

ЗЕМЛЯ

Н. В. Короновский

ЗЕМЛЯ

**Метеориты, вулканы,
землетрясения**



Фрязино
2014

УДК 550.3
ББК 26.2
К 68

12+

Издание осуществлено при поддержке
Фонда некоммерческих программ Дмитрия Зимина «Династия»

Короновский Н. В.

Земля. Метеориты, вулканы, землетрясения —
Фрязино: «Век 2», 2014. — 176 с.
ISBN 978-5-85099-192-0

В книге рассказывается о внутреннем строении Земли и методах его изучения; о современной геологической теории — тектонике литосферных плит; о наиболее опасных геологических явлениях — землетрясениях и извержениях вулканов и о возможности их предсказания; а также о падениях на Землю метеоритов.

На обложке — Карл Брюллов «Последний день Помпеи», ГРМ

ISBN 978-5-85099-192-0

© Короновский Н. В.
© Век 2, 2014

Все, что мы знаем — ничтожно.
Все, что не знаем — бесконечно.
Сократ

ВВЕДЕНИЕ

Вселенная огромна. От самых дальних наблюдаемых объектов свет идет к нам около 13 млрд лет. И во всем этом объеме сосредоточена только малая часть Вселенной, а остальное находится вне нашего обозрения. В безбрежном океане Вселенной рассыпаны многие миллиарды галактик, а в каждой из них миллиарды, а то и триллионы звезд. В одной из таких галактик, которая называется Млечный Путь, находится наше Солнце, вокруг которого вращаются 8 планет: Меркурий, Венера, Земля со спутником Луной, Марс с двумя маленькими спутниками — Фобосом и Деймосом, а далее располагаются планеты-гиганты со своими многочисленными спутниками — Юпитер, Сатурн с его знаменитыми кольцами, Уран и Нептун.

Земля — пылинка во Вселенной, но это наша планета и нам важно знать о ней как можно больше.

Как и другие планеты, Земля функционирует как «живой» организм. Внешние оболочки — атмосфера, гидросфера, биосфера, ионосфера, магнитосфера — тесно взаимодействуют как между собой, так и с земной корой, а кроме того, на них влияют Солнце и Луна. На Земле постоянно происходят различные процессы, и в наиболее глубоких ее частях — геосферах, и в поверхностной оболочке — земной коре, на которой мы и живем. Именно в ней случаются такие катастрофические процессы как землетрясения, вызванные ими гигантские оползни,

цунами, извержения вулканов. На поверхность Земли падали, падают и будут падать метеориты. Перечисленные катастрофы происходят внезапно, они завораживают своей неотвратимостью, а их последствия могут быть страшными.

Обо всем этом и хотелось бы рассказать в этой книге. О том, как современная наука объясняет многие катастрофические события, может ли она их прогнозировать и какова точность этих прогнозов. Речь пойдет только о твердых внутренних сферах Земли — тех, которые находятся ниже ее поверхности, т.к. именно в них происходят процессы, которые вызывают извержения вулканов и землетрясения. Кроме того, именно на земную поверхность падают небесные пришельцы — метеориты, оставляя на ней раны — астроблемы, с которыми связаны разные геологические события и даже полезные ископаемые. Но сначала нам придется коротко рассказать о том, как устроена наша планета.

Без постоянной помощи Г.В.Брянцевой эта книга не могла бы увидеть свет, за что я приношу Галине Владимировне глубокую благодарность.

СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Сейсмология

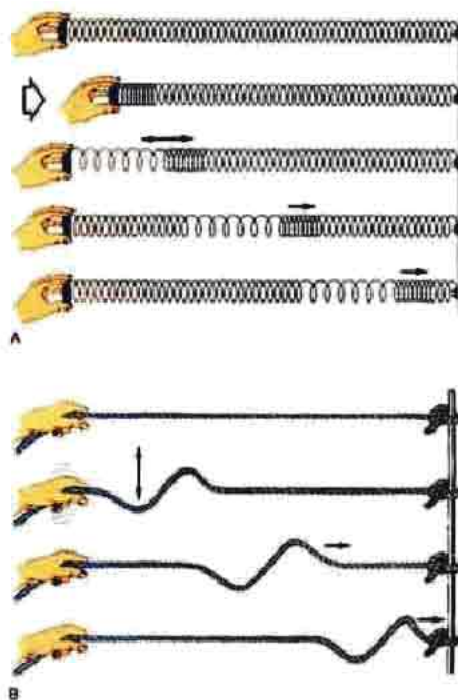
Как мы узнаём о том, что находится внутри Земли, на глубинах в тысячи километров, если самая глубокая скважина в мире, пробуренная в нашей стране на Кольском полуострове, недалеко от Мурманска, достигла отметки лишь в 12 км 226 м, а радиус Земли 6371 км? Все мы понимаем, что непосредственно увидеть глубокие горизонты Земли невозможно, и сто лет назад мы ничего не знали о ее внутреннем строении. Сейчас разработано много косвенных методов, позволяющих «заглянуть» в недоступные недра нашей планеты.

