^{22}$ эрг. Макросейсмический эффект выразился в том, что расчетная площадь семибалльных сотрясений составила около 2500 кв. км. Она охватила территорию северного, среднего и частично южного Сахалина, то есть около 1000 км, а также восток центральной части Хабаровского края. Величина горизонтальных смещений составила от 1,0–1,5 м по краям разрыва до 7,0–7,2 м в центральной части, а вертикальных – от 0,3 до 2,6 м. Поселок Невтегорск был практически стерт с лица Земли, погибло 2066 человек.

Непосредственно главный толчок длился около секунды, но последующие (афтершоки) продолжались до года или более. Процесс подготовки землетрясения длится, видимо, годы. На Курилах между сильными и катастрофическими землетрясениями в одной и той же области (например, на Южных Курилах) происходит, как правило, несколько лет (от полутора до пяти-восьми лет).

Говоря о наводнениях, совершенно четко можно определить рамки периода его подготовки (месяцы, недели). Однако, несмотря на это, а также на предупреждение о надвигающемся наводнении соответствующими службами разных стран, зачастую оно происходит внезапно. Более того, его длительность (период выпадения ураганного количества осадков месячной или многомесячной нормы) может составить считанные часы. Естественно, такая скорость подъема воды приводит к катастрофе.

Снежные лавины происходят также внезапно и в считанные минуты, а процесс их подготовки длится недели и месяцы. Нарастание критического состояния снежного покрова происходит значительно медленнее и может оцениваться специалистами, хотя оно длится сутки или недели, но время отрыва лавины практически непредсказуемо.

Говоря о цунами, можно отметить следующее. Поскольку скорость волны-цунами исчисляется сотнями км/час, ее набег на побережье исчисляется временем, зачастую меньшим, чем необходимо для эвакуации людей. Но тревога цунами, подаваемая за пять-десять мин., а тем более за 40–50, как это теперь имеет место в ряде случаев в развитых странах, уже способна сохранить жизнь. В то же время процесс подготовки цунами более длительный. Его можно разбить на два этапа. В случае наиболее распространенной причины цунами – тектонического подводного землетрясения, процесс его подготовки может длиться годами. Второй же этап, когда цунамигенное землетрясение уже произошло, зафиксировано и можно подавать тревогу цунами, длится, как уже упоминалось, от нескольких до десятков минут.

В то же время, как было сказано выше, есть катастрофы, период подготовки которых может длиться сотни тысяч и миллионы лет. Это повышение температуры и таяние ледников, подъем уровня океана, инверсия

магнитных полюсов и т. д. Об этих явлениях человечество может заблаговременно знать, но знать – это еще не значит иметь возможность предотвратить, поэтому длительный период подготовки таких катастроф не означает более надежную возможность их избежать.

Так неоднозначно может быть оценен период подготовки и длительность процесса катастроф.

Закономерность (периодичность) катастроф

Рассмотрим кратко случайность или закономерность, периодичность катастрофических явлений. Вопрос это сложный. Периодичность, цикличность и закономерность геодинамических процессов и связанных с ними природных катастроф имеют различную природу. Прежде всего приведем по поводу цикличности высказывание В. Е. Хаина: «Единственным перспективным направлением объяснения планетарной цикличности тектонических явлений представляется возможность объяснения этой цикличности влиянием астрономических факторов, связанных с вращением Земли и ее движением в мировом пространстве» [Хаин, 1960].

Естественно, в природе известно много периодических явлений. В частности, хорошо знакомы 11-летние солнечные циклы, циклы Вильсона, Бертрана и Штилле, длящиеся сотни миллионов лет, годовые и сезонные циклы. Неплохо выявлена цикличность в осадконакоплении (циклы седиментации). На цикличности основаны многие предвестники землетрясений, выявлены циклы в афтершоках сильных землетрясений и т. д. [Злобин, 2005].

Крупномасштабную цикличность и ее возможные причины рассмотрел В. Е. Хаин [2001]. При этом он отмечал ее неравномерность и определил цикличность как «квазипериодическое повторение определенной последовательности событий или стадий развития, плавно переходящих одни в другие или выраженные скачками в развитии» [Хаин, 2001, с. 403].

Среди природных явлений цикличность проявляется широко. В первую очередь целесообразно рассмотреть цикличность в геологических процессах, ее тектонические и геодинамические аспекты. Многочисленные проявления цикличности имеются в геофизических процессах. В первую очередь можно назвать известные циклы, выделенные М. Бертраном и называемые его именем. Они (или часть из них) были подтверждены Н. С. Шатским в России, М. Люжоном и Э. Арганов в Альпах и др. В них выделяли две главные стадии – собственно геосинклинальную и орогенную. Обозначения циклов даны еще на базе геосинклинальной теории: каледониды, герциниды (варисциды), альпиды, дополненные байкалидами и киммеридами (индосинидами), известными всем геологам.

Однако после смены парадигмы в тектонике место циклов Бертрана заняли циклы Вильсона. В них уже главными, рубежными явлениями были события «от континентального рифтинга до столкновения континентов – их коллизии с промежуточными стадиями спрединга и раскрытия океана, субдукции и образования магматической дуги» [Хаин, 2001, с. 404]. Кроме того, длительность циклов несколько различается. М. А. Гончаров [2005] определил длительность циклов Вильсона в 650 млн. лет и 175–200 млн. лет – для циклов Бертрана. Таким образом, циклы Вильсона в три-четыре раза более продолжительны, чем циклы Бертрана. Это В. Е. Хаин объясняет тем, что последние не охватывают истории крупных океанических

бассейнов, и, соответственно, по отношению к циклам Вильсона их можно считать циклами второго порядка.

Кроме того, при рассмотрении более длительной истории Земли к этим двум циклам добавились суперконтинентальные. Глубинные причины этих циклов, проявляющиеся в коре и литосфере, лежат в мантии и связаны с конвекцией в ней, как считают О. Г. Сорохтин и С. А. Ушаков [1991].

Циклы Штилле продолжительностью около 30 млн. лет. Г. Штилле впервые выделил циклы, отвечающие орогенным фазам. Причем, несмотря на предполагавшуюся непрерывность процессов в концепции тектоники плит и критику цикличности Г. Штилле, геологи и сейсмологи явно выявили наличие дискретности в непрерывных геологических (геотектонических) и сейсмических процессах и подтвердили наличие цикличности. Можно отметить, что если циклы Бертрана предварительные, то фазы (циклы) Штилле завершаются прекращением дальнейших, интенсивных деформаций сжатия и процессов регионального метаморфизма. Это представляет интерес для геофизиков (сейсмологов), в том числе для автора настоящей работы и для всех, кто занимается изменениями полей упругих деформаций и напряжений во времени. Хотя циклы Штилле длиннопериодные относительно изменений полей напряжений, точнее, периодов их наблюдений, поскольку время инструментальных сейсмологических наблюдений менее 100 лет, тем не менее можно говорить о наличии цикличности меньшего порядка в наблюдаемых изменениях полей упругих напряжений афтершоков при подготовке катастрофических землетрясений [Злобин, 2005]. Отметим, что для объяснения таких деталей сейсмического процесса, как форшоковая активизация и процесс накопления энергии в очаговых зонах, может быть привлечена блоково-иерархическая модель геофизической среды М. А. Садовского [1989], устраняющая трудности, встречающиеся при пользовании оболочными моделями.

Говоря о причинах длительности циклов, можно вслед за В. Е. Хаиным полагать, что они связаны с пространством и размером конвективных ячеек, которые в нем реализуются. Схемы конвективных течений и модели конвективных ячеек рассмотрели Н. Л. Добренцов, А. Г. Кирдяшкин [2001], а также В. Д. Котелкин и Л. И. Лобковский [1999] и др. В одном случае (в циклах Бертрана) они проявляются на пространстве между континентами и микроконтинентами, а во втором (циклы Штилле) – «на еще более ограниченном пространстве между островными дугами и континентом или микроконтинентами, либо между соседними островными дугами, то есть в системе окраинное или междуговое море – островная дуга – глубоководный желоб» [Хаин, 2001, с. 417]. Если ранжировать вышеназванные циклы, то вслед за М. А. Гончаровым [2005] можно считать циклы Вильсона системами первого ранга, циклы Бертрана – системами второго ранга, а циклы Штилле – системами третьего ранга. Циклы эндогенной активности Земли могут быть обусловлены интервалами пересечения нашей планетой на ее пути вдоль галактической орбиты струйных потоков галактического вещества с так называемым галактическим годом, который может определять циклы Бертрана [Пущаровский, 1999; Хаин, 1993].

Ю. Н. Авсюк [2007] указывал на цикличность в колебательных, приливных движениях системы Земля – Луна, влияющих на периодичность

и напряженное состояние литосферы Земли. Периодичность их – около 40–60 млн. лет, что близко к циклам Штилле.

Е. Е. Милановский [1995] считает, что циклический характер имеет изменение объема Земли, обусловленное ее пульсацией, связанной с изменением скорости вращения планеты. Это, в свою очередь, вызывает такие глобальные периодические процессы, как рифтинг и спрединг, а также субдукцию и коллизию с образованием структур растяжения и сжатия в планетарном масштабе. В. А. Ермаковым [2007] высказана идея об образовании протосиала в процессе конвекции нагретого первичного расплавленного «океана» в ячейках Бенара.

Дискретность эндогенной эволюции Земли может быть связана с преобразованием процесса непрерывной диссипации энергии в пульсационную последовательность лавинных событий [Моралев, Васильев, 1999]. По их мнению, это может быть спусковым крючком таких явлений, как землетрясения.

Таким образом, в истории Земли выявляются определенные закономерности и циклы. Мы считаем, что они могут иметь место и на меньших уровнях в процессах меньшей длительности, как было недавно показано автором [Злобин, 2005; Злобин и др., 2008].

В целом цикличность и закономерность имеют место в геологии и в других явлениях (землетрясения, падение метеоритов, движение небесных тел и их влияние на Землю и т. д.), связанных с их периодичностью [Авсюк, 2007; Хаин, 2001; Левин, 2005; Тихонов, 2005; Баренбаум, 2007; Баркин, 2007]. Цикличность и закономерность сейсмических процессов была рассмотрена Т. К. Злобиным [2005]. Выявил периодичность в землетрясениях Курило-Камчатской зоны С. А. Федотов [(1968), Сейсмическое..., 1980], а позднее И. Н. Тихонов и др. [1997].

Итак, самыми длиннопериодными циклическими процессами, проявляющимися во Вселенной и воздействующими на Землю, являются космические события. С геодинамическими процессами Земли связаны ее экстремальные состояния [Астафьев, 2007].

Несомненно существование периодичности ряда природных явлений и процессов, которые проявляются в том числе и среди катастрофических явлений.

Бифуркация

Отдельно надо отметить такое явление, как бифуркация. Ей посвящено много работ, начиная от А. Пуанкаре (1879) и до Уинтни, Р. Томм, М. Берри, В. И. Арнольда, включая работы в области геологии С. Д. Соколова [1998] и др.

Согласно В. И. Арнольду [2004, с. 8], «бифуркация означает раздвоение и употребляется в широком смысле для обозначения всевозможных, качественных перестроек или метаморфоз различных объектов при изменении параметров, от которых они зависят». Основная трудность – доказать по геологическим данным, что точка выбора пройдена.

При математическом описании поведения систем с возможной бифуркацией обращается внимание на появление двух или более равновесных состояний при одних и тех же значениях параметров. Собственно явление бифуркации при этом моделируется как переход системы к одному из

этих состояний. Процесс перехода рассматривается как плавная смена состояний (так называемый адиабатический характер, при котором сохраняются инварианты), а большие динамические возмущения отсутствуют. Такое поведение оказывается возможным для нелинейных систем, в которых взаимосвязь между возникающими при отклонении от равновесия обобщенными силами и координатами нелинейной зависимости, в частности, полиномом третьей или более высокой степени. Эта же нелинейность является предпосылкой для возникновения самоорганизации (синергетики), которая будет рассматриваться в следующем разделе.

Примеры и проявления бифуркации мы можем привести из сейсмологии. Было установлено, например, что по ряду признаков готовится землетрясение, и тем не менее когда оно должно было произойти, процесс как бы затух. Впоследствии было выяснено, что, действительно, процесс подготовки шел и разрядка напряжения была, но вместо тектонического разрыва и землетрясения произошел *крип*, то есть медленная разрядка напряжений, которые накопились, но не разразились мгновенными тектоническими движениями. Значит, в процессе подготовки имела место бифуркация, раздвоение, и процесс реализовался иным путем через крип.

Наиболее просто это можно представить падением какого-либо потока с гор, когда на его пути появляется два или более варианта направления движения, и он реально сворачивает на один из путей, который зачастую трудно определить. Это очень простой пример, позволяющий представить инвариантность реализации процессов, в нем и суть.

Естественно, несопоставимо сложнее происходит, например, с геологическими процессами, которые происходят миллионы лет, а исходная точка начала процесса и бифуркации отстоит далеко от конечного момента его реализации.

В настоящей работе мы хотим лишь обратить внимание на такой тип развития событий, связанных с подготовкой катастроф, неоднозначностью исхода даже при развитии по какому-либо вроде бы известному закону. Подобной особенностью обладают и природные процессы, способные приводить (или не приводить) к катастрофам. Поэтому на основе вышесказанного можно добавить при данном нами определении термина «катастрофа», что это развитие процесса по нежелательному сценарию при наличии альтернативы.

7.2. Синергетика и нелинейная динамика

Рассматривая геодинамические процессы и природные катастрофы, нельзя не коснуться, помимо обсуждения источников энергии природных процессов, такой темы, как синергетика и нелинейная динамика.

Синергетика (от *греч.* synergētikos – совместный, согласованно действующий) – научное направление, изучающее связи между элементами структуры (подсистемами), которые образуются в открытых системах. В определенных системах наблюдается согласованное поведение подсистем, в результате возрастает степень ее упорядоченности, то есть уменьшение энтропии (так называемая самоорганизация). Основа синергетики – тер-

динамика неравновесных процессов, теория случайных процессов, теория нелинейных колебаний и волн [Большой..., 1991]. Синергетику называют даже новой парадигмой [Пущаровский, Соколов, 2001]. Ей посвящены статьи в десятках международных журналов и ряд конференций. Причем одно из понятий, связанных с ней, – «пороговая ситуация», уже прямо относится к теме настоящей работы – природным катастрофам.

Помимо синергетики, определим понятие нелинейности явлений. Оно «включает в себя анализ качественных преобразований в процессах эволюции» [Пущаровский, Соколов, 2001]. Поэтому В. И. Арнольд разрабатывал теорию катастроф как универсальный метод изучения любых скачков и качественных изменений. Одной из знаковых стала книга Ф. А. Летникова [1992]. По Ю. М. Пущаровскому, сейсмологию можно считать предтечей современных идей нелинейности, начало которым было положено в 30-х годах прошлого века. Важным этапом стала работа А. В. Николаева и И. Н. Галкина [Проблемы..., 1987]. Одним, видимо, из первых в России этот термин ввел около 30 лет назад О. Л. Кузнецов [1981]. В 1993 году ГИН РАН провел первый семинар по нелинейной геодинамике, и в настоящее время «можно считать, что в мировой науке в области нелинейной геодинамики отечественная геология лидирует» [Пущаровский, Соколов, 2001, с. 477]. Последняя, как пишет далее Ю. М. Пущаровский, «как ветвь геодинамики охватывает радикальные отклонения от последовательности (линейности) в развитии геодинамических систем, порождающие *неупорядоченность*, разного рода нерегулярности и бифуркации в геологических процессах, что может быть связано как с энергетическими импульсами глубин, так и с воздействием на геосферы внешних факторов. Подчеркивалось, что предпосылкой таких феноменов является нестабильность глубинных и коровых геосферных систем». Автор считает, что именно нелинейные эффекты в тектонических процессах имеют большое значение. Нелинейность, отклонение от последовательности, неупорядоченность, нестабильность глубинных и коровых систем проявляются и в природных катастрофах, которые и являются предметом настоящей монографии. Поэтому, естественно, мы не могли не коснуться здесь этого большого вопроса.

Важно изучить механизмы и структурные формы причинно-следственных связей и явлений в нелинейной тектонике и других подобных процессах. Например, при рассмотрении в ранге локальной нелинейности хотелось бы отметить, что в зоне перехода океан–континент тихоокеанского типа, являющейся многие годы предметом исследований автора настоящей монографии, локальные нелинейные геодинамические процессы отражены в террейновой тектонике, в их хаотичном распределении. Здесь же, в этой зоне, нелинейность проявляется в процессах структурообразования: резких градиентах геологических параметров, ансамблях тектонического скупивания, изменении геодинамических режимов вкрест и по простиранию зоны перехода. Примером этому служит смена конвергентной границы комплексов окраинно-континентальных вулканических поясов Корякского нагорья к югу энсиалической островной дугой Камчатки и далее энсиматической Курильской островной дугой.

Кроме того, «локальные нелинейные тектоно-геодинамические процессы могут отражаться в структурах, вулканических и сейсмических явле-

ниях, либо в отдельном проявлении, либо в совместном» [Пущаровский, Соколов, 2001, с. 485].

Нелинейность проявляется и в сейсмотектонике. Наиболее интересны в этом отношении исследования сети разломов Центральной Азии [Шерман и др., 2005; Шерман, Горбунова, 2008], где в параметрах разломов можно увидеть как периодичность изменений магнитудного индекса сейсмической активности, так и проявление нелинейности и «хаотической геодинамики». Сходные подходы появились в вулканологии и региональной геофизике [Щукин, Гамбурцев, 1998].