На первом месте стоит сейсмологический метод. Любой взрыв в горном карьере, подземный ядерный взрыв, промышленный взрыв и, тем более, каждое землетрясение, которые происходят в разных частях планеты почти ежесекундно, вызывают в горных породах упругие колебания – сейсмические волны, или волны деформации. Эти волны распространяются во все стороны от места возникновения землетрясения, от его очага, или гипоцентра, и при сильном землетрясении пронизывают весь земной шар. Вот эти колебания и надо улавливать.

Волны деформаций бывают объемными и поверхностными. Все они, достигая земной поверхности, производят те катастрофические процессы, которые мы наблюдаем – разрушение зданий, образование трещин, провалов и даже нового рельефа.

Рис.1.1. Продольные (А) и поперечные (В) объемные волны (по Plummer, Mc Geary)

Объемные волны деформаций подразделяются на два типа — продольные и поперечные (рис.1.1). В продольных волнах колебания происходят вдоль направления распространения волны. Это напоминает гармошку, которая то сжимается, то растягивается. А во втором типе волн колебания происходят поперек направления распространения волны — вверх и вниз. Такие колебания могут



происходить только в твердой среде, в которой частицы сопротивляются сдвигу. Продольные волны имеют большую скорость, следовательно, они будут на приемнике зарегистрированы первыми, а поперечные — вторыми. Продольные волны могут распространяться в любой среде (воздухе, жидкости, твердом теле), а поперечные — только в твердых телах.

Существуют еще два типа поверхностных волн — волны Лява, в которых смещение частиц происходит в горизонтальной плоскости, перпендикулярно направлению распространения, и волны Рэлея, в которых колеблющиеся частицы имеют и продольную составляющую, и поперечную (вверх-вниз). Особенность их распространения изображена на рис.1.2. Если объемные волны проходят через все тело Земли, то поверхностные распространяются вокруг нее. Скорость сейсмических волн зависит от упругих свойств и плотности пород, через которые они проходят. Понятно, что чем плотнее порода, тем скорость выше. Если мы имеем прибор, способный регистрировать продольные и поперечные сейсмические волны и их скорость на определенной глубине, то можем составить представление о разных слоях, из которых состоит наша планета.

Интересно, что первый такой прибор – сейсмограф, если его можно так назвать, был создан в 132 г. н.э. в Китае, ученым Чжан Хэном (рис. 1.3). Это устройство, конечно, не делало записей, а могло лишь примерно указать направление, где произошел главный толчок. Прибор состоял из большой медной полусферы, внутри которой располагалось подобие маятника, а по периферии находилось шесть драконов, в пасти которых были нефритовые шарики. Под сферой вокруг нее стояло шесть лягушек с открытыми ртами. Колебания грунта при землетрясении вызывали колебания маятника, и от его удара по сфере шарик из пасти дракона падал в рот лягушки. Так определялось направление первого сильного толчка, связанного с приходом продольных волн.

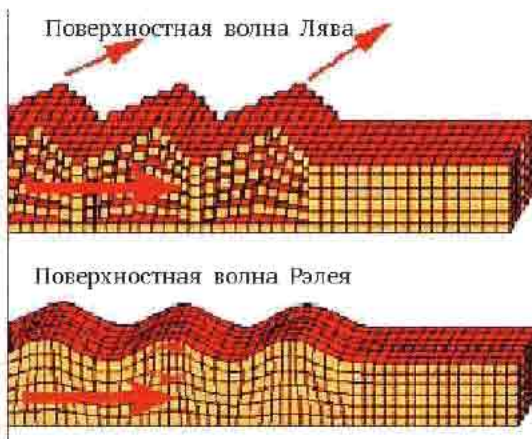


Рис. 1.2. Поверхностные волны
(Н. В. Короновский, В. А. Абрамов)

Принцип действия, как первого, так и последующих сейсмографов, один и тот же. Необходимо, чтобы подвешенный груз свободно перемещался и в вертикальной, и в горизонтальной плоскости, и это перемещение, связанное с колебаниями грунта, фиксировалось любым способом. Непрерывная запись сигналов на станциях ведет-

Рис. 1.3. Один из вариантов
сейсмографа Чжан Хэна

ся круглосуточно, и в результате получается сейсмограмма, которую специалисты геофизики могут расшифровывать (рис. 1.4).