В заключение раздела, говоря о связи нелинейности с природными катастрофами, процитируем Ю. М. Пущаровского и С. Д. Соколова: «Катастрофы вообще рассматриваются как яркое проявление нелинейного эффекта в ходе любого природного процесса» [2001, с. 486].

ГЛАВА 8. КАТАСТРОФЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОЦЕССАМИ И ЯВЛЕНИЯМИ В АТМОСФЕРЕ, ИОНОСФЕРЕ, ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И КОСМОСЕ

В настоящей главе представляется необходимым рассмотреть процессы и явления в атмосфере, ионосфере и околоземном пространстве, с которыми связаны озоновые дыры, инверсия магнитных полюсов, поскольку они способны привести к катастрофе. Затем напомним происхождение Солнечной системы, поскольку с этим связано наличие в околоземном пространстве и космосе небесных тел, вызывающих катастрофы в случае их падения на нашу планету. После этого важно осветить явления, способные привести к глобальным катастрофам.

8.1. Озоновые дыры

К настоящему явлению было привлечено широкое внимание во многих странах после того, как в 1985 году в журнале «Nature» появилась статья английского ученого Фармана, в которой он утверждал, что содержание озона над Антарктидой все время понижается. Озоновая дыра в связи с этим стала активно исследоваться и ей было посвящено много работ [Александров и др., 1992; Данилов, Авдюшин, 1992; Смирнова, Козлов, 1999 и др.].

Толчком к изучению этой проблемы также послужили извержение в 1991 году вулкана Пинатубо на Филиппинах и выброс в стратосферу огромного количества пепла, что привело к снижению содержания озона.

Напомним, что такое озон и много ли его. Озон – химическое соединение O_3 . Он может возникнуть в результате фотохимических реакций в приземных слоях воздуха, которые загрязнены антропогенными примесями. В озоновом слое загрязнение происходит в основном в крупных городах. Значительное количество тропосферного озона образуется при грозовых разрядах в приэкваториальных регионах. Интересным является изучение образования озона над зонами сейсмоактивных тектонических разломов. Это может быть связано с воздействием на кислород электрических разрядов, вызванных геоэлектричеством во время землетрясений. Помимо этого известны случаи внедрения богатого озоном воздуха из стратосферы в тропосферу вследствие некоторых метеопроцессов [Сывороткин, 2002; Петров, Хргиан, 1980].

В атмосфере Земли озон содержится в виде очень малой примеси: его концентрация нигде не превышает тысячной доли процента. Но он играет важную роль, так как *поглощает излучение* в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, защищая все живое. Отметим, озон присутствует на высотах от поверхности Земли до 100 км, но наиболее значительно концентрируется на высотах 15–25 км. В средних широтах высота озонового максимума зимой равна 22 км, а летом увеличивается до 24 км: в тропиках – 25–26 км; в полярных высотах – 13–18 м. При этом высота озонового слоя зависит от широты и времени.

Чтобы представить, какое его количество присутствует в атмосфере, приведем такой пример. Если собрать все молекулы и опустить до поверхности Земли, то при нормальном давлении и температуре толщина озонового слоя не превысит 3 мм. Толщину равную 0,01 мм называют 1 Добсон (е. Д), ею и измеряют содержание озона, которое в среднем составляет ~300 е. Д. Важная его роль также в поглощении теплового излучения Земли.

Опасность озоновых дыр состоит в следующем: мутации в клетках, увеличении заболеваемости раком кожи, повреждении сетчатки глаза. При понижении содержания озона повышается температура Земли, таяние льдов и затопление.

Рассмотрим **причины уменьшения содержания озона**. Они связаны с динамическими процессами в атмосфере, космическими и геологическими процессами в недрах, а также в верхних оболочках Земли. Кроме того, на уменьшение озона, видимо, существенно влияют антропогенные причины.

Динамическими процессами в атмосфере, влияющими на уменьшение озона, являются: антициклоны (в приполярных областях), внутренние гравитационные волны, турбулентная диффузия в стратосфере, тропические циклоны и диссипирующие планетарные волны.

Космические процессы, вызывающие сокращение озонового слоя, связаны с галактическими космическими лучами и магнитным полем Земли, протонными вспышками, усилением солнечной активности. Даже такое пока однозначно не объяснимое событие, как падение Тунгусского метеорита, привело к сокращению озона.

Среди *глубинных геологических процессов*, влияющих на озоновый слой, можно назвать фреоны, то есть галогены, углеводороды, взрывной вулканизм, землетрясения, вариации магнитного поля, а также глубинную «водородную» дегазацию Земли.

Принципиальная возможность разрушения озонового слоя в результате процесса *дегазации Земли* показана в работе Адушкина и др. [2004]. Приведенные в ней расчеты и исследования стока озона в стратосфере показали, что степень разрушения озонового слоя зависит от географической широты и времени года. При этом наиболее глубокие озоновые аномалии образуются в высоких широтах и в стратосфере за счет уменьшения концентрации озона под областью максимума озонового слоя, данные авторы связывают это с фотодиссоциацией. Особенно велики потери озона в полярных широтах в зимне-весенний период. Одна из причин – поступление свободного водорода при дегазации Земли [Сывороткин, 2002].

В результате выхода озона при дегазации Земли из недр на поверхность и далее в стратосферу поступают такие газы, как водород. В. В. Адушкиным и др. [2004] были определены условия, при которых в результате этого возможно образование озоновых дыр, и установлено, что степень разрушения озона зависит от сезона, широты и высоты.

О большой роли глубинной дегазации Земли, проблеме образования озоновых дыр, возможных причинах разрушения озонового слоя и влиянии дегазации на глобальные катастрофы писал В. Л. Сывороткин и др. [2002].

О снижении общего содержания озона вследствие большого количества пепла после извержения в 1991 году вулкана Пинатубо на Филиппинах мы отметили выше. Добавим, что к этому же привело взрывное извержение вулкана Сент Хеленс в 1980 году в Каскадных горах на западе США и многих других вулканов. Можно только представить, какие были последствия для стратосферы и озонового слоя после гигантского извержения вулкана Кракатау 27 августа 1883 года в Индонезии, когда его пепел поднялся на 10–15 км, четырежды обогнул земной шар и несколько лет держался в атмосфере.

Наблюдения, проведенные после извержения вулкана Эль-Чичон в 1982 году в Мексике, показали, что повышение концентрации водных паров, связанное с ее выбросом в стратосферу, также может являться причиной возникновения аномалии в озоновом слое.

Помимо глубинных процессов в недрах, на содержание озона влияют *естественные и антропогенные* события в верхних оболочках Земли. Среди них исследователи отмечают лесные пожары, пылевые бури, ряды молнии, явление Эль-Ниньо в Тихом океане, деятельность азотно-продуцирующих микроорганизмов и др.

Отдельно надо коснуться *антропогенных факторов* снижения озона, поскольку большинство вышеназванных причин этого явления зависит от деятельности человека.

Речь идет о вредных веществах, выбрасываемых в результате человеческой деятельности в атмосферу: *азот* – при использовании азотных удобрений и полетов высотных самолетов; *водородные соединения*, выделяемые предприятиями в виде метана, ракеты, выбрасывающие пары воды на больших высотах; *хлор* попадает в атмосферу в результате использования хлорсодержащих органических соединений, в первую очередь фреонов. Каждое из этих веществ – катализатор, способствующий разрушению озонового слоя, но который сам не разрушается. Особенно опасен *хлор*. Количество выбрасываемого хлора за последние десятилетия катастрофически выросло. Например, с 1950-е по 1980-е годы оно увеличилось в 300 раз, а концентрация фреона – в четыре раза.

В совокупности с деятельностью человека (выбросы хлора и др.) существенно влияют на содержание (понижение) озона динамические процессы в атмосфере. Прежде всего это *циркумполярные вихри* над Антарктидой. Они движутся по замкнутым траекториям, и воздух внутри них не выходит, не обменивается и сильно охлаждается до $-70-80^{\circ}\text{C}$, тогда образуются кристаллики льда в атмосфере, связывающие азот и усиливающие действие хлорного цикла. Поэтому озоновая дыра отмечается, прежде всего, над Антарктидой в весенние месяцы примерно с 300 до 150–200 е. Д. (в 1987 году отмечалось уменьшение уровня озона до 100 е. Д.). Причем дыра росла и растет. После прогревания начинается обмен, и этот процесс разрушается. Однако стали образовываться «микродыры» в 1988–1989 годах над Норвегией, затем и в других местах, например, в 1995 году в России (Амурская область). Падение содержания озона на 20 % ожидается уже в ближайшие десятилетия, и это будет катастрофой, то есть человечеству следует принимать меры. Еще в ноябре 1996 года озоновая дыра над Антарктидой достигла 22 млн. куб. км, и

международным сообществом было выделено 460 млн. долларов для изучения и борьбы с этим явлением. Однако надо отметить и такое явление, как заживление озоновых дыр.

Таким образом, сохранение озонового слоя очень важно для человечества, а его значительное сокращение или исчезновение может иметь катастрофические последствия. Добавим, что к таковым также может привести опасное повышение содержания в атмосфере углекислого газа, которое за последние сто лет увеличилось в два раза.

8.2. Инверсия магнитных полюсов

Инверсия магнитных полюсов в истории Земли происходила неоднократно, в среднем через один миллион лет (иногда пять-десять млн. лет). Она связана со срывом электрических токов на ядре Земли.

Важно отметить, что последний раз это происходило 750 тыс. лет назад, когда погибла Атлантида. Заметим, что в последние десятилетия появились уникальные факты, документально зафиксированные аппаратурой военных СССР, США и других стран о возможной разумной жизни в водах океана (в норвежских фиордах, некоторых зонах Атлантического океана и даже в глубинах Байкала). В этой связи представляет интерес особенность воды – она, изменяя свою структуру, способна защитить живые организмы как от резких, губительных изменений магнитного поля, так и от радиационного облучения.

Известно, что последние 150 лет магнитное поле Земли постоянно *слабеет*. При сохранении такой динамики и снижении его напряженности можно полагать, что примерно через 2000 лет оно совсем исчезнет. Естественно, это беспокоит ученых, поскольку магнитосфера, то есть так называемый магнитный щит, защищает все живое на Земле от смертельной опасности – космического излучения. Если же этот магнитный щит исчезнет или ослабнет, то под угрозой окажется вся жизнь на нашей планете. Кроме того, изменится даже лик Земли, и он будет подобен безжизненному ландшафту планет, лишенных атмосферы и магнитосферы.

Конечно, наблюдения за магнитным полем ведутся по историческим меркам ничтожно мало времени, и поэтому предполагают, что обнаруженная закономерность его ослабления может быть временной. Большинство геофизиков надеется, что магнитное поле и вместе с ним все живое не исчезнет.

О механизме образования магнитного поля Земли мы писали в разделе 2.1.4. Рассматривая природу геомагнетизма, говорилось, что современная теория исходит из того, что магнитное поле Земли создается и поддерживается за счет так называемого динамо-механизма, связанного с вращением ядра. Это, видимо, довольно устойчивый механизм, и соответственно магнитный щит надежен. Однако в то же время известно, что в прошлом были периодические изменения напряженности поля, перемещения магнитных полюсов и инверсия магнитных полюсов. Есть основания полагать, что они будут и в будущем. Известно, что обычно период изменения магнитных полюсов составляет 4600 лет.

Но были установлены и совершенно иные факты. Так, по данным аме-

риканских ученых, в штате Орегон обнаружены лавы, которые по остаточной намагниченности свидетельствовали, что магнитное поле после их излияния и остывания *повернулось на 90 градусов в течение двух недель*. Таким образом, это говорит о том, что изменение магнитного поля и даже смена полюсов могут происходить не только через несколько тысяч лет, но даже за несколько недель. Это по историческим меркам мгновенно.

Одной из причин катастрофических планетарных изменений может быть поворот магнитной оси Земли. Сочетание магнитных бурь, вызванных этим, и резкого воздействия магнитосферы и солнечного ветра при этом может, безусловно, губительно подействовать на все живое. Заметим, что это, возможно, и было уже с динозаврами, мамонтами и, вероятно, погибшими навсегда цивилизациями.

Чтобы понять причину воздействия магнитного поля на человека или любой другой живой организм, необходимо обратиться к биофизике. Научные исследования в этой области показали, что существует прямая зависимость количества молекул воды в растворе, то есть *гидратации*, от переменных магнитных полей. При этом были выявлены изменения от степени гидратации свойств гормонов и ферментов. Установление этих явлений связано с именами Г. Герца, Д. Албанезе и И. Суздалева. Рассматривая вышеназванный вопрос, необходимо отметить, что частицы как живой, так и неживой природы, включая элементарную частицу воды, обладают собственным магнитным полем и соответственно магнитной осью, которая ориентируется согласно магнитным силовым линиям Земли.

В случае, если направление силовых линий внешнего поля будет под углом к направлению магнитной оси элементарной частицы, то она начнет прецессировать, то есть вращаться. То же происходит и в молекуле воды. В результате этого изменяются структура жидкости, ее объем и такие физические свойства, как вязкость и др. Изменение структуры жидкостей, в свою очередь, приводит к замедлению процессов вывода из организма вредных, отработанных веществ, что очень опасно для человека.

Как известно, его клетки в значительной степени состоят из воды, минеральных солей, их ионов. Поэтому в случае изменений магнитного поля, особенно резких, например, при магнитных бурях или электромагнитных процессах в атмосфере, в клетках могут меняться вышеназванные особенности в ее структуре и другие параметры. Они, естественно, могут повлиять на нее и, соответственно, состояние человека: изменение кровяного давления, обеспечение кислородом, влияние на сердечно-сосудистую систему, сердечная или кислородная недостаточность, атеросклероз и т. п. Это может привести к инсультам и инфарктам, психическим расстройствам и смерти организма.

Следовательно, можно сказать, что во время магнитных бурь может нарушаться функционирование клеток и всех систем человека. В случае же долгого воздействия магнитных полей могут возникнуть патологии и различные, в том числе тяжкие, заболевания. Поэтому большое значение имеет изучение процессов, происходящих в клетках, и воздействия на эти процессы магнитного поля, и особенно его изменений, например, магнитных бурь. При рассмотрении работы клетки очень важно изучение

мембраны. Именно через нее клетка общается с внешней средой, выводя из организма синтезированные вещества, и через мембрану в нее поступают питательная среда и кислород.

Почему магнитное поле влияет на клетку? Согласно последним открытиям ученых, оказалось, что даже очень слабые магнитные поля сильно влияют на химические реакции. Причем более сильно они проявляются именно в растворах, в том числе, естественно, и содержащих радикалы – химические частицы со свободной валентностью, то есть с одиночным свободным электроном, имеющим вращательный момент (спин). Электрон сохраняет в пространстве ориентацию оси вращения, поэтому очень важно взаимодействие между электронами разного типа. Если ориентация спинов двух электронов одинаковая, то при их встрече между ними не образуется химическая связь. Но в случае встречи двух радикалов, ориентированных противоположно друг другу, между ними образуются химическая связь и нейтральная молекула.

Следовательно, магнитные поля влияют на возможность слияния свободных радикалов и образования нейтральных молекул, то есть на реакционную способность радикалов. Таким образом, свободные радикалы, находящиеся в мембранах, могут менять их структуру, строение, влияя на проницаемость и другие свойства мембран. Эти важнейшие изменения свойств мембран могут привести к нарушению всей деятельности и работоспособности клетки. Естественно, когда такие процессы происходят в клетках головного мозга, то это приводит к изменению содержания психотропных веществ, влияющих, как мы сказали выше, на главные функции и способность мозга. Следовательно, магнитные поля могут значительно воздействовать на жизнедеятельность человека, даже привести его к гибели.

Недавние исследования показали, что так называемые спин-химические реакции определяют возможность влияния магнитного поля не только на биофизические процессы, но и на процессы разрушения твердых тел, связанные с накоплением структурных дефектов: микротрещин, дислокаций, атом-вакансионных дефектов. Действительно, на рост трещин оказывают большое влияние поверхностно-активные вещества (эффект Ребиндера), которые, как правило, являются парамагнетиками [Зельдович, 1988]. Скорость образования на поверхностях трещины пленок этих веществ, в частности, воды, зависит от ориентации спинов, подобно вышеописанному случаю взаимодействия радикалов со стенками мембран. Возмущения магнитного поля, при которых происходит прецессия спинов, могут изменить скорость такого процесса, и если это происходит вблизи кончика трещины, по месту концентрации напряжений, то меняется прочность. В пластичных материалах в условиях, когда скорость пластической деформации определяется поддвижками и их взаимодействием с точечными дефектами, эффект магнитного поля имеет свои особые черты. У препятствующих дислокациям примесных атомов магнитный момент (спин) начинает прецессировать, и при этом сопротивление перемещению уменьшается. Начальный срыв прецессирующих частиц при продвижении сейсморазрыва, как оказалось, происходит легче по сравнению с обычным случаем чисто тепловых колебаний. Результирующий эффект увеличения

пластичности в магнитном поле получил название «резонанс Брокхурста» [Alshits et al, 2008].

Поэтому изменение магнитного поля Земли имеет очень большое значение. И в этом контексте по-иному выглядят факты, свидетельствующие об изменении и инверсиях магнитного поля.

Таким образом, на человека влияют магнитные бури, которые бывают при вспышках на Солнце и являются самыми динамичными проявлениями его активности [Хаин, Короновский, 2006]. Вспышки носят циклический характер с 11-летним периодом. Поэтому осложнения, связанные с солнечной активностью, человеческий и иной организм, живущий на Земле, испытывает довольно регулярно. Это объясняется тем, что при вспышках Солнце излучает поток ионизированной водородной плазмы, состоящий из протонов и электронов. Они излучаются со скоростью 400–500 км/с. Это так называемый солнечный ветер. Во время выброса плазменного облака в магнитосфере Земли происходят сильные возмущения. Они называются магнитными бурями. В это время быстро и резко меняется напряженность электромагнитного поля атмосферы и происходит всплеск микроволнового ультрафиолетового и рентгеновского излучения.