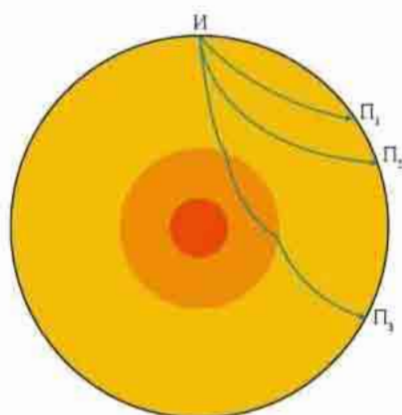
Близкий к современному сейсмограф был сконструирован Юингом в Японии еще в 1879 г., тогда как в Европе прибор с записью сигналов на барабане был сделан в 1855 г. Л. Пальмьяри.

В 1856 г. первый сейсмограф установили на вулкане Везувий около Неаполя. В конце XIX века русский ученый академик Б.Б. Голицын изобрел первый электрический сейсмограф, способный регистрировать землетрясения на расстоянии в 20 000 км, когда смещения грунта под сейсмографом составляют тысячные доли миллиметра. Российские геофизики Д.П. Кирнос, Г.А. Гамбурцев, Д.А. Харин усовершенствовали сейсмограф Б.Б. Голицына в сторону более точных показаний, однако принцип его действия остался без изменений.

В наши дни на земном шаре, особенно в сейсмоопасных районах, да и в других местах размещены тысячи сейсмографов, с помощью которых регистрируются не только все, даже самые слабые землетрясения, но и все промышленные взры-



Рис. 1.4. Современный сейсмограф



вы, включая, конечно, и подземные ядерные. Сейсмографы, записывая скорость прохождения сейсмических волн на разных глубинах, позволяют выявить слои внутри Земли, обладающие разной плотностью и упругостью, что свидетельствует о разном составе этих слоев (рис. 1.5).

Рис. 1.5. Сейсмические волны
И — источник волн,
П — приемники

Геофизики читают сейсмограммы так же, как врач читает кардиограммы. Благодаря обобщению огромного сейсмического материала сейчас твердо установлены 4 границы раздела вещества внутри Земли с различной скоростью прохождения сейсмических волн. То есть земной шар состоит из нескольких оболочек — геосфер.

Самая верхняя геосфера, и для нас самая важная — это *земная кора*, покрывающая всю нашу планету тонким слоем мощностью от 5–7 км в океанах и до 70–75 км на суше, там, где высокие горы, например, на Памире.

Нижняя граница земной коры, открытая в 1909 году хорватским геофизиком Мохоровичичем, характеризуется резким, скачкообразным возрастанием скоростей как продольных, так и поперечных сейсмических волн. Граница Мохоровичича (рис. 1.6), для краткости ее называют Мохо, или просто М, прослеживается повсеместно, а ниже нее до глубины 2900 км располагается твердая мантия Земли.

Нижняя граница мантии впервые была установлена геофизиком Гутенбергом (1914), она отделяет мантию от ядра, самой глубокой геосферы Земли, радиусом более 3000 км. Самое удивительное заключалось в том, что поперечные сейсмические волны не проходили ниже границы в 2900 км.

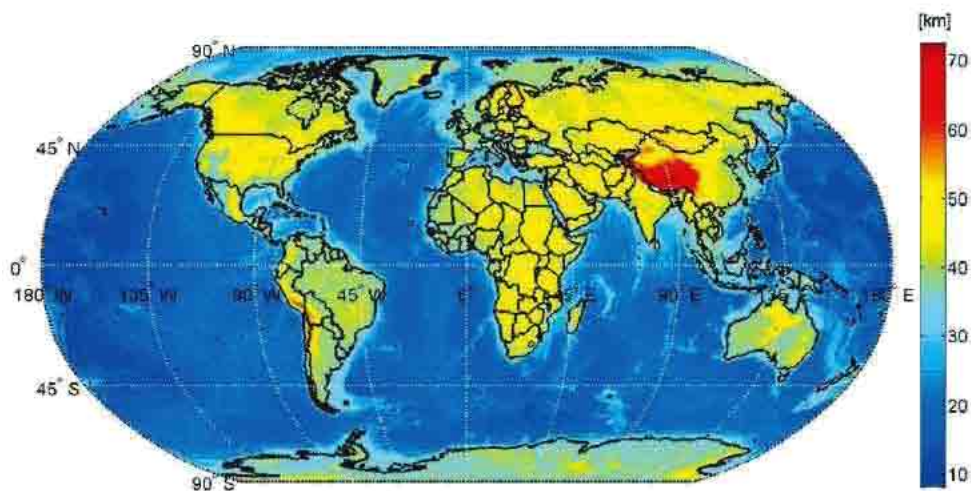


Рис. 1.6. Граница Мохоровичича по данным европейского спутника для исследования гравитационного поля GOCE.
Глубина кодируется цветом

Даже неискушенный читатель, если ему показать простейшую формулу для скорости поперечной волны:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

где μ — модуль сдвига (отношение касательного напряжения к сдвиговой деформации), а ρ — плотность вещества и, зная из школьной физики, что модуль сдвига в жидкости и газе равен 0, задумается, а из чего же тогда состоит земное ядро? При такой высокой плотности и огромном давлении вряд ли там газообразное вещество. Тогда из чего же состоит ядро? Наиболее вероятный ответ на этот вопрос: вещество ядра обладает свойствами жидкости или некоторой пластичностью.

И это единственно верный ответ. Но ведь на уровне внешнего ядра давление достигает огромных величин — около 2-х млн атмосфер на квадратный сантиметр, при котором пластичное тело может приобретать неожиданные, неизвестные нам свойства. В 1936 г. геофизик И. Леманн доказала, что внутри ядра со свойствами жидкого тела, находится, начиная с глубины 5100 км, еще и внутреннее, твердое ядро, через которое проходят как продольные, так и поперечные сейсмические волны.

Таким образом, оказалось, что планета Земля состоит из целого ряда сферических оболочек, вложенных одна в другую и различающихся по плотности и упругим свойствам. Но это было только начало изучения строения Земли, которое на самом деле оказалось намного сложнее.

Прежде всего, выяснилось, что земная кора континентов и океанов резко различается. На континентах в вертикальном сечении коры выделяется несколько слоев (рис. 1.7). Самый верхний, распространенный не повсеместно, это чехол из осадочных пород — известняков, песчаников и глин, достигающий 25 км в глубоких впадинах, например, в Прикаспийской. Он подстилается так называемой консолидированной корой из гранитов и разнообразных метаморфических, т.е. сильно измененных, пород. Но основная роль принадлежит разным гранитам. Этот слой характеризуется различными скоростями сейсмических волн, что свидетельствует о его неоднородности, но в целом он хрупкий и более твердый, чем нижний, относительно пластич-

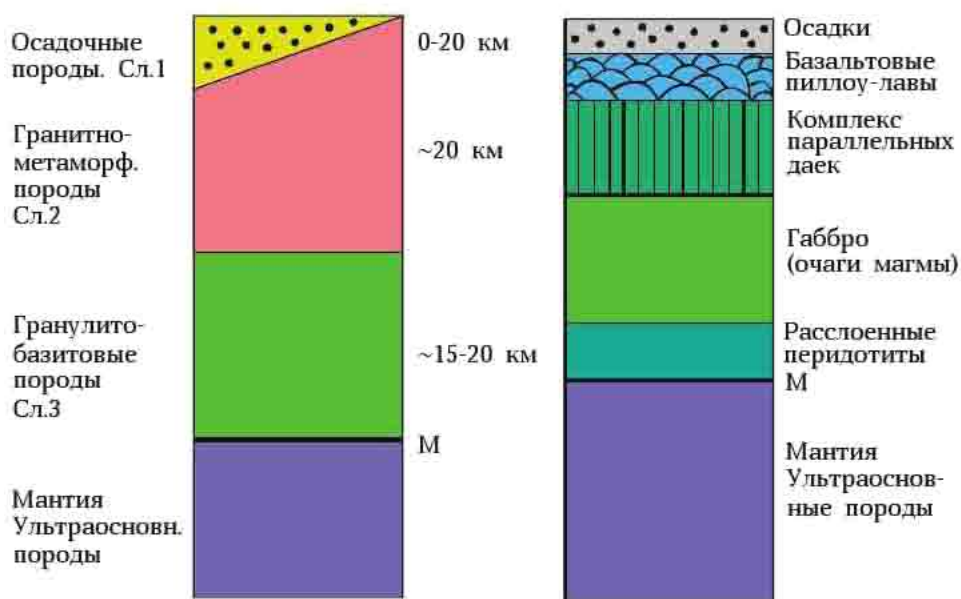


Рис.1.7. Строение континентальной и океанической земной коры
(Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

ный слой земной коры. Последний состоит из различных сильно измененных горных пород, подвергшихся воздействию высоких температур и мощному давлению на глубинах в десятки километров. Учитывая, что скорости продольных и поперечных сейсмических волн в этом слое близки к таковым в базальтах, его называют гранулитно-базитовым. Этот термин характеризует все разнообразие базальтов — изверженных пород, в которых содержание SiO_2 составляет 52–45%.