Естественно, это сильно влияет на все живое на Земле. С наблюдаемым снижением напряженности магнитного поля, изменением плотности магнитосферы и ее периодическим деформированием под давлением солнечного ветра, возможно, связаны уже сейчас явно видимые глобальные перемены климатических и метеорологических условий, аномальные отклонения от средней температуры в разных регионах. Кроме того, с солнечной активностью связаны не только биологические процессы, но и тектоническая обстановка на Земле, причем на разных широтах и полушариях (проявления катастрофических и сильнейших землетрясений и вызванных ими цунами) [Левин, 2001].

Катастрофические изменения, связанные с явлениями в космосе и околоземном пространстве, в магнитосфере и атмосфере, гидросфере и даже тектоносфере Земли, естественно, отразятся на биосфере в целом и человеке в частности. Это скажется на внутренней жизнедеятельности организма человека, начиная от клеточного уровня – разрушая его, нарушая синтез ферментов, гормонов, психотропных и анальгетических веществ, изменяющих его свойства, и нарушая генетику человека. Это может повлиять на существование самой жизни людей.

8.3. Происхождение Солнечной системы и планеты Земля

Одним из первых в истории цивилизации занялся поисками причин образования и эволюции Солнечной системы французский естествоиспытатель Ж. Л. Леклерк Бюффон. Он предложил гипотезу, согласно которой планеты образовались вследствие *сильного удара по Солнцу массивного тела*. За него Бюффон принимал *комету*. Это была первая из так называемых катастрофических гипотез происхождения Солнечной системы. Они неоднократно предлагались и позднее, вплоть до начала нашего века, но каждый раз оказывались несостоятельными. Это определяется двумя методологическими пороками: 1) отрывом образования Солнца от обра-

зования планет, в то время как все особенности (химический, а главное, изотопный состав, возраст, то обстоятельство, что планеты составляют всего 0,02 % от общей массы системы) указывают на общность их происхождения; 2) приданием рождению планет характера случайного, а не закономерного процесса.

Неизмеримо большее научное значение имела и имеет гипотеза немецкого философа И. Канта, обнародованная в 1755 году. Она исходила из предположения, что материя, наполняющая Вселенную, первоначально была разложена на элементарные частицы, равномерно распределенные в пространстве. Затем под влиянием всемирного тяготения началось образование центров сгущения материи, одним из которых было Солнце. При этом материя приобрела *вращательное движение вокруг Солнца*, в процессе которого из первоначального пылевого облака образовались планеты.

В дальнейшем в 1796 году французский математик П.-С. Лаплас эту гипотезу усовершенствовал и математически доработал, поэтому она стала называться *гипотезой Канта–Лапласа*. Как считал Лаплас, первоначально существовала вращающаяся и сжимающаяся под влиянием всемирного тяготения *газовая туманность*. И в центре ее *сгущения* в дальнейшем образовалось Солнце. Заметим, что такая туманность незадолго до этого была открыта В. Гершелем.

В дальнейшем в процессе развития происходило сжатие и вращение туманности, она *сплющивалась*, и от нее отделялись кольца. Последние, в свою очередь, распадались, и образовались центры сгущений. Из них впоследствии и возникли планеты. Затем таким же образом образовались спутники вокруг планет. Первоначально планеты и спутники были *раскаленными газовыми шарами*. Затем они остыли, покрылись корой и затвердели. Поэтому космогоническая гипотеза Канта–Лапласа относится к разряду так называемых «горячих» космогоний. Но постепенно против нее начали накапливаться возражения, из которых самым серьезным оказалось следующее. Так, характерным параметром Солнечной системы является распределение момента количества движения (МКД). Он определяется как произведение массы тела на расстояние от центра системы и скорость его вращения. Из общности образования Солнца и планет должно было следовать, что Солнце, которое содержит более 90 % всей массы системы, обладает и наибольшим МКД. В действительности же вследствие очень медленного вращения Солнце обладает лишь 2 % общего МКД, а планеты, в особенности планеты-гиганты, и прежде всего Юпитер, остальными 98 %. Гипотеза Канта–Лапласа в своей первоначальной форме оказалась неспособной объяснить это противоречие, и в начале XX века начались поиски альтернативных гипотез. Одной из них была гипотеза английского астронома Джинса, вернувшегося к представлению Бюффона о том, что планеты образовались из сгустка солнечной материи, вырванного близко проходившей мимо Солнца звездой.

Американские исследователи Ф. Мультон (астроном) и Т. Чемберлен (геолог) выдвинули сходную гипотезу, согласно которой *газ покидает Солнце вследствие мощных приливов*, вызванных проходящей звездой, а затем конденсируется в небольшие *планетезимали*, далее слипающие-

ся в астероиды и планеты. Это представление о планетезималиях и их конденсации удержалось в науке, хотя сама гипотеза Мультона–Чемберлена и была отвергнута.

Советский ученый О. Ю. Шмидт предложил оригинальную гипотезу захвата Солнцем газопылеметеоритного облака с дальнейшей его конденсацией в планеты. Важным положительным элементом его гипотезы, развитым затем его учениками и последователями в нашей стране, явилась разработка модели *процесса конденсации протопланетного облака* и аккумуляции из него планет и спутников. При этом принимается, что вещество этого облака было первоначально холодным. Таким образом, космогония Шмидта является «холодной».

За последние два десятилетия многое прояснилось в проблеме происхождения Солнечной системы. При этом произошло как бы возвращение на новом уровне к идее Канта. Так, в начале XXI века А. А. Баренбаумом [2002] было открыто явление струйного истечения вещества из центра спиральных галактик. Обнаружилось, что «через 20–37 млн. лет Солнечная система подвергается мощным бомбардировкам галактическими кометами, и примерно раз в миллиард лет Солнце взаимодействует с другими звездами Галактики, меняя параметры своей орбиты» [Баренбаум, 2007, с. 55].

Поэтому некоторые положения гипотезы Канта–Лапласа были пересмотрены. Например, было предположено, что разрушение предполагаемой планеты Фаэтон связано не с первым циклом образования планет 4,6 млрд. лет назад, а со вторым. Оно произошло в результате близкого пролета к Солнцу звезд Галактики. Это, в свою очередь, вызвало интенсивные столкновения Фаэтона с галактическими кометами, его распад и образование пояса астероидов, метеоритное вещество из которого падает на нашу планету до настоящего времени.

Астрономам удалось непосредственно наблюдать процесс рождения звезд из межзвездной плазмы, состоящей из газа и пыли («пылевая плазма»). Звездообразование может происходить из-за противодействия магнитных полей и давления газа с излучением лишь вдоль внешних границ спиральных рукавов галактик, включая нашу. Начало сжатия межзвездного облака (туманности) могло стимулироваться близким взрывом сверхновой звезды, на что указывает содержание в Солнечной системе тяжелых и сверхтяжелых изотопов. Они могли быть продуктом мощных ядерных реакций, протекающих лишь при взрывах массивных звезд, превращающих их в сверхновые звезды. Когда Солнце достигло определенных размеров, в его недрах начались термоядерные реакции с превращением водорода в гелий. Молодые звезды, особенно массивные, теряют часть своего вещества в виде «звездного ветра».

8.4. Падение небесных тел и их столкновение с Землей

Для рассмотрения явлений, связанных с падением небесных тел, необходимо после краткого освещения темы образования звезд, планет и других тел в космосе отметить их и дать определение. Помимо Солнца и планет в Солнечной системе имеются кометы, астероиды, метеориты и

космическая пыль [Баренбаум, 2002; Короновский, 2006; Solem, 1999]. Из космоса на земную поверхность обычно выпадает внеземного материала больше, чем думают. Космическая пыль профильтровывается атмосферой, и на Землю ее выпадает ежегодно около 1 млн. тонн. Определим, что понимается под основными небесными телами.

Кометы — это небольшие космические тела, движущиеся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам, то приближающиеся к Солнцу, то удаляющиеся за пределы орбиты Плутона. Они состоят из смерзшихся камней и газов, в частности аммиака, метана, водорода и др. Состав комет близок к составу внешних геосфер планет и особенно их спутников. При приближении к Солнцу комета начинает светиться отраженным солнечным светом, и под действием солнечного ветра часть материала испаряется и отталкивается в сторону от Солнца с образованием хвоста длиной в миллионы километров.

Астероид — малая планета диаметром от 1 до 1000 км. Суммарная масса всех малых планет оценивается в величину менее 1/700 массы Земли. Орбиты большинства малых планет находятся между орбитами Марса и Юпитера, это так называемый пояс астероидов. Здесь, согласно закону планетных расстояний Тициуса–Боде, должна была находиться планета, названная Фаэтон. Ее распад, как предполагал немецкий астроном Г. Ольберс еще в 1804 году, является причиной образования большинства астероидов в этом поясе. Однако эта идея не разделялась даже современниками автора В. Гершелем и П. Лапласом. Заметим, что помимо астероидов из этого пояса есть и такие, которые попали к нам с поверхности Луны, а также Марса.

Большинство астероидов имеют размеры несколько десятков километров, но есть и более крупные. Самые известные из них Церера (диаметр 1020 км), Паллада (538 км), Веста (549 км), Гигея (450 км). Относят к крупным астероидам также малые планеты Юнона, Эрот, Амур, Гидальго и Икар. Сейчас точно определены параметры орбит 66 тыс. астероидов. При этом количество вновь открываемых растет в геометрической прогрессии, удваиваясь каждые два года [Короновский, 2006]. Форма астероидов неправильная, угловатая, поверхность испещрена кратерами.

Метеориты — это малые тела Солнечной системы, падающие на Землю из межпланетного пространства. Они представляют собой твердые каменные или железные округло-угловатые образования, выпадающие иногда на поверхность планет и нередко оставляющие на ней след в виде ударных кратеров. В составе метеоритов не содержится каких-либо неизвестных на Земле химических элементов, напротив, в них присутствуют почти все известные элементы и их изотопы. По составу метеориты подразделяются на три главные группы: *железные, железокремневые и каменные*. Источником метеоритов является пояс астероидов.

В связи с тем, что наша планета имеет плотную атмосферу, большинство метеоритов, войдя в нее, испаряются, разогревшись от трения, и испускают при этом яркое свечение. За яркое свечение метеориты называют *болидами*. Каждый год на Землю падает в среднем до 550 метеоритов весом от нескольких граммов до килограмма и более. Из них 350 падает в море, 150 — на сушу (вычислено по закону вероятности). Два-три осколка

из этого количества попадает в руки ученых. Подсчитано, что метеорит весом 500 кг падает приблизительно один раз в месяц; 50-тонный – один раз в 150 лет, 50 000-тонный – один раз в 100 тыс. лет.

На земной поверхности обнаружено несколько десятков (40–60) метеоритных *кратеров*. Считается, что четыре млрд. лет назад метеориты падали на Землю в 100 тыс. раз чаще, чем теперь. Затем их число резко снизилось, и два млрд. лет назад оно достигло современного уровня. Поверхность Луны и планет Солнечной системы покрыта метеоритными (импактными) кратерами (астроблемами). Они сохраняются иногда весьма продолжительное время, особенно при отсутствии атмосферы.

Малая планета (астероид) диаметром несколько километров падает на Землю один раз в 20–50 млн. лет. Всем известен Тунгусский метеорит, упавший 30 июня 1908 года. Природа его окончательно не установлена, и существует много версий. По данным Д. Н. Тимофеева, это был мощный взрыв облаков метана, вышедшего после землетрясения в одноименной котловине аналогично, например, дегазации угольных и, возможно, нефтяных пластов после Невельского землетрясения 2.08.2007 года.

В 1947 году в горах Сихотэ-Алинь на Дальнем Востоке России выпал целый метеоритный дождь общей массой около 70 тонн. В результате его падения было образовано 24 ударных кратера от 8 до 26 м в поперечнике. Тысячетонный метеорит упал в Неброке в США в 50 км от города. Если бы он упал в населенном месте, была бы катастрофа. Лишь самые большие метеориты достигают поверхности Земли, и наиболее крупный из них найден в Намибии (59 тонн). Много метеоритов обнаружено на ледовом щите Антарктиды, где они ярко выделяются своим темным цветом и как бы вплавлены в лед. Встречаются они и в осадках ложа Мирового океана.

Подсчитано, что ежегодно на поверхность Земли выпадает до тысячи метеоритов, большей частью очень мелких. Но на ранней стадии своего развития Земля не избежала интенсивной метеоритной бомбардировки, подобно другим планетам и их спутникам. В местах падения метеоритов на поверхности планет остаются кратеры. Более древние из них, предположительно относимые к метеоритным, называют *астроблемами* («звездные шрамы»).

К настоящему времени на Земле обнаружено более 150 астроблем размером более 1,2 км. В менее отдаленном геологическом прошлом на Землю также падали довольно крупные метеориты, свидетельством чего являются древние кратеры. Например, Аризонский в США диаметром 1207 м и глубиной 174 м, Рисский в ФРГ – соответственно 24 км и 180 м (по данным бурения – 750), Каали на о-ве Сааремаа в Эстонии – 110 и 16 м. К самой крупной из подобных форм в нашей стране относится Попигайская астроблема на севере Сибири. Ее поперечник составляет около 100 км. Для истории Тихого океана, несомненно, интересен кратер ИМГиГ диаметром 10 км, открытый в 1997 году в абиссальной котловине Картографов в ее северо-западной части Г. С. Немченко с другими.

Столкновение с малой планетой или астероидом

Современные исследования показывают, что с Землей потенциально имеет возможность столкнуться несколько тысяч астероидов и комет диа-

метром более одного км [Solem, 1999]. Причем столкновение Земли с небесным телом размером более двух км, как считают ученые [Paine, 1999], неизбежно приведет к глобальной катастрофе. В прошлом столкновений Земли с такими объектами, видимо, не было, но с более мелкими телами происходят регулярно. Необходимо отметить, что большая часть небесных тел разрушается или сгорает при падении в верхних слоях атмосферы. Поверхности Земли достигают метеориты, диаметр которых – около 100 м. Известно, что 11 июня 2004 года в Новой Зеландии метеорит размером с грейпфрут пробил крышу дома и был обнаружен хозяйкой [Короновский, 2006].

Статистику падающих объектов от их радиуса построили S. N. Ward и E. Asphaug [2000]. Она основана на наблюдениях с геостационарных спутников за взрывами метеорных тел размерами около одного м в атмосфере. Они указывают, что в среднем за год происходит около 25 событий такого рода. Другим опорным значением для получения этой зависимости, представляющим собой прямую линию, явилось число столкновений Земли с крупными небесными телами, размером более одного км. Заметим, что крупные объекты сталкиваются с Землей примерно один раз в 100 тыс. лет.

Таким образом, можно примерно оценить, какое число астероидов сталкивается с Землей за один год в зависимости от их радиуса. При этом рассмотрены радиусы от одного до 1000 м и число объектов от 10 до 10^{-6} (то есть до одного в миллион лет). Согласно этой зависимости, например, тело радиусом 10 м сталкивается с Землей один раз в 10 лет.

Конечно, более опасная катастрофа может произойти в случае столкновения Земли с кометой или астероидом. И столкновение такое возможно. Естественно, оно вызовет катастрофу планетарного масштаба, хотя подобное событие может произойти и по иным причинам (изменения скорости вращения Земли, ее орбиты и др.). Рассматривая возможности падений небесных тел, напомним, что, например, 23 марта 1989 года относительно рядом с нашей планетой (на расстоянии в два раза больше, чем от Земли до Луны) пролетел каменный астероид с поперечником около 800 м и скоростью 70 км/с.

В относительной близости от Земли пролетел астероид 1989FC. «Астрономы предсказывают, что астероид 1989FC может вернуться, и если он столкнется с Землей, то последствия будут равны одновременному взрыву 1000 водородных бомб. ...18 марта 2004 года астероид диаметром 30 м прошел в 43 тыс. км от Земли. Это самое маленькое расстояние, которое наблюдалось за всю историю астрономических наблюдений. Большое количество астероидов несет в себе угрозу всему живому на Земле. В 2002 году было сделано предположение, что астероид 2002 NT7, имеющий диаметр 2,03 км, объем 4,4 км³, массу 11 млрд. т и скорость 26,24 км/с, может столкнуться с Землей в феврале 2019 г. Это вызовет полное разрушение в радиусе 250 км, а в радиусе 600 км будут сплошные пожары. Энергия подобного столкновения будет эквивалента взрыву 1 млн. т тротила. Рассчитано, что астероид 2004MN диаметром более 300 м с вероятностью один шанс из 50 13 апреля 2029 года может удариться о Землю» [Короновский, 2006, с. 35].

Помимо этого, астероиды и кометы могут столкнуться с другими планетами нашей системы. Так, в 1994 году произошло столкновение обломков кометы Шумейкера–Леви с Юпитером, что привело к огромной дыре в его атмосфере.

Таким образом, падение метеоритов может представлять большую опасность, но прогноз и предупреждение об этом существуют. Зная, что малая планета падает на поверхность Земли один раз в 20–50 млн. лет, а обнаружение их возможно относительно заблаговременно, можно успеть подготовиться к этой катастрофе.