Подобное строение континентальной земной коры с пониженной плотностью ее нижнего слоя, очень важно, так как ведет к тому, что этот слой может деформироваться пластично. Верхний, гранитно-метаморфический, слой земной коры обладает большей твердостью, он хрупкий, и большинство разломов образуется в нем. Мы живем на континентальной коре, и все катастрофические процессы, происходящие на ее поверхности — извержения вулканов, землетрясения, оползни, обвалы тесно связаны с ее строением.

А вот океаническая кора, в отличие от континентальной, характеризуется значительно меньшей мощностью, в среднем 6–7 км, и совсем другим строением. В ней отсутствует гранитно-

метаморфический слой, осадочный слой имеет толщину всего в несколько сотен метров и подстилается сложно построенным, но в целом, базальтовым слоем. В верхней части океанической коры под маломощными осадками залегают базальты, т.н. пиллоу-лавы (подушечные), так как гидростатическое давление на океаническом дне велико и магма может лишь выдавливаться из подводящих каналов, как паста из тубика. Ниже как раз и залегают толща, состоящая из параллельных каналов – даек, по которым базальтовая магма поднималась вверх. А еще ниже по разрезу располагается толща пород с пониженным содержанием двуоксида кремния, называемых габбро. Они, в свою очередь, подстилаются ультраосновными породами – перидотитами, в которых содержание SiO_2 не превышает 45%. Это уже верхняя мантия, отделяемая от габбро границей Мохоровичича. Принципиальная разница в строении континентальной и океанической земной коры, как можно будет убедиться в дальнейшем, определяет многие процессы в поверхностной сфере. Именно взаимодействие океанической и континентальной коры приводит к сильнейшим природным катастрофам – извержениям вулканов и землетрясениям.

Залегающая ниже коры, до глубины в 2900 км, мантия также имеет сложное строение, что было установлено в последние десятилетия, благодаря совершенствованию геофизических методов, а также изучению изменения структуры разных минералов при высоком давлении (рис. 1.8).

В верхней части мантии на глубине 100–120 км под материками и 50–60 км под океанами начинается очень важный в геологическом отношении слой – *астеносфера* (астенос – слабый, ослабленный), мощностью 50–80 км под океанами и до 200 км и более под континентами. Этот слой характеризуется пониженной вязкостью, в нем может содержаться расплав, но не более 2–4%, вследствие чего наблюдается пониженная скорость сейсмических волн. Возникновение слоя астеносферы объясняется тем, что на этих глубинах кривая роста температуры почти совпадает с кривой температуры плавления пород верхней мантии, за счет чего возможно частичное плавление породы.

Часть верхней мантии выше астеносферы вместе с земной корой называется *литосферой* (литос – камень). Она твердая