В геологической истории падение метеоритов могло оборачиваться значительной катастрофой. Ученые рассмотрели вопрос принятия возможных мер, способных спасти Землю. Ими предложено бомбардировать эти тела или запускать космический корабль им навстречу, посадка на небесном теле и с помощью работающих двигателей корабля попытаться изменить направление его движения. При таких действиях на больших расстояниях достаточно ничтожного отклонения тела от расчетной трассы, чтобы оно прошло мимо Земли и тем самым предотвратить катастрофу.

Однако, кроме падения метеоритов и столкновения Земли с астероидами (малыми планетами), как считает А. А. Баренбаум, на Землю также воздействуют мощнейшие процессы в Галактике [2007]. Они обусловлены периодическими пересечениями Землей струйных потоков и спиральных галактических рукавов. Вследствие этих пересечений Земля, как и все планеты Солнечной системы, подвергается интенсивным бомбардировкам галактическими кометами. Это происходит примерно раз в миллиард лет, при этом меняются параметры орбиты. Таким образом, имеют место пролеты Солнца через массивные облака звезд, множественное падение астероидов, бомбардировки кометами Галактики.

8.5. Глобальная катастрофа (конец света)

Катастрофа в планетарном масштабе, которая может произойти по разным причинам, предсказывается многими – от Библии до отдельных людей (Нострадамус, прорицательница Ванга, Э. Кейси, В. Мессинг и др.), пронававших в так называемое информационное поле (хроники Акаши), где, видимо, содержатся сведения о прошлом и будущем. Например, Э. Кейси среди многих других сбывшихся событий предсказал Вторую мировую войну, а Вольф Мессинг назвал точную дату ее окончания, Ванга – катастрофу Чернобыльской АЭС и гибель атомной подводной лодки «Курск» и т. п., поэтому игнорировать эту информацию нельзя.

Это можно объяснить, если воспринимать такую категорию, как *время*, не прямолинейно, упрощенно и однозначно, а с учетом последних теорий и гипотез, говорящих о неоднородности его скорости, течения, петель и т. п.

Заметим, что, например, в Библии (Евангелие от Матвея, вторая глава, Откровение от Иоанна, Второе соборное Послание святого апостола Петра и др.) связывался конец света с приходом на Землю глобальных катастроф и явлений.

Вот, например, как образно описано это явление две тыс. лет назад в Библии: «Когда же услышите о войнах и смятениях, не ужасайтесь: ибо

этому надлежит быть прежде: но не тотчас конец. Тогда сказал он им: восстанет народ на народ и царство на царство; Будут большие землетрясения по местам и глады и моры, и ужасные явления и великие знамения с неба (Лук. 21:9, 10.11). И будут знамения в солнце и луне и звездах, а на Земле уныние народов и недоумение; и море восшумит и возмутится (имеется в виду, очевидно, *цунами*)... Люди будут издыхать от страха и ожидания бедствий, грядущих на Вселенную, ибо силы небесные поколеблются (Лук. 21:21, 22, 25, 26). И если б не сократились те дни (возможно, *инверсии* магнитных полюсов. – **Авт.**), то не спаслась бы никакая плоть, но ради избранных сократятся те дни» (Матф. 24:22).

Явно в настоящее время природные явления находят отражение в вышесказанном в предыдущих главах. «Тогда явится знамение Сына Человеческого на небе, и тогда восплачутся все племена земные и увидят Сына Человеческого, грядущего на облаках небесных с силою и славою великою» (Матф. 24:30). «Небо и земля прейдут, но слова Мои не прейдут. О дне же том и часе никто не знает, ни Ангелы небесные, а только Отец Мой один» (Матф. 24:36).

Как отнестись к пророчествам из Библии? Заметим, из 340 предсказаний 320 уже сбылось. Так будет ли глобальная катастрофа или конец света? Обратимся к тому, что говорит наука. Этому посвящена даже специальная область науки – эсхатология. Рассмотрим некоторые факты. Так, в 2008 году астрономы установили сближение галактик и столкновение нашей Галактики с другой. Более того, хорошо известно, что наше Солнце, существующее уже около 4,5 млрд. лет (а общая продолжительность существования нашего светила оценивается в период около 15 млрд. лет), потухнет, превратившись, как и другие, в звезду типа желтого карлика. Естественно, прекращение деятельности ждет и другие планеты нашей системы, включая Землю. Более того, есть основание считать, что Земля не просуществует до этого рубежа, а прекратит его ранее (примерно через два млрд. лет) по иным причинам (остывание и др.).

Причин массового вымирания может быть несколько. Помимо падения астероида, возможна, например, губительная вспышка гамма-излучения. По данным американского астрофизика А. Мэтлока и российского ученого М. Медведя, в истории Земли было пять случаев массового вымирания. По их гипотезе, Земля в Галактике периодически сталкивалась с газовым облаком, когда возникает волна, несущая смертоносное излучение. Когда Земля находится в относительном центре Галактики, мы защищены ее полем, но когда она отклоняется от центральной части и смещается к ее краю, действие защитного магнитного поля меньше, она становится уязвима. Со временем магнитная защита поля слабеет, и через 62 млн. лет происходит вымирание, последнее было в мелу. Следующее подобное явление можно ожидать через 10 млн. лет (по А. Мэтлоку). Самое большое известное массовое вымирание произошло в пермский период (230–285 млн. лет назад), которое, возможно, было связано с подъемом Тихоокеанского суперплюма (см. вторую главу). В результате динамических процессов в ядре выплескивалось глубинное вещество в виде расширяющихся горячих струй от ядра суперплюма, поднимавшееся из недр к верхним слоям Земли. Пермью датируют и сибирские траппы,

которые также связывают с подъемом суперплюма, но другого. Температура излившихся базальтов или внедрившихся в осадочный чехол силлов долеритов превышала 1000°C . Полагают, что при этом происходил значительный выход в атмосферу углекислого и сернистого газов. Последний при соединении с водой приводил к образованию губительной серной кислоты. В конце пермского периода в результате загрязнения атмосферы серой возникли благоприятные условия для образования сероводорода. В результате этого наступила нехватка кислорода, возник парниковый эффект, палеотемпература поднялась на 15° за 10 тыс. лет. Вследствие этого 75 % видов исчезло, а в Гренландии – даже 95 %. Это именно то, что начинается в настоящее время в результате парникового эффекта, связанного с утонением озонового слоя.

Приведем еще один пример глобальной катастрофы. Американский исследователь Либерман установил факт массового вымирания трилобитов в позднем ордовике, а астрофизик А. Мэтлок обнаружил взрыв сверхновой звезды, относящийся к тому времени, примерно 440 млн. лет назад. Они связали эти явления и объяснили гибель трилобитов гамма-излучением при вспышке сверхновой звезды. Согласно их выводам, при гамма-излучении образовался диоксин азота, уменьшился озоновый слой, в живых организмах структура ДНК заменилась. Растения погибли, а следом – и животные.

Итак, глобальные катастрофы, приводившие к массовым вымираниям всего живого, ранее уже происходили на Земле. Можно заключить, что такая катастрофа произойдет и в будущем. Ее причина может быть обусловлена как астрономическими, так и глубинными геологическими процессами, а возможно, и антропогенными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены геодинамические процессы и природные катастрофы, следствием которых они являются. Рассмотрены процессы в оболочках Земли, ядре, земной коре и верхней мантии (конвекция, адвекция, субдукция, спрединг и др.), геодинамические и тектонические гипотезы и концепции.

Процессы, приводящие к природным катастрофам, различны как по природе, так и по физике, динамике, масштабу проявления. Следует различать планетарные (охватывают всю Землю и несколько ее геосфер), региональные (обычно в одной геосфере и регионе), локальные катастрофы. Некоторые процессы происходят за пределами Земли (в космосе), но способны не только воздействовать на нее и другие планеты, но и привести к ее глобальной катастрофе.

В книге выделяются внутренние и внешние геосферы проявления природных катастроф. Первые включают в себя ядро, нижнюю и верхнюю мантию, литосферу, земную кору; вторые – приповерхностную часть земной коры, гидросферу, атмосферу, околоземное пространство и космос. В каждой из сфер проявляются и выделено нами до шести видов катастроф, а всего – 26.

Так, мы выделили планетарные катастрофы, связанные с изменением параметров планеты (скорости и наклона оси вращения), инверсией магнитных полюсов Земли, обусловленной срывом электрических токов на ядре.

В литосфере и земной коре, прежде всего, это землетрясения и извержения вулканов. В верхней части коры рассмотрены обвалы, оползни, карст, сели и лахары, снежные лавины, подводные оползни, обломочные и турбидитные потоки. В гидросфере происходят такие катастрофы и опасные явления, как цунами, штормовые нагоны, наводнения и паводки. Значительные и глобальные катастрофы могут быть связаны с процессами в атмосфере, ионосфере, космосе, в частности рост озоновых дыр, падение небесных тел.

Большое значение и частоту имеют катастрофы в литосфере и земной коре, связанные с сильными землетрясениями и извержениями вулканов. История сохранила сведения о многих из них. Поэтому в мире проводится их изучение, в том числе на российском Дальнем Востоке (Сахалине, Курилах, Камчатке). Анализ проведенных исследований показывает, что в настоящее время разработано немало методик и алгоритмов долго-, средне- и краткосрочного прогноза, представленных в настоящей работе. Конечно, есть определенные трудности прогноза сильных землетрясений, но стратегия их преодоления уже намечена. Важны и меры защиты, описанные в работе.

Известными и порой очень значительными природными катастрофами являются извержения вулканов. Ярким примером является извержение 27 августа 1883 года вулкана Кракатау в Индонезии. В книге описано семь видов опасности при вулканических извержениях: лавовые потоки, тефры (вулканические бомбы, лапилли, пепел), грязекаменные потоки, водные

потоки (лахары), палящая туча (раскаленные лавины), вулканические газы и цунами вулканического происхождения. Большое значение имеют и меры пассивной защиты. К ним относятся вулканическое районирование, включая изучение внутреннего строения вулканических построек; системы предупреждения и детально разработанный план эвакуации населения.

Помимо глубинных (эндогенных) процессов значительное число природных катастроф связано с экзогенными процессами: гравитационными, водно-гравитационными, гравитационно-водными, подводно-гравитационными, а также лавинами и селями. В связи с большой опасностью лавин в работе показан их механизм.

При рассмотрении природных катастрофических явлений необходимо учесть современные исследования синергетики и нелинейной динамики.

Все вышеперечисленные катастрофы связаны с твердой оболочкой Земли, однако 2/3 ее поверхности занимает Мировой океан. Самыми значительными из катастроф являются цунами. У всех на памяти цунами 26 декабря 2004 года в Индонезии и Индийском океане, вызванное Суматра-Андаманским землетрясением с магнитудой $M_w=9,3$ и приведшее к гибели около 300 тыс. человек. Анализ подобных событий показал, что в истории Земли они бывают не так уж редко. В России крупнейшим было цунами 5 ноября 1952 года на Северных Курилах.

Причины, вызывающие цунами, могут быть различные. Это землетрясения, оползни, извержения вулканов, обрушения ледника, атмосферные процессы, (метеоцунами) и падения космических тел (космогенные цунами). Они рассмотрены в настоящей работе, где приведены некоторые формулы расчета основных параметров цунами (высоты волны, скорости и т. д.), описаны последствия и приведены меры активной и пассивной защиты от них. Важнейшие из мер – мониторинг и предупреждение цунами, строительство защитных сооружений (волноломов, дамб), а также своевременное оповещение и эвакуация людей. Кроме цунами в гидросфере проявляются такие катастрофические явления, как штормовые нагоны, наводнения и др. Они также разрушительны и способны принести большой ущерб.

С атмосферой Земли также связаны значительные природные катастрофы. Это тропические циклоны (тайфуны, ураганы, торнадо), пыльные и песчаные бури, приносящие большие разрушения и вызывающие многочисленные жертвы. Для изучения причин их возникновения исследуются циркуляция воздуха, скорость воздушных масс, структура и траектория циклонов, особенно тропических. Ежегодно в мире тропические циклоны уносят тысячи жизней.

Несмотря на то, что вышеописанные явления в геосферах Земли имеют катастрофические последствия, они в большинстве своем носят региональный и локальный характер. Однако могут быть такие катастрофы, которые способны вызвать глобальные последствия, вплоть до гибели всего живого и планеты в целом. Это катастрофы, связанные с процессами и явлениями в околоземном пространстве и космосе: падение небесных тел, например, астероидов, озоновые дыры, глобальное потепление (или похолодание), возможная потеря магнитного щита Земли в результате ослабления магнитного поля, которое наблюдается в течение последних

двух тыс. лет, инверсия магнитных полюсов и другие явления.

Кроме столкновений Земли с небесными телами к неминуемой катастрофе приведет выработка Солнцем термоядерной энергии. И оно прекратит свое существование, не говоря о возможной гибели планеты еще до этого срока от социальных катастроф (мировые войны).

Более того, как показали исследования, в прошлом на Земле уже были неоднократно (до пяти раз) массовые вымирания. Причинами этого могли быть губительная вспышка гамма-излучения в космосе и периодические столкновения Земли с газовым облаком. Они были в прошлом и возможны в будущем. Также астрономы установили возможность столкновения нашей Галактики с другой. Видимо, наиболее глобальное событие, ожидающее Вселенную, – это разбегание галактик.

Осознание возможности или вероятности глобальной катастрофы в удаленном будущем придает особую значимость усилиям ученых, направленных на исследование причин и условий природных катастроф с целью минимизации возможного ущерба. Поэтому необходимо изучать не только этот материальный мир плотной материи, состоящий из планет, звезд, Галактик и Вселенной, но и другие более тонкие миры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурахманов, А. И. Извержение вулкана Иван Грозный в 1989 году. Вулканология и сейсмология / А. И. Абдурахманов [и др.]. – №1 4. – 1990. – С. 3–9.
2. Авсюк, Ю. Н. Внеземные факторы, воздействующие на тектогенез / Ю. Н. Авсюк // Фундаментальные проблемы общей тектоники. – М.: Научный мир, 2001. – 520. – С. 425–443.
3. Авсюк, Ю. Н. Привлечение материалов астрометрических изменений к геодинамической реконструкции природных процессов / Ю. Н. Авсюк, З. П. Светлосанова // Тектоника и геофизика литосферы: материалы XXXV Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 12–13.
4. Авсюк, Ю. Н. Фактическое обоснование цикличности и хода приливной эволюции системы Земля–Луна–Солнце / Ю. Н. Авсюк, И. И. Суворов // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 3–6.
5. Адушкин, В. В. Влияние дегазации Земли на ее озоновый слой / В. В. Адушкин, В. П. Кудревцев, Л. А. Журавлева // Динамика взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИДГ РАН, 2004. – С. 191–201.
6. Адушкин, В. В. Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер: сб. научных трудов ИТГ РАН / В. В. Адушкин, А. А. Спивак, Ю. К. Щукин; под ред. академика РАН В. В. Адушкина. – М.: ГЕОС, 2005. – 266 с.
7. Александров, Э. Д. Озоновый щит Земли и его изменения / Э. Д. Александров [и др.]. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 288 с.
8. Анфилов, В. Н. Мантийные плюмы: уровень генерации энергии к поверхности Земли / В. Н. Анфилов, Ю. В. Хачай // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 18–20.
9. Арефьев, С. С. Предварительные результаты эпицентральных наблюдений Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. / С. С. Арефьев [и др.] // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г.: Инф.-анал. бюл. / ФССН. Экстр. вып., октябрь 1995 г.; гл. редактор – Р. П. Лавров. – М., 1995. – С. 36–47.
10. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 128 с.
11. Астафьев, Д. А. Экстремальные состояния геодинамики Земли / Д. А. Астафьев // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 36–38.
12. Атмосферный озон и изменения глобального климата / Э. Л. Александров [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 167 с.
13. Балакина, Л. М. Механизмы очагов промежуточных землетрясений Курило-Камчатской фокальной зоны / Л. М. Балакина // Физика Земли. – 1981. – № 8. – С. 3–24.
14. Баренбаум, А. А. Вклад галактических воздействий в энергетику тектогенеза / А. А. Баренбаум // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 51–55.
15. Баренбаум, А. А. Галактика, Солнечная система, Земля: Соподчиненные процессы и эволюция / А. А. Баренбаум. – М., ГЕОС, 2002. – 394 с.
16. Баренбаум, А. А. Ранняя геологическая история и эволюция строения Земли: как их изучать / А. А. Баренбаум // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 55–59.
17. Баркин, Ю. В. Механизм тектонической активности Земли: глубинная геодинамика, ее современные проявления / Ю. В. Баркин // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 59–62.
18. Библия. Книги священного писания Ветхого и Нового завета. Канонические. – Можайск, 1994. – 292 с.
19. Болдырев, С. А. Трехмерная скоростная модель верхней переходной зоны мантии от Тихого океана к Азиатскому континенту / С. А. Болдырев, С. А. Кац // Вулканология и сейсмология. – 1982. – №1 2. – С. 80–96.
20. Болт, Б. Землетрясения. Общеизвестный очерк / Б. Болт. – М.: Мир, 1981. – 256 с.
21. Большой энциклопедический словарь: в 2 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров. – Сов. энциклопедия, 1991. – Т. 2. – 1991. – 768 с.
22. Викулин, А. В. Землетрясение будет завтра / А. В. Викулин, Н. В. Семенец, В. А. Широков. – Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. – 91 с.
23. Викулин, А. В. К землетрясению без риска / А. В. Викулин [и др.]. // Петропавловск-Камчатский: Изд. центр типографии СЭТО-СТ, 1997. – 119 с.
24. Гилл, А. Динамика атмосферы и океана: в 2 т. / А. Гилл.; пер. с англ. – М.: Мир, 1986.
25. Гончаров, М. А. Введение в тектонофизику: учеб. пособие / М. А. Гончаров, В. Г. Талицкий, Н. С. Фролова; отв. ред. Н. В. Короновский. – М.: КДУ, 2005. – 496 с.; илл.
26. Гостюшин, А. В. Краткая энциклопедия экстремальных ситуаций / А. В. Гостюшин. – Кострома: творчество российских издателей, 1995. – 756 с.
27. Грачев, А. Ф. Мантийные плюмы / А. Ф. Грачев // Проблемы глобальной геодинамики: материалы Теоретического семинара ОГГГН РАН, 1998–1999 гг. / Под. ред. академика Д. В. Рундквиста. – М.: ГЕОС, 2000. – 246 с. – С. 69–103.
28. Гусев, А. А. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки / А. А. Гусев, В. Н. Мельникова // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 6. – С. 55–63.
29. Данилов, А. Д. Стратосферный озон в Арктике и Антарктиде (обзор) / А. Д. Данилов, С. И. Авдюшин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1992. – Т. 32. – № 1. – С. 1.
30. Дарвин, Дж. Г. Приливы и родственные им явления в Солнечной системе / Дж. Г. Дарвин. – М.; Пг., 1923. – 328 с.

31. Дашко, Н. А. Оценка изменений характеристик центров действия атмосферы Азиатско-Тихоокеанского региона в течение 20-го столетия и их влияние на циркуляцию над Японским морем / Н. А. Дашко, С. М. Варламов // Гидрометеорологические и экологические условия Дальневосточных морей: оценка воздействия на морскую среду: тематический выпуск ДВНИГМИ. – № 3. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – С. 10–25.

32. Добрецов, Н. Л. Глубинная геодинамика / Н. Л. Добрецов, А. Г. Кирдяшкин, А. А. Кирдяшкин. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. – 409 с.

33. Древилло, М. С. К вопросу о современном состоянии оценки степени лавинной опасности Курильских островов / М. С. Древилло, Н. А. Казаков // Курильские острова: история, современность, перспективы: тез. докл. научно-практической конференции, посвященной 300-летию освоения Курильских островов русскими людьми. 16–17 декабря 1997 г. – г. Южно-Сахалинск, 1997. – С. 91.

34. Друмя, А. В. Землетрясение: где, когда, почему? / А. В. Друмя, Н. В. Шебалин. – Кишинев; Штиинца: 1985. – 196 с.

35. Ермаков, В. А. Вероятная эволюция тектонических процессов в связи с тепловой историей Земли / В. А. Ермаков // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 241–244.

36. Ермаков, В. А. Качественная модель образования протокрыши Земли / В. А. Ермаков // Тектоника и геофизика литосферы: материалы XXXV Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 192–196.

37. Жак, В. М. Дистанционная регистрация слабых волн типа цунами на шельфе Курильских островов / В. М. Жак, С. Л. Соловьев // Доклады АН СССР, 1971. – Т. 198. – № 4. – С. 816–817.

38. Жарков, В. Н. Внутреннее строение Земли и планет / В. Н. Жарков. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

39. Жируев, С. П. Особенности лавинного режима островов Курильской гряды / С. П. Жируев, В. И. Окопный // Курильские острова: история, современность, перспективы: тез. докл. научно-практической конференции, посвященной 300-летию освоения Курильских островов русскими людьми. 16–17 декабря 1997 г. – г. Южно-Сахалинск, 1997. – С. 89.

40. Захарова, А. И. Исследования корреляций между сейсмическим моментом M_0 , магнитудами M_w и M_s / А. И. Захарова, Л. С. Чепкунас // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения: материалы XII Международной конференции. 18–23 сентября 2006 г.: в 2-х т. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2006. – Т. 1. – 350 с. – С. 207–211.

41. Зельдович, Я. Б. Магнитно-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике / Я. Б. Зельдович, А. В. Бучаченко, Е. Л. Франкевич // Успехи физических наук. – 1988. – Т. 155. – № 5. – С. 3–45.

42. Злобин, Т. К. Глубинная геодинамика и строение Земли: учеб. пособие / Т. К. Злобин. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2008. – 124 с.

43. Злобин, Т. К. Глубинная структура вулкана Головинна по данным изучения обменных волн от землетрясений / Т. К. Злобин, В. И. Федорченко // Вулканология и сейсмология. – 1982. – № 4. – С. 99–103.

44. Злобин, Т. К. Глубинные сейсмические исследования вулкана Менделеева на Южных Курилах / Т. К. Злобин, А. И. Абдурахманов, Л. М. Злобина // Тихоокеанская геология. – 1997. – Т. 16. – № 4. – С. 79–87.

45. Злобин, Т. К. Динамика сейсмического процесса и строение очаговых зон сильных землетрясений Сахалина и Курил / Т. К. Злобин. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2005. – 141 с.

46. Злобин, Т. К. Модель строения нижележащей мантии под южной частью Охотского моря, связь ее с мантийным диапиром и мантийным плюмом / Т. К. Злобин // Тектоника, глубинное строение и геодинамика востока Азии: IV Косыгинские чтения 21–23 января 2003 г., г. Хабаровск; под ред. Н. П. Романовского. – Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН, 2004. – С. 204–218.

47. Злобин, Т. К. Первые результаты сопоставления катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M=8,3$) и 13 января 2007 г. ($M=8,1$) и глубинного строения земной коры Средних Курил / Т. К. Злобин, Б. В. Левин, А. Ю. Полец // Доклады АН. – 2008. – Т. 420. – № 1. – С. 111–115.

48. Злобин, Т. К. Природа наклона сейсмофокальных зон Бенъофа и вероятный механизм их образования / Т. К. Злобин // Доклады АН СССР. – 1986. – Т. 289. – № 3. – С. 689–692.

49. Злобин, Т. К. Природные катастрофы в литосфере Сахалино-Курильского региона и меры безопасности: учеб. пособие / Т. К. Злобин. – 2-е изд., испр. и доп. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2006. – 132 с.

50. Злобин, Т. К. Современная сейсмичность и разломная тектоника юга Сахалина: монография / Т. К. Злобин. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2003. – 124 с.

51. Злобин, Т. К. Строение земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги (по сейсмическим данным) / Т. К. Злобин. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. – 150 с.

52. Злобин, Т. К. Цикличность и закономерности в динамике сейсмических процессов сильных землетрясений Сахалина / Т. К. Злобин // Доклады РАН. – 2005, 6. – Т. 400. – № 4. – С. 524–527.

53. Зоненшайн, Л. П. Внутриплитный магматизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли / Л. П. Зоненшайн, М. И. Кузьмин // Геотектоника. – 1983. – № 1. – С. 28–45.

54. Зоненшайн, Л. П. Глобальная тектоника, магматизм и металлогения / Л. П. Зоненшайн, М. И. Кузьмин, В. М. Моралев. – М.: Недра, 1976. – 231 с.

55. Зоненшайн, Л. П. Палеогеодинамика / Л. П. Зоненшайн, М. И. Кузьмин. – М.: Наука, 1993. – 192 с.

56. Зоненшайн, Л. П. Тектоника литосферных плит территории СССР / Л. П. Зоненшайн, М. И. Кузьмин, Л. Н. Натапов. – М.: Недра, 1990. – Т. 1. – 327 с. – Т. 2. – 334 с.

57. Иванов, А. В. Общий обзор лавинного режима о. Сахалин: сб. Лавины Сахалина и Курильских островов / А. В. Иванов. – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – С. 4–25.

58. Иващенко, А. И. Памятка населению Сахалинской области о по-

рядке действий при землетрясениях / А. И. Иващенко [и др.]. – Южно-Сахалинск, 1993. – 1 с.

59. Информационно-аналитический бюллетень. Нефтегорское землетрясение 27(28). 05. 1995 г. – М.: МЧС, ОИФЗ РАН, 1995. – 236 с.

60. Информационно-аналитический бюллетень. Шикотанское землетрясение 4(5).10.1994 г.: Специальный выпуск. – М.: МЧС, ОИФЗ РАН, 1995. – 136 с.

61. Йодер, Х. Образование базальтовой магмы / Х. Йодер; пер. с англ.; под ред. А. А. Кадика. – М.: Мир, 1979. – 238 с.

62. Казаков, Н. А. К вопросу об исследовании селевых процессов на Курильских островах / Н. А. Казаков // Курильские острова: история, современность, перспективы: тез. докл. научно-практической конференции, посвященной 300-летию освоения Курильских островов русскими людьми. 16–17 декабря 1997 г. – г. Южно-Сахалинск, 1997. – С. 93.

63. Казаков, Н. А. Самоорганизация упорядоченных структур и возникновение солитонов при экзогенных природных процессах / Н. А. Казаков // Ученые записки СахГУ. – Вып. 1. – 2000. – С. 116–125.

64. Кайстренко, В. М. Моретрясения 4 октября 1994 года / В. М. Кайстренко // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. – Т. VIII. Проявление конкретных цунами. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 93–104.

65. Кайстренко, В. М. Нагоны, цунами, волнения / В. М. Кайстренко [и др.]. // Атлас берегов Сахалина. – Владивосток: Дальпресс, 2002. – С. 16–17.

66. Кайстренко, В. М. Проявления цунами 4 октября 1994 года на Шикотане / В. М. Кайстренко [и др.] // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. – Т. VIII. Проявление конкретных цунами. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 55.

67. Като, Э. Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века / Э. Като // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 160–176.

68. Ковалев, П. Д. Технические средства для измерения длинных волн в океане / П. Д. Ковалев // Владивосток: Дальнаука, 1993. – 147 с.

69. Константиновская, Е. А. Тектоника восточных окраин Азии: структурное развитие и геодинамическое моделирование / Е. А. Константиновская. – М.: Научный мир, 2003. – 224 с.

70. Королев, Ю. П. Проявления цунами 4 октября 1994 года на побережье Курильских островов / Ю. П. Королев // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. – Т. VIII. Проявление конкретных цунами. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 74–92.

71. Короновский, Н. В. Влияние космических факторов на геосферы твердой Земли / Н. В. Короновский // Фундаментальные проблемы геотектоники: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 1. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 343–345.

72. Короновский, Н. В. Общая геология: учебник / Н. В. Короновский. – М.: КДУ, 2006. – 528 с.

73. Кособоков, В. Г. Заблаговременный среднесрочный прогноз Шикотанского землетрясения 4 октября 1994 г. / В. Г. Кособоков [и др.] // Инф.-анал. бюлл. Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. – Экстренный выпуск, 1994. – С. 71–73.

74. Косыгин, Ю. А. Тектоника геосфер / Ю. А. Косыгин. – Хабаровск: ДВО АН СССР, 1988. – 96 с.

75. Котелкин, В. Д. Причины цикличности глобальных геодинамических процессов / В. Д. Котелкин, Л. И. Лобковский // Докл. РАН, 1999. – Т. 366. – № 3. – С. 369–371.

76. Красный, Л. И. Опыт систематики глубинных восходящих (фидерных) структур и связанная с ними минерагения / Л. И. Красный // Мантйные плюмы и металлогения: материалы Международного симпозиума. Петрозаводск. – М., 2002. – С. 127–129.

77. Кузнецов, О. Л. Нелинейная геофизика / О. Л. Кузнецов // Вопросы нелинейной геофизики. – М.: ОНТИ ВНИИЯГГ, 1981. – С. 5–20.

78. Кукал, З. Природные катастрофы / З. Кукал. – М.: Знание, 1985. – 240 с.

79. Куликов, Е. А. Регистрация из космоса цунами 26 декабря 2004 г. в Индийском океане / Е. А. Куликов, П. П. Медведев, С. С. Лаппо // ДАН РФ, 2005. – Т. 401. – С. 537–542.

80. Курильские острова: монография / Под ред. Т. К. Злобина, М. С. Высокова. – Южно-Сахалинск: Сахалинское книж. изд-во, 2004. – С. 227.

81. Куркин, А. А. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / А. А. Куркин, Е. Н. Пелиновский. – Новгород: изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та, 2004. – 158 с.

82. Ландер, А. В. Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 г., $M_w 7.6$: предварительные результаты исследования серии афтершоков / А. В. Ландер [и др.] // Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: межд. науч. симпозиум., Южно-Сахалинск, Россия, 27–30 сентября 2007 г.: тез. докл.; отв. ред. И. Н. Тихонов, А. В. Коновалов. – Южно-Сахалинск: Ин-т мор. геологии и геофизики ДВО РАН. – С. 17.

83. Левин, Б. В. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / Б. В. Левин [и др.]; отв. ред. Б. В. Левин, И. Н. Тихонов. – М.: Янус-К, 2009. – 204 с.

84. Левин, Б. В. Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков / Б. В. Левин [и др.] // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 419. – № 1. – С. 118–122.

85. Левин, Б. В. Роль движений внутреннего ядра Земли в тектонических процессах / Б. В. Левин // Фундаментальные проблемы общей тектоники. – М.: Научный мир, 2001. – С. 444–460.

86. Левин, Б. В. Физика цунами и родственные явления в океане: научное издание / Б. В. Левин, М. А. Носов. – М.: Янус-К, 2005. – С. 360.

87. Летников, Ф. А. Синергетика геологических систем / Ф. А. Летников. – Новосибирск: Наука, 1992. – 228 с.

88. Литвин, Е. Н. Метеоцунами на шельфе острова Шикотан / Е. Н. Литвин [и др.] // Мор. гидрофиз. журн. – 2000. – № 1. – С. 38–49.

89. Лобковский, Л. И. Двухъярусная термохимическая модель конвекции в мантии и ее геодинамические следствия / Л. И. Лобковский, В. Д. Котелкин // Проблемы глобальной геодинамики: материалы Теоретического семинара ОГГГН РАН, 1998–1999 гг.; под ред. академика Д. В. Рундквиста. – М.: ГЕОС, 2000. – 246 с. – С. 29–53.

90. Ломтев, В. Л. Особенности тектонических деформаций при Невельском (02.08.2007) цунамигенном землетрясении (М-6,1) / В. Л. Ломтев [и др.] // Проблемы сейсmobезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: междунар. научн. симпоз. Южно-Сахалинск, Россия, 27–30 сентября 2007 г.: тез. докл. / Отв. ред. И. Н. Тихонов, А. В. Коновалов. – Южно-Сахалинск: Ин-т мор. геологии и геофизики ДВО РАН, 2007. – С. 42–43.

91. Магницкий, В. А. О соотношении земной коры с веществом оболочки по геофизическим данным: сб. докладов на МГК, XXI сессия / В. А. Магницкий. – М.: АН СССР, 1960. – С. 32–39.

92. Макаров, П. В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблема моделирования / П. В. Макаров // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 6. – С. 39–56.

93. Макдоналдс, Г. Вулканы / Г. Макдоналдс. – М.: Мир, 1975. – 431 с.

94. Малышев, А. И. Жизнь вулкана / А. И. Малышев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 261 с.

95. Мархинин, Е. К., Абдурахманов А. И. Под боком у вулкана / Е. К. Мархинин, А. И. Абдурахманов. – Южно-Сахалинск: Гермес, 1990. – 38 с.

96. Мельников, О. А. Роль внешних источников (ротационного и космического факторов) в энергетике тектогенеза Земли / О. А. Мельников // Фундаментальные проблемы геотектоники. Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: материалы XL Тектонического совещания. – Т. 2. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 13–18.

97. Методы прогноза землетрясений. Их применение в Японии / Т. Асада, К. Исибаси [и др.]; под ред. Т. Асада; пер. с англ. – М.: Недра, 1984. – 312 с.

98. Милановский, Е. Е. Пульсация Земли / Е. Е. Милановский // Геотектоника. – 1995. – № 5. – С. 3–24.

99. Моралев, В. М. Фазы эндогенной активности Земли в фанерозое и компьютерное моделирование процесса эволюции / В. М. Моралев, Л. Н. Васильев // Изв. вузов. геол. и разведка. – 1999. – № 4. – С. 3–12.

100. Мурти, Т. С. Сейсмические морские волны-цунами / Т. С. Мурти. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 447 с.

101. Нефедов, Л. М. О флуктуациях времени пробега импульса в глубоком море / Л. М. Нефедов // Акустический журнал. – 1974. – 20. – № 4. – С. 645–647.

102. Николаев, Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы / Н. И. Николаев. – М.: Недра, 1988. – 491 с.

103. Николаев, Н. И. О смене идей и парадигм в геологии. Проблема тектоносферы (к 90-летию со дня рождения В. В. Белоусова) / Н. И. Николаев. – М.: ОИФЗ, 1997. – С. 24–40.

104. Новая глобальная тектоника (тектоника плит): сборник статей / Под ред. Л. П. Зоненшайна и А. А. Ковалева. – М.: Мир, 1974. – 471 с.

105. Ньютон, И. Математические начала натуральной философии /

И. Ньютон; пер. с лат. А. Н. Крылова // Собр. трудов акад. А. Н. Крылова. – М.; Л.: изд-во АН СССР, 1936. – Т. 7. – 696 с.

106. Пелиновский, Е. Н. Нелинейная динамика волн-цунами / Е. Н. Пелиновский. – Горький, 1982. – 226 с.

107. Петров, С. П. Современные проблемы атмосферного озона / С. П. Петров, А. Х. Хргиан. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – С. 287.

108. Проблемы нелинейной сейсмики. – М.: Наука, 1987. – С. 288.

109. Происхождение вулканических серий островных дуг / Т. И. Фролова [и др.]. – М.: Недра, 1985. – 275 с.

110. Пушаровский, Ю. М. Линейность и нелинейность в геологии / Ю. М. Пушаровский // Геотектоника. – 1999. – № 3. – С. 42–49.

111. Пушаровский, Ю. М. Нелинейная геодинамика / Ю. М. Пушаровский. – М.: Наука, 1994. – 150 с.