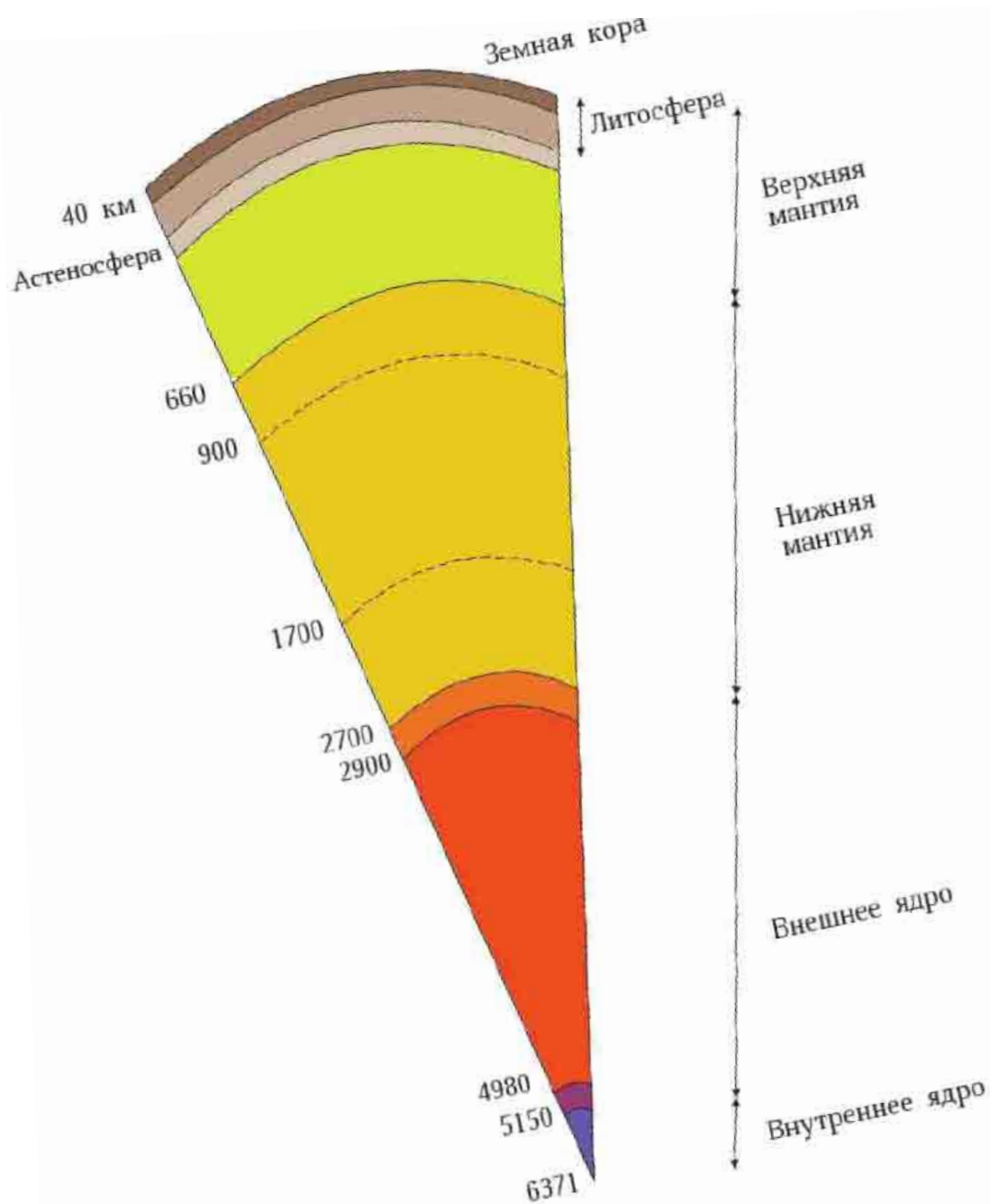


Рис.1.8. Внутреннее строение Земли
(Н.В. Короновский, Г.В. Бранцева, 2013)

и хрупкая и ее фрагменты (литосферные плиты) могут «скользить» по смазке из астеносферы. Постоянное, хотя и очень медленное, перемещение литосферных плит определяет неповторимую историю эволюции нашей планеты и ответственно за большинство катастрофических геологических процессов, о которых пойдет речь ниже.

Граница между верхней и нижней мантией находится на глубине 660 км, причем она весьма узкая, примерно 6 км. В пределах этой зоны на 6% возрастают скорости как продольных, так и поперечных сейсмических волн, да и плотность вещества увеличивается на 7%. Интересно, что ниже этой границы вязкость вещества мантии возрастает в 30 и более раз.

О чем все это может говорить? Конечно, о резком изменении минерального состава пород. Но как же можно узнать состав вещества на таких огромных глубинах, при высокой температуре и колоссальном давлении? И тут на помощь приходят экспериментальные данные о преобразованиях минералов при больших давлениях и высоких температурах, недавно показанных в очень интересной статье двух академиков, отца и сына, Ю.М. Пушаровского и Д.Ю. Пушаровского.

Дело в том, что одним из главных выводов этих исследований является признание структурных изменений минералов, из которых состоит мантия Земли, а не содержания главных химических элементов, таких как, например, кремний, кислород, магний, железо, алюминий. Возрастающее с глубиной давление и увеличивающаяся температура приводят к эволюции структурной решетки минералов в сторону более плотной их упаковки. Так, большое количество, около 100 различных кремнекислородных комплексов силикатов, наиболее распространенных в земной коре и обладающих тетраэдрической формой, ниже раздела Мохоровичича, т.е. в мантии, сменяются всего лишь 15-ю типами структур, но уже другой – октаэдрической.

Чтобы не утомлять неискующего читателя формулами разных минералов, поясним главную мысль Д.Ю. Пушаровского на примере такого распространенного минерала коры и мантии, как оливин — $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, называемого в земной коре α -оливином. В верхней мантии, начиная с глубин около 400 км, оливин переходит в другие минералы такого же состава, но с

более плотной структурной упаковкой. И такая смена происходит с погружением на все большие глубины, пока уже ниже 660 км не образуются минералы с очень плотной структурой.