112. Пушаровский, Ю. М. Нелинейная тектоника / Ю. М. Пушаровский, С. Д. Соколов // Фундаментальные проблемы общей тектоники. – М.: Научный мир, 2001. – 520 с. – С. 476–508.

113. Пушаровский, Ю. М. Тектоника и геодинамика мантии Земли / Ю. М. Пушаровский // Фундаментальные проблемы общей тектоники. – Научный мир, 2001. – 520 с. – С. 10–33.

114. Рабинович, А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение / А. Б. Рабинович. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 324 с.

115. Раст, Х. Вулканы и вулканизм / Х. Раст; пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 344 с.

116. Раст, Х. Вулканы и жизнь / Х. Раст. – М.: Мир, 1982. – 344 с.

117. Ребецкий, Ю. Л. Напряженное состояние земной коры западного фланга Зонской субдукционной зоны перед Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 г. ДАН, 2006. / Ю. Л. Ребецкий, А. В. Маринин. – Т. 407. – № 1. – С. 106–110.

118. Региональный каталог землетрясений острова Сахалин, 1905–2005 / Л. Н. Поплавская [и др.]. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН. – 2006. – 104 с.

119. Рикитак, Т. Предсказание землетрясений / Т. Рикитак. – М.: Мир, 1979. – 388 с.

120. Рихтер, Ч. Ф. Элементарная сейсмология / Ч. Ф. Рихтер. – М.: ИЛ., 1963. – 670 с.

121. Рогожин, Е. А. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г.: геологическое проявление и тектоническая позиция очага / Е. А. Рогожин // Инф.-аналит. бюл. Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г. – М.: МЧС. ОИФЗ РАН, 1995. – 236 с. – С. 80–94.

122. Рогожин, Е. А. Шикотанское землетрясение 1994 г.: тектоническая позиция и геодинамические условия / Е. А. Рогожин // Геотектоника. – 1996. – № 1. – С. 33–46.

123. Рудич, К. Н. Каменные факелы Камчатки / К. Н. Рудич. – Новосибирск, 1974. – 174 с.

124. Рэдулеску, Д. П. Вулканы сегодня и в геологическом прошлом / Д. П. Рэдулеску. – М.: Недра. – 255 с.

125. Садовский, М. А. Дискретные иерархические модели геофизиче-

ской среды / М. А. Садовский, В. Ф. Писаренко // Комплексное исследование по физике Земли: ИФЗ – 60 лет. – М.: Наука, 1989. – С. 9–26.

126. Садовский, М. А. О значении и смысле дискретности в геофизике / М. А. Садовский // Дискретные свойства геофизической среды. – М.: Наука, 1989. – С. 3–14.

127. Санина, И. А. Камчатская зона перехода океан – континент по данным сейсмической томографии / И. А. Санина, И. В. Низкоус, Л. И. Гонтовая // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер.: сб. научных трудов ИДГ РАН / Под ред. академика РАН В. В. Адушкина. – М.: ГЕОС, 2005. – 266 с. – С. 70–82.

128. Сейсмическое районирование территории СССР. – М.: Наука, 1980. – 307 с.

129. Сидорин, А. Я. Предвестники землетрясения / А. Я. Сидорин. – М.: Наука, 1992. – 192 с.

130. Смирнова, Н. В. Озоновые полярные «дыры» и среднеширотные аномалии: экспериментальные данные, механизмы образования / Н. В. Смирнова, С. И. Козлов // Прикладная физика. – 1999. – № 6. – С. 40–59.

131. Соболев, Г. А. Основы прогноза землетрясений / Г. А. Соболев. – М.: Наука, 1993. – 313 с.

132. Соколов, С. Д. Бифуркация в геологии / С. Д. Соколов // Вопросы нелинейной геологии и геодинамики. – М.: ГЕОС, 1998. – С. 28–36.

133. Соловьев, С. Л. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана / С. Л. Соловьев, Ч. Н. Го. – М.: Наука, 1974. – С. 309.

134. Соловьев, С. Л. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов / С. Л. Соловьев: В кн.: Проблемы цунами. – М.: Наука, 1968. – С. 7–50.

135. Сорохтин, О. Г. Глобальная эволюция Земли / О. Г. Сорохтин, С. Ушаков. – М.: ГУ, 1991. – 446 с.

136. Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 236 с.

137. Спунгин, В. Г. Иерархия разрывных нарушений и золотое сечение / В. Г. Спунгин, Д. С. Зыков // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения: материалы XII Международной конференции 18–23 сентября 2006 г.: в 2 т. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2006. – Т. II. – 336 с. – С. 175–178.

138. Стейси, Ф. Физика Земли / Ф. Стейси; пер. с англ.; под ред. В. Н. Жаркова. – М.: Мир, 1972. – 342 с.

139. Стрельцов, М. И. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 года на Сахалине / М. И. Стрельцов; под ред. А. И. Иващенко, А. И. Кожурина и Б. В. Левина. – М.: Янус-К, 2005. – 180 с., илл.

140. Сывороткин, В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы / В. Л. Сывороткин. – М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. – 250 с.

141. Тараканов, Р. З. Особенности строения верхней мантии Курило-Японского региона / Р. З. Тараканов // Глубинная структура дальневосточных морей и островных дуг: материалы первого советско-японского симпозиума в г. Находка в октябре 1970 г. Труды СахКНИИ. – Вып. 33. – 1972. – С. 220–228.

142. Тараканов, Р. З. Строение фокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги / Р. З. Тараканов // Земная кора островных дуг и дальневосточных морей. Верхняя мантия. – № 9. – М.: Наука, 1972. – С. 215–234.

143. Тараканов, Р. З. Уроки Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M_w=8,3$) и 13 января 2007 г. ($M_w=8,1$) / Р. З. Тараканов // Вулканология и сейсмология. – 2008. – № 6. – С. 40–55.

144. Теркот, Д. Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред / Д. Теркот, Дж. Шуберт; пер. с англ.: в 2-х ч. – М.: Мир, 1985. – С. 730.

145. Тихий океан / Л. И. Галеркин [и др.]; под. ред. О. К. Леонтьева. – М.: Мысль, 1982. – 316 с. (Природа и ресурсы Мирового океана).

146. Тихонов, И. Н. Динамика сейсмического режима юга Сахалина / И. Н. Тихонов // Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. – Южно-Сахалинск, 1997. – С. 5–20. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. VI.)

147. Тихонов, И. Н. Катастрофические Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. / И. Н. Тихонов [и др.] // Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: Международный научный симпозиум, Южно-Сахалинск, Россия, 27–30 сентября 2007 г.: тез. докл.; отв. ред. И. Н. Тихонов, А. В. Коновалов. – Южно-Сахалинск: Ин-т мор. геологии и геофизики ДВО РАН. – С. 27–28.

148. Тихонов, И. Н. Методы анализа каталогов землетрясений для целей средне- и краткосрочного прогноза сильных сейсмических событий / И. Н. Тихонов. – Владивосток, Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. – 214 с.

149. Трубицын, В. П. Мантийная конвекция с плавающими континентами / В. П. Трубицын, В. В. Рыков // Проблемы глобальной геодинамики: материалы Теоретического семинара ОГГГН РАН, 1998–1999 гг. / Под ред. академика Д. В. Рундквиста. – М.: ГЕОС, 2000. – 246 с. – С. 7–28.

150. Туезов, И. К. Численное моделирование стационарного теплового поля литосферы Охотского моря / И. К. Туезов, В. Д. Епанешников // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1987. – № 7. – С. 94–100.

151. Тяпкин, К. Ф. Вращение Земли – единственный реальный источник энергии ее тектогенеза / К. Ф. Тяпкин, М. М. Добнич // Фундаментальные проблемы геотектоники. Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: материалы XL Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2007. – Т. 2. – 408 с. – С. 395–301.

152. Уломоу, В. И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000: Объяснительная зап. / В. И. Уломоу, Л. С. Шумилина. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 57 с.

153. Федорченко, В. И. Ксенолиты в лавах Курильских островов / В. И. Федорченко, Р. И. Родионова. – Новосибирск: Наука, 1975. – 139 с.

154. Федотов, С. А. Детальные данные о сейсмичности Камчатки и Командорских островов (1965–1968) / С. А. Федотов [и др.] // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 35 – 46.

155. Федотов, С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе. Сейсмическое районирование СССР / С. А. Федотов. – М.: Наука, 1968. – С. 121–150.

156. Хаин, В. Е. Геотектоника с основами геодинамики: учебник / В. Е. Хаин, М. Г. Ломизе. – 2-е изд., исп. и доп. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.

157. Хаин, В. Е. Главные противоречия современной геотектоники и геодинамики и возможные пути их преодоления / В. Е. Хаин // Фундаментальные проблемы геотектоники. Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: материалы XL Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2007. – Т. 2. – 408 с. – С. 324–329.

158. Хаин, В. Е. Крупномасштабная цикличность, ее возможные причины и общая направленность тектонической истории Земли / В. Е. Хаин // Фундаментальные проблемы общей тектоники. – М.: Научный мир, 2001. – 520 с. – С. 403–424.

159. Хаин, В. Е. Общая геотектоника: учеб. пособие для вузов / В. Е. Хаин, А. Е. Михайлов. – М.: Недра, 1985. – 326 с.

160. Хаин, В. Е. Основные проблемы современной геологии / В. Е. Хаин. – М.: Научный мир, 2003. – 348 с.

161. Хаин, В. Е. Планета Земля от ядра до ионосферы / В. Е. Хаин, Н. В. Короновский. – М.: КДУ, 2007. – 244 с.: цв. илл., илл., табл.

162. Хаин, В. Е. Планета Земля: основные черты структуры, динамики и эволюции – глобальный аспект / В. Е. Хаин // Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых: материалы XXXVIII Тектонического совещания. – М.: ГЕОС, 2005. – Т. 2. – 416 с. – С. 309–311.

163. Хаин, В. Е. Тектоника плит: Анализ современного состояния / В. Е. Хаин // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. – 1994. – № 1. – С. 3–10.

164. Чернов, Ю. К. Количественные оценки возможных сейсмических воздействий на северо-востоке о. Сахалин (репринт) / Ю. К. Чернов. – Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВО РАН, 1991. – 54 с.

165. Шебалин, Н. В. Сильные землетрясения. Избранные труды / Н. В. Шебалин. – М.: изд-во Академии горных наук, 1997. – 542 с.: илл.

166. Шевченко, Г. В. Об усилении низкочастотной компоненты цунами на шельфе Курильской гряды / Г. В. Шевченко // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. – Т. VIII. Проявление конкретных цунами. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 145–154.

167. Шейдеггер, А. Е. Физические аспекты природных катастроф / А. Е. Шейдеггер. – М.: Недра, 1981. – 232 с.

168. Шемякин, Е. И. О свободном разрушении твердых тел / Е. И. Шемякин // ДАН СССР. – 1991. – Т. 316. – № 6. – С. 1371–1373.

169. Щетников, Н. А. Цунами / Н. А. Щетников. – М.: Наука, 1981. – 88 с.

170. Юдахин, Ф. Н. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы / Ф. Н. Юдахин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 299 с.

171. Якушова, А. Ф. Общая геология / А. Ф. Якушова, В. Е. Хаин, В. И. Славин; под ред. В. Е. Хаина. – М.: изд-во МГУ, 1988. – 448 с.

172. Abe K. Quantification of tsunamigenic earthquakes by Mt scale // Tectonophysics, 1989. – V. 166. – P. 27–34.

173. Alshits V. I., Darinskaya E. V., Koldaeva M. V., Petrzhik E.A. Magneto-plastic effect in nonmagnetic crystals // In: Dislocations in Solids, 2008. – Vol. 14, Ed.J.P.Hirth. – P. 333–437.

174. Ambraseys, N. N. Data for investigation of the seismic sea-waves in the eastern Mediterranean // Bull. Seiamol. Soc. Am., 1962. – V. 52. – P. 895–913.

175. Battan L. J. The Nature of Violet Storms. Doubleday–Anchor, New York, N.Y., 1961.

176. Bijwaard H., Sparkman W., Engdahl E. R. Closing the gap between regional and global travel time tomography // J. Geophys. Res. 1998. – V. 103. – NB 12. – P. 30055–30078.

177. Chemenda A. I., Mattauer M., Bokun A. N. Continental subduction and a mechanism for exhumation of high-pressure metamorphic rocks: new modeling and field data from Oman // Earth Planet.Sci.Lett, 1996. – V. 143. – P. 173–182.

178. Fisher K. M., Greager K. C., Jordan T. N. Mapping the Tonga slab // J. Geoph. Res. 1990. – Vol. 96. – B. 9. – P. 14.403–14.427.

179. Fujita, T., Satellite and Mesometeorology Research Project, Res. Pap. 91, Univ.Chicago, Chicago, Ill. – 1971.

180. Fukao, Y., Obayashi M., Inoue H., Nenfai M. Subducting slab stagnant in the mantle transition zone // J. Geoph.Res, 1992. – Vol.97. – N 4. – P. 4809–4822.

181. Gutenberg B., Richter C. F. Magnitude and energy of earthquakes // Ann.Geophys. – 1956. – № 9. – P. 1–5.

182. Hanks T., Ramanori H. A moment scale // J. Geophys. Res – 1979. – Vol. 84. – N B5. – P. 2348–2350.

183. Irvine T. N. A global convection framework // Carnegie Inst.Washington Year Book. – 1988. – V. 87. – P. 3–8.

184. Irvine, T. N. Global convection and Hawaiian upper mantle structure // Carnegie Inst. Washington. Year Book. – V. 90. – 1991. – P. 3–11.

185. Molnar, P., Atwater T. The relative motion of hot spots in the mantle // Nature. 1973. – V. 246. – P. 288–291.

186. Morgan, W. J. Convection plumes in the lower mantle // Nature. – V. 230. – 1971. – P. 42–43.

187. Morgan, W. J. Plate motions and deep convection // Geol. Soc. Am. Mem. – V. 132. – 1972. – P. 22.

188. Muayma, Sh. Plume tectonics // Jour. Geol. Soc. – Japan, 1994. – V. 100. – P. 24–49.

189. Murty T. S., Loomis H. G. A new objective tsunami magnitude scale // Mar. Geod. 1980. – V. 4. – P. 267–282.

190. Murty T. S., Seismic Sea Waves – Tsunamic // Bull. Fish. Res. Board Canada 198, 1977. – Ottawa. – 337 p.

191. Nomitsu T., A theory of tsunamis and seiches produced by wind and barometric gradient // Met. Coll. Sci. Imp. Univ. Kyoto 1935 A. – V. 18 (4). – P. 201–214.

192. Paine M. P. Asteroid Impact: The Extra Hazard Due to Tsunami //

Science of Tsunami Hazards, 1999. – V. 17, е 3. – P. 155–166.

193. Smith, A. D., Lewis Ch. Differential rotation of lithosphere and mantle and the driving forces of plate tectonics // Journal of Geodynamics, 1999. – Vol. 28. – № 2/3. – P. 97–116.

194. Solem J. C. Comet and Asteroid Hazard: Threat and Mitigation // Science of Tsunami Hazards, 1999. – V. 17, е 3. – P. 141–153.

195. Soloviev S. L. Recurrence of tsunamis in the Pacific // In: Tsunamis in the Pacific Ocean, edited by W. M. Adams, 1970. – Honolulu: East-West Center Press. – P. 149–163.

196. Titov V. V., Gonzalez F. I., Bernard E. N., et al. Real-Time Tsunami Forecasting: Challenger and Solutions // Nat. Hazards, V.35(1), Special Issue, – U.S.National Tsunami Hazard Mitigation Program, 2005. – P. 41–58.

197. Tsuya, H., Bull. Earthquake Res.Inst., 33(3). – 1955.

198. Van der Hilst R., Engdahl R., Spakman W., Nolet G. Tomographic imaging of subducted lithosphere below northwest Pacific island arcs // Nature, Vol. 353. – 1991. – P. 37–43.

199. Van Dorn W. G. Research on tsunamis. Preprints Internat. Oceanogr. Congr. Washington, 1959. – P. 785–786.

200. Van Dorn W.G. Tsunamis. Contemp. Phys. 9. – 1968. – P. 145–164.

201. Ward S. N., Asphaug E. Asteroid impact tsunami: a probabilistic hazard assessment // Icarus, 2000. – V. 49. – P. 1073–1079.

202. Wilson, J. T. Mantle plumes and plate motions // Tectonophysics, 1973. – V. 19. – P. 149–164.

203. Yong., Richards P. C. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core // Nature, 1996. – V. 382. – № 6588. – P. 221–224.

204. Zlobin T. K., Abdurakhmanov A. I., Zlobin L. M. Deep Seismic Investigations of Mendelev Volcano, South Kuril Islands Geol. Pac. Ocean. – Vol. 14. – 1999. – P. 619–633.

205. Zlobin, T. K. Seismic investigations of deep structure of the Kuril Islands volcanoes // International Conference on Active Volcanoes and Risk Mitigation 1841–1991 jubilee of the Observatorio Vesuviano. Napoli. Italy, 1991. – P. 118.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ВЫРАЖЕНИЙ

Адвекция (в тектонике) – латеральное движение масс мантийного материала, в частности при конвективном течении.

Активный разлом – разлом, по которому в историческое время (голоцен – современная эпоха квартера, начавшаяся 10–12 тыс. лет назад) происходили смещения крыльев или фиксировались землетрясения.

Апвеллинг – поднимающийся кверху поток глубинного вещества в виде мантийной струи или поднимающейся ветви конвективной ячейки.

Асейсмичный район – район, в котором почти не бывает землетрясений.

Астенолит – гипотетическая глубинная структура, представляющая собой горячее и богатое газами тело силикатического состава с относительно высокой температурой. Астенолитом также называют магматическое тело местного плавления.

Астеносфера – слой в верхней оболочке Земли, выделяемый на основе реологических свойств. Астеносфера (по-гречески) – слабая сфера, то есть с пониженной твердостью, прочностью и вязкостью. Это слой, подстилающий литосферу и характеризующийся низкими скоростями и значительным затуханием сейсмических волн. Слой мягкий, вероятно, частично расплавленный. Он способен к вязкому и пластичному течению. Термин ввел Барелл в 1914 году. Астеносферный слой является волноводом. Вязкость -4×10^{19} Па·с.

Астрономическая единица (а. е.) – расстояние равное $1,496 \cdot 10^{11}$ м, или 150 млн. км.

Астролема – древние кратеры, предположительно относимые к метеоритным, которых называют «звездные шрамы». В России к этой категории принадлежит Попигайская астролема на севере Сибири с поперечником около 100 км.

Афтершок – последующий толчок, возникающий в ограниченном объеме литосферы после сильнейшего в данной серии землетрясения.

Бифуркация – согласно В. И. Арнольду, означает раздвоение, в частности возникновение двух режимов возможного протекания процесса при изменении управляющих параметров (синоним в математике – ветвление, в тектонике – виргация). Бифуркация употребляется для обозначения всевозможных качественных перестроек или метаморфоз различных объектов при сравнительно небольших изменениях параметров, от которых они зависят.

Вулкан – отверстие или место в земле, из которого расплавленная порода или газ (или вместе) поступают на поверхность из недр. Действующие вулканы – вулканы, извергавшиеся в историческое время.

Вулканические землетрясения – землетрясения, связанные с вулканической деятельностью, например подъемом магмы.

Геодинамика – по определению В. Е. Хаина, научная дисциплина, призванная освещать методами геофизики, математического и физического моделирования характер и закономерности течения процессов, определяющих эндогенную (внутреннюю) активность и структурные преобразования Земли в целом. Обычно под геодинамикой понимают механику глобальных процессов в Земле. В узком плане можно говорить, что эта наука изучает движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии и ядре, а также причины таких деформаций и возникновения структур. Однако она связана, в свою очередь: а) с тепловыми; б) физико-химическими; в) электромагнитными явлениями. Внутренняя динамика земных недр на поверхности проявляется через сейсмичность, вулканизм, изостатическое состояние, вариации магнитного и гравитационного полей, а также через распределение земного тепла в верхних зонах земной коры. Динамика Земли в более широком смысле – это наука, изучающая процессы, происходящие в Земле. Предметом ее исследований являются также геофизические (физические и энергетические) поля Земли и их изменения.

Геоид – воображаемая уровенная поверхность, по отношению к которой сила тяжести повсеместно направлена перпендикулярно. Лучше всего геоид соответствует такому геометрическому телу, как трехосный сфероид, то есть сжатый эллипсоид вращения. В общем, Земля подобна шару, сплюснутому с полюсов. Поэтому при среднем радиусе Земли 6371,032 км ее экваториальный радиус равен 6378,160 км, а полярный – 6356,777 км. Полярное сжатие $a=1/298,25$.

Геосинклинали, геосинклинальные пояса – протяженные прогибы, выполненные мощными толщами осадков и вулканических пород.

Геосферы, или земные оболочки, – элементы слоистой макроструктуры Земли, обладающие центральной симметрией. По определению В. И. Вернадского [1954], это «более или менее правильные концентрические слои, охватывающие всю Землю, меняющиеся с глубиной, в вертикальном разрезе планеты, и отличающиеся друг от друга, характерными для каждой, только ей свойственными, особыми физическими, химическими и биологическими свойствами».

Геотектоника – наука о структуре, движениях, деформациях и развитии земной коры и верхней мантии (тектоносферы) в связи с развитием Земли в целом.

Геотермический градиент – изменение температуры с глубиной.

Геотермическая ступень – интервал глубины в метрах, в котором температура повышается на 1°C .

Гипоцентр (фокус или очаг землетрясения) – место, в котором при землетрясении начинается процесс выделения сейсмической энергии и вспарывание сейсморазрыва.

Годограф – график зависимости времени (t) от расстояния (x). Годограф бывает поверхностный и линейный.

«**Горячие точки**» – горячие струи глубинного вещества, идущие от ядра.

Грабен – прогиб земной коры, ограниченный нормальными сбросами.

Гравиметр – прибор для измерения силы тяжести.

Глубоководные желоба – узкие глубоководные впадины Мирового океана.

Гравитация (от латинского *gravitas*) – тяжесть, то же, что и тяготение.

Гравиметрия – измерение силы тяжести, то есть изучение гравитационного поля Земли, его пространственное изменение с целью определения фигуры Земли, исследования ее внутреннего строения и др.

Граница Конрада – поверхность второго, гранулит-базитового (ранее – «базальтового») слоя земной коры, граничная скорость упругих сейсмических волн вдоль которого составляет 6,6–7,2 км/с.

Гутенберга слой (канал) – зона пониженной скорости (канал) в верхней мантии на глубинах от 50–100 до 200–300 км.

Даунвеллинг – погружающийся поток мантийного вещества в опускающейся части конвективной ячейки.

Деформация – изменение формы тела под влиянием приложенной силы.

Делювий (смываю) – осадочные отложения, слагающие склоны.

Диапир – куполообразная антиклинальная складка, связанная с внедрением вязкой магмы, соли или глины.

Дивергенция (в плиттектонике) – расхождение литосферных плит.

Дилатансия (в горных породах) – увеличение объема пород, связанное с теми или иными упругими и неупругими изменениями. В механике разрушения особо выделяют дилатансию (разрыхление), происходящую в условиях сдвига.

Дипфидерные структуры (от англ. – *deepfeeders*) – глубокий канал питания мантийного вещества.

Дислокации пликативные – деформации, приводящие к изгибу слоев горной породы разного масштаба и формы, то есть образованию складок.

Дислокации разрывные (дизъюнктивные) – тектонические нарушения или разломы, связанные с перемещением, как правило, одного из их крыльев по вертикали или горизонтали.

Длина волны – расстояние между соседними экстремумами (гребнями или впадинами волны). Длины сейсмических волн, излучаемых в очагах землетрясений, как правило, несколько километров. Период волн при землетрясениях составляет величину от 0,1 секунды до нескольких часов (в основном одна секунда).

Длительность сильных колебаний (условная) – интервал времени между первым и последним пиками сильных колебаний грунта, имеющими амплитуду выше определенного значения.

Землетрясение – приход на поверхность Земли упругих колебаний, вызванных, в свою очередь, мгновенным смещением масс пород и внезапным высвобождением потенциальной энергии недр. Дословно – трясение земли. В сейсмологии – колебания земли, вызываемые прохождением сейсмических волн.

Земная кора – верхняя твердая оболочка Земли, располагающаяся выше границы Мохоровичича (обозначаемая для краткости – М). Залегает в литосфере, от которой отделяется скачком скорости распространения упругих волн с 6,5 – 7,7 до 8,0 – 8,2 км/с.

Земные приливы – периодические деформации твердого тела Земли под действием гравитационных полей Солнца и Луны.

Изосейсты – линия равных сотрясений, то есть линии, соединяющие точки с одинаковой интенсивностью землетрясения и разделяющие области с различным уровнем интенсивности.

Интенсивность землетрясений – мера сотрясения грунта, определяемая степенью разрушения построенных людьми зданий, характером изменения земной поверхности и ощущениями людей при землетрясениях. Шкала интенсивности или баллов основана на макросейсмическом описании результатов разрушения от землетрясений. В России принята 12-балльная шкала MSK-64, которая близка шкале Меркали, принятой в США и странах Европы. В Японии принята 12-балльная шкала JMA (шкала Японского метеорологического общества); соотношение между шкалами устанавливается на основании опыта. Например, землетрясение в Кобе

в январе 1995 года сопровождалось колебаниями с интенсивностью до двенадцати баллов JMA или до десяти баллов шкалы MSK-64.

Изостазия (статис – равновесие) – состояние равновесия масс земной коры и верхней мантии. Происходит обычно в интервале глубин 100–150 км.

Импактный кратер – ударный кратер на поверхности Земли, образованный при падении метеоритов.

Конвекция – передвижение масс жидкости или газа, а также перенос ими тепла в условиях различия плотности и (или) температуры в разных областях объема жидкости или газа. При стационарной конвекции движение происходит по замкнутым линиям, образующим конвективные ячейки.

Катаклизм (от греческого *kataklysmos* – наводнение, потоп) – разрушительный переворот, катастрофа.

Катастрофа (из греческого *katastrophe* – поворот, переворот) – внезапное бедствие, событие с тяжелыми последствиями. По А. Е. Шейдеггеру, это следствие нарушения стабильного состояния системы в определенном месте и в определенное время. Катастрофа – это событие, приведшее к гибели людей и (или) нанесшее значительный материальный ущерб.

Коллювий (скопление) – продукты выветривания, смещенные вниз по склону под влиянием силы тяжести.

Конвергенция [*convergentio*] – схождение литосферных плит в новой глобальной тектонике.

Кометы – это небольшие космические тела, движущиеся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам, то приближаясь к Солнцу, то удаляясь за пределы орбиты Плутона.

Крип (от английского *creep* – ползучесть) – проявления ползучести в конкретных блоках или на активных разломах, в результате которых разрядка напряжений происходит плавно, без сейсмогенных разрывов. Скорости поддвижек при крипе, как правило, выше обычных тектонических, но меньше сейсмических на много порядков.

Лава – магма, излившаяся на земную поверхность.

Лахар – грязевой поток на склоне вулкана.

Литология – наука о составе, структурах, текстурах и генезисе осадочных пород.

Литосфера – слой в верхней оболочке Земли, выделяемый на основе реологических свойств. Термин «литосфера» был введен в начале нашего

века и определялся как верхняя сравнительно холодная и хрупкая оболочка Земли, обладающая длительной прочностью на разрыв и скалывание. Литосфера – каменная оболочка мощностью от 75 до 300 км, залегающая над астеносферой. Мощность литосферы под океанами составляет около 50–60 км, под континентами – 100–200 км. В среднем мощность литосферы – 90 км. Под Охотской глубоководной котловиной кровля литосферы залегает на глубине до 30 км.

Лява волны – сейсмические поверхностные волны, при распространении которых происходит только горизонтальное смещение частиц перпендикулярно направлению движения волны. Волны поляризованы в горизонтальном направлении.

Лява числа – описывают земные приливы. Числа **h**, **k**, **l** означают: **h** – отношение высоты земного прилива к высоте соответствующего океанического прилива на поверхности; **k** – отношение дополнительного потенциала, образовавшегося в результате этой деформации к искажающему потенциалу; **l** – отношение горизонтального смещения коры к смещению соответствующего океанического прилива.

Магнитуда – это логарифм отношения максимальных амплитуд волн данного землетрясения к амплитудам таких же волн стандартного землетрясения на стандартном расстоянии 100 км. Магнитуда определяется по максимальной амплитуде колебаний, записанных на сейсмограмме, снятой на расстоянии 100 км от эпицентра (если расстояние другое, то вносится поправка). Различают три вида магнитуды: магнитуду Рихтера (локальную) – *ML*, магнитуду по объемным продольным волнам (*mb*) и магнитуду по поверхностным волнам (*Ms*). Шкала магнитуд – экспоненциальная. Она пропорциональна логарифму максимальной амплитуды смещению частиц почвы. Наиболее крупные землетрясения характеризуются магнитудой от 6 до 8,3–8,4. Оценка силы землетрясений в магнитудах более объективна, чем в баллах шкалы интенсивности. Это объясняется следующим. Шкала интенсивности основана на макросейсмическом описании результатов разрушений от землетрясений. Поэтому степень разрушения построек (основной критерий этой шкалы) зависит не только от количества выделенной энергии, но и ряда других факторов, таких, как глубина очага, устойчивость грунта, его водонасыщенность, качество построек.

Магма – расплавленная порода, не достигшая поверхности Земли.

Мантийная конвекция – тепловая конвекция в мантии, вызывающая в результате разности температур в недрах движение глубинного вещества в конвективных ячейках.

Мантия Земли – наибольшая по объему часть земных недр, расположенная между корой и ядром Земли на глубинах от 40 до 2900 км. Составляет из плотных силикатных пород.

Мезосфера – нижний слой верхней мантии, называемый слоем Голицына. Мезосфера включает в себя и подастеносферные низы верхней мантии.

Метаморфическая порода – это порода, измененная под воздействием температуры, давления.

Метеориты – это каменные или железные округло-угловатые обломки, выпадающие иногда на поверхность планет и нередко оставляющие на них след в виде ударных (импактных) кратеров.

Миграция землетрясений – закономерное перемещение гипоцентров землетрясений в пространстве и во времени, количественно характеризуемое величиной скорости и направлением.

Микросейсмы – слабые, почти непрерывные сейсмические волны, образующие сейсмический фон или шумы Земли. Обнаруживаются только с помощью сейсмографов. Они вызываются морским прибоем, океанскими волнами, ветром, деятельностью человека.

Напряжение (упругое) – мера сил, действующих внутри или на поверхности тела, взаимодействующего с другими физическими объектами (телами или полями); измеряется в единицах силы, деленных на единицу площади.

Нутация – колебания угла наклона оси собственного вращения твердого тела. Нутация возникает одновременно с собственным вращением и прецессией тела, вращающегося вокруг неподвижной точки.

Островные дуги – горные сооружения, выступающие над уровнем моря своими вершинами (островами). Характерный пример – Курильская островная дуга протяженностью около 1250 км.

Очаг землетрясения – область, в которой при землетрясении выделяется сейсмическая энергия. А. Е. Шейдеггер определил очаг тектонического землетрясения как разлом в земной коре, по которому происходит мгновенная поддвижка. В. И. Мячкин, учитывая представления сейсмологии о механике разрушения, очаг тектонического землетрясения определил как «динамически движущийся разрыв непрерывного материала Земли, возникающий под действием напряжений, накопленных в процессе сдвиговых тектонических деформаций». Существует много способов определения границы очага землетрясения: по форшокам и афтершокам, макросейсмическим данным, изосейстам, данным о цунами и т. д. По-видимому, с наибольшей точностью границу очага оказывается возможным провести для класса сильнейших землетрясений по афтершокам первого года.

Парадигма (от греч. *paradeigma* – пример, образец) – теория или модель постановки проблем, принятая в качестве образца решения исследовательских задач. В философии – исходная концептуальная схема, мо-

дель постановки проблем и их решения методами исследования, господствующими в течение определенного исторического периода в научном сообществе. Смена парадигмы представляет собой научную революцию.

Петрология – наука, изучающая состав и генезис магматических и метаморфических пород.

Петрофизика (петрос – камень) – наука о физических свойствах горных пород, является частью геофизики.

Планетезимали – газ, покидающий Солнце вследствие мощных приливов, вызванных проходящей звездой, а затем концентрирующийся в небольшие скопления, далее слипающиеся в астероиды и планеты по теории Ф. Мультона и Т. Чемберлена.

Плейстосейстовая область – область максимальных сотрясений, то есть область сильных колебаний и значительных разрушений при землетрясении. Размеры плейстосейстовой области наиболее сильных землетрясений в значительной степени зависят от региона. Так, в Средней Азии и на Кавказе их протяженность составляет первые десятки, тогда как на Курилах, Камчатке и Японии – первые сотни километров.

Плита, литосферная плита (в концепции тектоники плит) – крупный жесткий сегмент литосферы Земли, перемещающийся относительно других плит. Перемещение плит, которые подобно панцирю покрывают планеты; изучает геотектоника. Самая крупная плита – Тихоокеанская, площадь которой достигает 1/3 поверхности планеты. Почти все сильнейшие землетрясения происходят на окраинах Тихого океана или в так называемом Тихоокеанском сейсмическом кольце, включающем и вулканическое «огненное» кольцо.

Плюм (от англ., исп. *plume*) – перо. Под ними понимаются ответвления, то есть как бы «перья» глубинных потоков вещества. Плюмы являются грибообразными расширениями горячих струй, идущих от ядра, названных горячими точками.

Поверхностные волны – волны, которые распространяются только по поверхности Земли и возникают при падении на свободную поверхность Земли продольных (Р) и поперечных (S) сейсмических волн. Они характеризуются пониженными скоростями, большой интенсивностью, низкочастотным спектром, быстрым затуханием с глубиной, длительными во времени колебаниями. Скорости поверхностных волн меньше скорости поперечных волн. Существует два типа поверхностных волн – волны Лява и Рэлея.

Поверхность Мохоровичича (Мохо, или М) – раздел между земной корой и верхней мантией, установленный впервые югославским сейсмологом А. Мохоровичичем в 1908 году. Характеризуется скачком скорости упругих волн от 7,9 до 8,3 км/с, в основном – 8,0–8,2 км/с.

Ползучесть – способность горной породы к медленным пластическим деформациям под воздействием напряжений, меньших разрушающего. Реализация этой способности (см. крип) может обеспечить частичную разрядку напряжений.

Поперечные (S) волны – сейсмические волны, распространяющиеся медленнее, чем продольные (Р), примерно в 1,7 раза. Колебания происходят в плоскостях, ортогональных (перпендикулярных) направлению распространения волны. Поперечные волны не проходят через жидкость, в том числе внешнее ядро Земли.

Прецессия – движение оси собственного вращения твердого тела, вращающегося около неподвижной точки.