А что же ниже, хотя бы до границы с внешним ядром, т.е. до глубины в 2900 км? По данным Пушаровских единая в прежних моделях нижняя мантия может подразделяться на две сферы — среднюю (от 840 до 1700 км) и собственно нижнюю (2200–2900 км). Переход от верхней мантии к средней, а от нее к нижней — постепенный и охватывает зону мощностью до 200 км. В этих сферах и на границе нижней мантии и внешнего ядра появляются минералы с еще более плотной структурой, типа перовскита.

Мантия, располагающаяся ниже земной коры и вплоть до ядра, составляет основной объем твердой Земли — 66,3%. Но ее самый нижний, примыкающий к ядру слой, открытый всего немногим более 20 лет назад, привлекает особое внимание геофизиков и геологов. Дело в том, что занимая пограничной положение между двумя резко различными по составу и свойствам сферами, он обладает не только резко изменчивой мощностью в 150–300 км, но местами как бы совсем исчезает, образуя «впадины» и «поднятия». Его свойства свидетельствуют о резком изменении температуры и, по-видимому, химического состава, а на границе с ядром находится очень тонкий прерывистый слой ультранизкой вязкости, в котором, вполне возможно, и происходит обмен веществом между мантией и ядром. Это все, конечно, предположения, догадки, но 20 лет назад не было и догадок.

С глубины 2900 км начинается ядро, которое подразделяется, по сейсмическим данным, на внешнее — 31% объема земного шара, а с рубежа 5150 км — внутреннее.

Особый интерес представляет внешнее ядро, через которое, как уже говорилось, не проходят поперечные сейсмические волны. Это означает, что вещество внешнего ядра обладает свойствами жидкости. Не следует думать, что там находится жидкость, как, скажем, в кипящем чайнике. Вероятно, внешнее ядро состоит из материала с малой вязкостью и с плотностью $11,0 \text{ г/см}^3$, в котором происходят медленные перемещения, т.е. конвекция. Плотность внешнего ядра на 10% ниже плотности

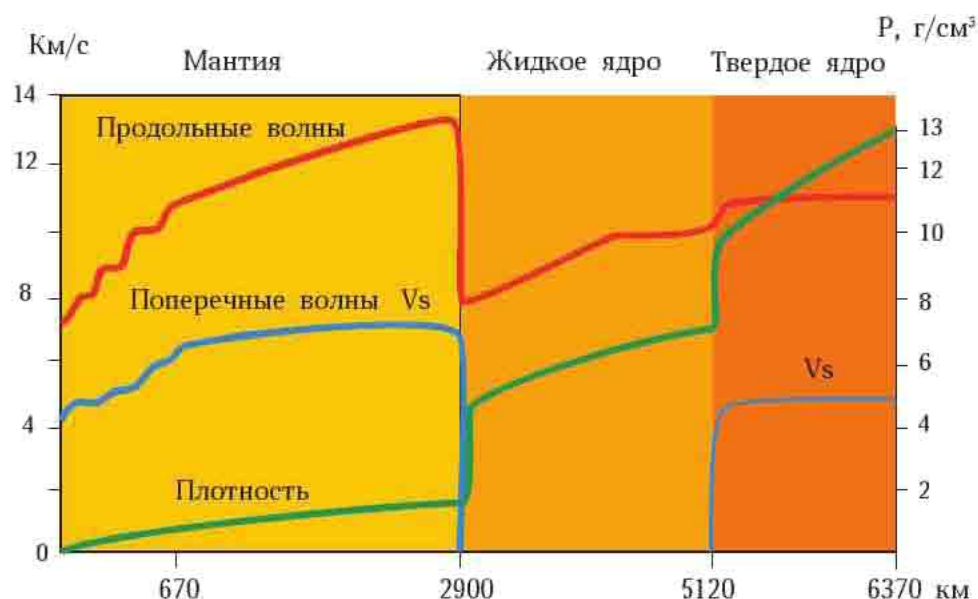


Рис.1.9. Распределение скоростей сейсмических волн и плотность вещества внутри Земли. Наиболее существенные скачки скоростей происходят на глубинах 2900 и 5120 км
(Н. В. Короновский, Г. В. Бранцева, 2013)