Прогноз землетрясений – предсказание времени, места и силы (магнитуды) землетрясения; характера сильных колебаний грунта и оценка вероятности предсказываемого события. В зависимости от продолжительности прогноз может быть оперативным (минуты–часы), краткосрочным (дни–недели), среднесрочным (месяцы) и долгосрочным (годы). Сейсмическое районирование основано на прогнозе магнитуд сильных землетрясений.

Продольные (Р) волны – наиболее быстрые волны сжатия и растяжения, которые распространяются вдоль сейсмического луча и проходят через все среды.

Процесс (*processus* – продолжение) – 1) последовательная смена явлений, состоящая в развитии чего-либо со временем; 2) совокупность последовательных действий для достижения какого-либо результата.

Процессы экзогенные (поверхностные) – геологические процессы на поверхности Земли и в верхней части земной коры. Обусловлены главным образом энергией солнечной радиации, силой тяжести и жизнедеятельностью организмов. К ним относятся выветривание, перемещение отложений на склонах под действием силы тяжести, стекающей воды, ледников и ветра; образование осадочных пород и некоторых типов месторождений полезных ископаемых.

Процессы эндогенные (глубинные) – геологические процессы, вызванные в основном внутренними силами Земли и происходящие внутри нее.

Радиоактивность – самопроизвольное превращение неустойчивых атомных ядер в ядра других элементов, сопровождающееся ядерным излучением.

Разведочная геофизика – комплекс геофизических методов, предназначенных для поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, включающий сейморазведку, гравиразведку, магниторазведку, электроразведку, радиометрию, геотермию.

Разлом (разрыв) – разрыв горных пород со смещением крыльев. Величина смещений по разрывам может быть от нескольких сантиметров до 50–100 км (на внутренних склонах глубоководных желобов). При Нефтегорском землетрясении видимые на поверхности горизонтальные смещения достигали шести, а вертикальные – двух метров.

Районирование сейсмическое – разделение территории на районы разной сейсмической опасности или сотрясаемости. При проведении сейсмического районирования учитываются результаты обследования последних известных землетрясений, расположение гипоцентров землетрясений разной силы, статистические сведения о повторяемости землетрясений определенных энергетических классов, сведения о тектоническом и геоморфологическом строении. Для каждого района указывается интенсивность возможных землетрясений, которая оценивается обычно по 12-балльной шкале MSK-64 или др.

Редукции силы тяжести – поправки, с помощью которых нормальные значения силы тяжести приводятся к условиям наблюдения.

Реология – наука, изучающая процессы, связанные с остаточной деформацией и течениями вязких и пластичных материалов.

Рефракция – распространение (проникновение в слой) волн по криволинейным траекториям вследствие возрастания в слое скорости с глубиной.

Рифты (англ. *rift* – расселина, ущелье) – линейно вытянутые на несколько сот км (нередко свыше 10 000 км) щель или ров шириной 30–70 км. Известны в океанах и на континентах. Обычно возникают на сводах и поднятиях благодаря растяжению земной коры.

Рой землетрясений – серия землетрясений, происходящих в одном и том же районе; ни одно из землетрясений роя не выделяется среди других по величине.

Рэлея волны – сейсмические поверхностные волны, при распространении которых частицы совершают колебания только в вертикальной плоскости.

Сброс – опускание блока (слоя) горной породы по вертикальной или наклонной поверхности смещения (сместитель).

Сейсмические волны – упругие волны, возникающие в результате землетрясений, взрывов, ударов и распространяющиеся в виде затухающих колебаний в Земле.

Сейсмический момент – произведение модуля сдвига горных пород на площадь разрыва и амплитуду смещения. Мера величины землетрясения. По А. Е. Шейдеггеру, это механическое перемещение точечного источника, равное величине смещения вдоль разлома.

Сейсмический процесс – подготовка и возникновение землетрясений в определенном объеме геологической среды, находящейся в напряженно-деформированном состоянии.

Сейсмичность – это проявление землетрясений, распределение их во времени и в пространстве. Сейсмичность характеризуется распределением землетрясений по площади, повторяемостью землетрясений разной силы, характером разрушений и деформаций, площадью разрушений, а также связью землетрясений с геологическим строением.

Сейсмограф – прибор для записи движений земной поверхности, вызываемых сейсмическими волнами.

Сейсмогенные (сейсмоактивные) смещения блоков и разрывы – смещения в земной коре и верхней мантии, происходящие в результате землетрясений.

Сейсмология – наука о землетрясениях.

Сейсмоскоп – простой сейсмограф, записывающий без марок время.

Сель – по-арабски бурный поток; в Европе селевый поток называют мур.

Синергетика (от греч. *synergētikos* – совместный, согласованно действующий) – научное направление, изучающее связи между элементами структуры (подсистемами), которые образуются в открытых системах.

Спрединг – раздвиг океанического дна, расширение ложа и его разрастание (согласно концепции тектоники плит).

Сейсмология – наука о землетрясениях.

Сейсмотектоника – раздел геофизики, изучающий связь проявлений сейсмичности и тектоники регионов, тектонические обстановки и причины возникновения землетрясений. Сейсмические показатели используются для характеристики степени устойчивости геотектонических режимов, определения зон контрастных тектонических движений, выявления доминирующих направлений подвижек. По глубине расположения очагов землетрясения, группирующихся в зоны и линии определенного простирания, судят о глубине заложения разрывов. Динамические параметры очагов дают сведения о величине и направлении сил, которые деформируют и разрушают горные породы. Результаты сейсмотектонических исследований отражают тектонические структуры и данные о землетрясениях (количество, частоту, силу, сейсмотектонические деформации, фокальные механизмы).

Сейсмофокальная зона (Беньофа–Вадати–Заварицкого) – зона концентрации землетрясений в узкой полосе, наклонно погружающаяся в мантию.

Слэб (от англ. *slab*) – в тектонике принято обозначать погружающуюся литосферную плиту (в зонах субдукции).

Солнце – ближайшая к нам и самая важная для нашей жизни звезда, центральное тело Солнечной системы, раскаленный плазменный шар. Тип Солнца как звезды – карлик спектрального класса G2.

Солнечная постоянная (равна $1370 \text{ Вт/м}^2 \text{ С. П.}$) – это суммарный поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению лучей и находящуюся вне земной атмосферы на расстоянии 1 а. е. (астрономической единицы) от Солнца.

Солнечный ветер – поток ионизированных частиц, вырывающихся из короны и уносящих с собой заметную часть энергии Солнца.

Солнечные вспышки – самое мощное проявление солнечной активности. Это внезапное местное выделение энергии магнитных полей в короне и хромосфере Солнца (до 10^{25} Дж при наиболее сильных С. в.).

Статика – раздел механики, изучающий условия равновесия тел под действием сил. При этом различают, например, статику твердых тел, статику жидкостей (гидростатику) или статику газов (аэростатику).

Структурные элементы Земли – континенты, океаны, литосферные плиты. Среди океанических структур I порядка выделяют срединно-океанические хребты, океанические плиты, на континентах – платформы, щиты, орогены (горные сооружения), прогибы и др.

Субдукция – погружение литосферной плиты, например Тихоокеанской океанической плиты под континентальную Евразийскую.

Сферы Земли – внутреннее ядро (6370–5100 км), внешнее ядро (5100–2900 км), нижняя мантия (2900 – 670 км), верхняя мантия (от 670 до 5–70 км) и земная кора (5–70 км). В последние годы кроме верхней и нижней мантии выделяют также и среднюю мантию. Ю. М. Пуцаровский относит к верхней мантии толщу от подошвы земной коры до 670 км, на глубине 670–1700 км выделяет разделы, связанные с переходным слоем, а к глубинам 840–1700 км относит среднюю мантию. После нее выделяют разделы на глубинах 1700–2200 км, и ниже 2200 км залегает нижняя мантия.

Тайфун (от китайского «*тай фын*» – большой ветер) – тропический циклон, зародившийся над акваториями Юго-Восточной и Восточной Азии.

Тепловой поток – обозначается буквой q и равен произведению коэффициента теплопроводности χ на градиент температуры ΔT , то есть ($q = \chi \Delta T$). В геотермике используются следующие единицы для измерения теплового потока: $1 \text{ кал/}(\text{см}^2 \cdot \text{с}) = 4,19 \text{ Вт/см}^2 = 4,19 \times 10^4 = \text{Вт/м}^2$. Одна единица теплового потока (1 е. т. п.) равна $1 \text{ мккал/}(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

Тектоника (от греческого *tectonic* – строительство) – наука, изучающая структуру земной коры и верхней мантии (тектоносфера) и закономерности ее формирования.

Тектоника литосферных плит (плейттектоника) – теория образования, движения и взаимодействия литосферных плит Земли; с ее помощью пытаются объяснить землетрясения, вулканическую деятельность и горообразование как следствие крупных горизонтальных перемещений.

Тектонические движения – процесс деформации больших объемов горных пород во внешней части Земли, происходящих под действием возникающих в Земле сил.

Тектонические землетрясения – землетрясения, возникающие при поддвижках блоков земной коры и верхней мантии по разломам.

Тектоносфера – верхняя часть твердой оболочки Земли глубиной до 700–900 км, где происходят тектонические процессы.

Тектонофизика – наука, изучающая деформации путем восстановления полей тектонических напряжений по данным структурного анализа, геокартирования, моделирования.

Тефра – вулканические бомбы, лапилли (диаметр обломков размером от 0,25 до 6,4 см) и пепел.

Шкала Рихтера – классификация землетрясений по значениям максимальной амплитуды записи. Шкала логарифмическая.

Физика Земли – раздел физики, изучающий строение Земли и процессы, происходящие в ее оболочках.

Физика очага землетрясений – изучает особенности поведения горных масс в земных недрах, происходящие во время землетрясений.

Физические свойства горных пород – плотность, сжимаемость, магнитная восприимчивость, остаточное намагничивание, электропроводность, теплопроводность, теплоемкость, скорость продольных и поперечных волн.

Форшоки – относительно слабые сейсмические толчки, предшествующие сильнейшему из серии землетрясению. Они бывают менее чем в 50 % случаев, в отличие от афтершоков, сопровождающих всегда мощное землетрясение.

Хромосфера – слой атмосферы между фотосферой и короной. Толщина хромосферы – около 10 тыс. км. Характерна значительная неоднородность температуры – 5–15° тыс. К.

Циклон (от греческого *kyklōn* – кружащийся) – это область пониженного давления в атмосфере с минимумом в центре [Большой..., 1991]. Он вращается против часовой стрелки в Северном полушарии, в Южном – наоборот. Диаметр – несколько тысяч км, скорость поступательного движения – около 60 км/час.

Цунами – слово японского происхождения. Дословно означает большая волна в гавани. Цунами – это длиннопериодные гравитационные волны в океане, возникающие главным образом в результате сдвига вверх или вниз протяженных участков морского дна при подводных и прибрежных землетрясениях. Скорость распространения цунами – от 50 до 1000 км/час; высота в области возникновения – от 0,1–5 до 10–50 м и более у побережий. В основном в открытом океане их высота составляет около двух метров.

Ураган (фр.) – это тропический циклон (см. тайфун), скорость ветра в котором более 35 м/с.

В разных частях света тропические циклоны называются по-разному: ураган, хурикан или циклон – в Америке, Атлантике, Карибском бассейне; циклон – в Бенгальском заливе; уилли-уилли – в Австралии и Океании и багио – на Филиппинских островах.

Чандлеровские колебания (движения) – это свободные 14-месячной периодичности нутации Земли.

Энергия (от греческого *energeia* – действие, деятельность) – общая количественная мера различных форм движения материи.

Эпицентр землетрясения – проекция на земную поверхность гипоцентра.

Эклиптика – круг небесной сферы, по которому происходит видимое годичное движение Солнца. Эклиптика пересекается с небесным экватором в точках весеннего и осеннего равноденствия. Плоскость эклиптики наклонена к плоскости небесного экватора под углом $23^\circ 27'$ мин.

Экструзии – магматические тела, возникшие в результате выжимания вязкой лавы на земную поверхность в виде куполов. Также это тип извержения, свойственный вулканам с вязкой лавой.

Ядро Земли – центральная часть Земли глубже 2900 км. Радиус планеты – 6378 км. Предполагается, что оно состоит из железа и силикатов, в основном железоникелевое. Внешняя часть ядра (на глубинах от 2900 до 5100 км) находится в расплавленном состоянии, а внутренняя (глубина более 5100 км) – в твердом.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 1. Процессы и динамика Земли, природные катастрофы и их виды	
1.1. Процессы и динамика Земли	7
1.2. Основные сферы Земли, структуры, процессы и иерархия геодинамических систем	10
1.3. Фрактальность и градации систем	14
1.4. Природные катастрофы, их классы и виды.	17
Глава 2. Глубинные и глобальные процессы, динамика планеты и ядра, связь с ними природных катастроф	
2.1. Динамика глубинных процессов и ядра Земли	21
2.1.1. Динамика глубинных процессов.	21
2.1.2. Глобальная геодинамика	22
2.1.3. Динамика ядра	40
2.1.4. Магнетизм, электропроводность Земли и их связь с динамикой ядра	43
2.1.5. Срыв электрических токов на ядре и инверсия магнитных полюсов Земли	48
2.2. Глобальные природные катастрофы, связанные с динамическими процессами планеты и ядра.	49
2.2.1. Изменение глобальных параметров Земли	49
2.2.2. Глобальные изменения климата	51
2.2.3. Погружение или поднятие морских побережий	52
2.2.4. Изменение направлений морских течений	52
Глава 3. Процессы и динамика глубинных геосфер (мантии и земной коры) и связанные с ними природные катастрофы	
3.1. Эндогенные процессы в литосфере	57
3.2. Землетрясения	66
3.2.1. Землетрясения: общие понятия.	68
3.2.2. Прогноз и предвестники землетрясений	76
3.2.3. Меры защиты при землетрясениях	85

3.3. Природные катастрофы, связанные с извержением вулканов и меры защиты	95
3.3.1. Основные сведения о вулканах и их извержениях	95
3.3.2. Строение вулканов и их структурно-генетические типы. . .	96
3.3.3. Меры активной защиты от вулканических извержений . . .	102
3.3.4. Меры пассивной защиты	106
3.3.5. Предсказания извержений вулканов	107

Глава 4. Динамика верхней части земной коры, экзогенные процессы и связанные с ними природные катастрофы

4.1. Внешние оболочки Земли	109
4.2. Экзогенные процессы в верхней части земной коры.	110
4.3. Экзогенные катастрофы, связанные с гравитационными процессами.	110
4.3.1. Виды гравитационных процессов и причины связанных с ними экзогенных катастроф.	110
4.3.2. Собственно гравитационные процессы	111
4.3.3. Водно-гравитационные процессы	111
4.3.4. Гравитационно-водные процессы	112
4.3.5. Подводно-гравитационные процессы.	113
4.3.6. Меры борьбы с гравитационными явлениями.	113
4.3.7. Меры борьбы с селевыми потоками	114
4.4. Катастрофы, связанные с лавинами	114
4.4.1. Общие данные о катастрофах, связанных с лавинами . . .	114
4.4.2. Особенности лавин на Сахалине и Курилах.	114
4.4.3. Механизм лавин	116
4.4.4. Защита от лавин	118
4.5. Катастрофы на дне океана.	118

Глава 5. Процессы в гидросфере и связанные с ними природные катастрофы

5.1. Общие сведения	119
5.2. Цунами	119
5.2.1. Общие сведения	119
5.2.2. Причины возникновения цунами	124
5.2.2.1. Землетрясения.	125
5.2.2.2. Вулканы	127
5.2.2.3. Оползни	128
5.2.2.4. Ледники	129
5.2.2.5. Атмосферные процессы, вызывающие метеоцунами	129

5.2.2.6. Космогенные цунами (падение космических тел) . . .	130
5.2.3. Последствия цунами	131
5.2.4. Меры защиты от цунами	135
5.2.4.1. Активные меры защиты	135
5.2.4.2. Меры защиты в случае невозможности своевременной эвакуации.	135
5.2.4.3. Действия после цунами	136
5.2.4.4. Действия на море	136
5.2.4.5. Меры пассивной защиты от цунами.	136

5.3. Моретрясение	141
5.4. Волны-убийцы	142
5.5. Штормовые нагоны	144
5.6. Наводнения, паводки	145

Глава 6. Динамика атмосферы и связанные с ней процессы

6.1. Глобальная циркуляция и основные атмосферные явления	148
6.2. Циклоны: общие сведения	151
6.2.1. Причины возникновения тропических циклонов	153
6.2.2. Распределение циклонов	154
6.2.3. История, предупреждение и защита	155
6.2.4. Защита от циклонов	156
6.3. Торнадо	157
6.3.1. Общие сведения о торнадо	157
6.4. Пыльные бури	158
6.4.1. Общие сведения	158
6.4.2. Предупреждение и защита.	159

Глава 7. Энергия природных процессов и катастроф, синергетика и нелинейная динамика

7.1. Источники энергии геодинамических процессов и катастроф, их градации по силе, продолжительности, частоте, периодичности и бифуркации.	160
7.1.1. Источники энергии геодинамических процессов и основных природных катастроф (землетрясений, извержений вулканов, цунами, вихрей) . .	161
7.1.2. Периодичность, продолжительность, случайность и закономерность катастроф, бифуркация. . .	172
7.2. Синергетика и нелинейная динамика	177

Глава 8. Катастрофы, связанные с процессами и явлениями в атмосфере, ионосфере, околоземном пространстве и космосе

8.1. Озоновые дыры	180
8.2. Инверсия магнитных полюсов	183
8.3. Происхождение Солнечной системы и планеты Земля	186
8.4. Падение небесных тел и их столкновение с Землей	188
8.5. Глобальная катастрофа (конец света).	192
Заключение	195
Список литературы.	198
Словарь терминов и выражений	211