расплава железа, поэтому в его состав могут входить также кремний, углерод, водород. Граница между внешним и внутренним ядром очень четкая и определяется по резкому (почти на 0,8 км/сек) скачку скорости продольных сейсмических волн, т.е. вещество становится более плотным (рис. 1.9). Поэтому можно заключить, что внутреннее маленькое «ядрышко» — это явно твердое вещество с плотностью 12,5 г/см³, так как пропускает как продольные, так и поперечные волны. Появление поперечных сейсмических волн во внутреннем ядре объясняется тем, что на границе внешнего и внутреннего ядра, продольная волна, преломляясь на границе раздела, порождает во внутреннем ядре и продольные, и поперечные волны. Судя по скоростям сейсмических волн, огромному давлению 364 ГПа (3,6 млн. атмосфер) и высокой температуре, материал внутреннего ядра Земли — железо, возможно с примесью никеля (5–15% весовых), и значительно меньшим количеством легких элементов, причем железо во внутреннем ядре не обычное, а имеет структуру с плотной упаковкой.

В последнее время появляются новые данные, свидетельствующие о том, что строение внутреннего ядра, возможно, гораздо сложнее, чем нам представляется. Его внешняя часть может обладать текучестью, да и во внутренней части уж очень мала скорость поперечных сейсмических волн, что тоже необычно. Методы исследований глубоких геосфер Земли все совершенствуются и, наверное, скоро мы узнаем много нового.

Вот мы и добрались до центра нашей планеты – до точки на глубине 6371 км и получили представление о внутреннем строении Земли с учетом самых последних данных геологической науки.

Земля состоит из целого ряда оболочек или геологических сфер, каждая из которых обладает своими особенностями, и все геосферы по-разному, но взаимодействуют между собой. В конечном счете, оказывается, что какие-то геологические процессы, происходящие в земной коре на самой поверхности Земли, обязаны знаменитому ныне слою на границе нижней мантии и ядра, где зарождаются восходящие струи относительно более нагретого материала, так называемые плюмы. Очень медленно, со скоростью 1–2 см/год, плюм поднимается и за сотни миллионов лет, достигая поверхности верхней мантии, вызывает ее плавление и образование огромных магматических очагов, из которых извергается колоссальное количество базальтовых лав и туфов. Этот магматизм так и называется плюмовым, в далеком прошлом он приводил к глобальным катастрофам, о чем мы поговорим ниже.

Магнитное поле Земли

Более 400 лет назад У.Гильберт высказал предположение, что Земля сама является магнитом, но представление о механизме возникновения ее намагниченности до сих пор не вышло за рамки гипотез.

Известно, что Земля обладает магнитным полем. Наверное, все когда-нибудь пользовались компасом, определяя, где север или юг. Но как образовалось магнитное поле, во многом и сейчас остается загадкой. Существовало много предположений о том, почему наша планета имеет магнитное поле. В настоящее

время наиболее удовлетворительно его возникновение объясняет гипотеза магнитного гидродинамо, для работы которого необходимо: 1) очень слабое первичное магнитное поле, 2) перемещение — конвекция вещества во внешнем ядре, обладающем свойствами жидкости, 3) вращение Земли.

Первичное магнитное поле может возникнуть от вращения Земли, т.к. она намагничивается в направлении оси вращения. Это называется гидромагнитным эффектом. Было показано, что данное поле составляет лишь 10^{-10} магнитного поля Земли, которое и так очень слабое, всего 0,5 эрстед. Причиной первичного магнитного поля может быть и межпланетное магнитное поле, и магнитное поле Солнца, которое, несмотря на удаление от нас Солнца на 150 млн км, все же сказывается.

Наличие такого очень слабого первичного магнитного поля и жидкого вращающегося проводящего внешнего ядра и вызывает образование магнитного поля нашей планеты и при этом, благодаря сложным, до конца еще неясным процессам, происходящим во внешнем ядре, магнитная ось Земли, соединяющая северный и южный магнитный полюса, не совпадает с осью вращения, т.е. с географическими полюсами (рис. 1.10). В северном полушарии магнитный полюс сейчас находится на севере Канады, около Баффиновой земли. Однако в прошлом ось вращения Земли и магнитная ось в целом совпадали.

С древнейших времен магнитное поле — это исключительное явление природы, занимало умы человечества. Ведь с магнитным полем связана не только навигация, но еще и множество различных практических и научных задач — от поисков рудных месторождений, до изучения внутреннего строения Земли. Палеомагнитология, как наука, изучающая геомагнитное поле прошлых геологических эпох, еще очень молода, ей всего около 100 лет, и по-настоящему она стала развиваться лишь с середины 50-х годов прошлого века. Но эта молодая наука сыграла выдающуюся роль в становлении современной глобальной геологической теории — тектонике литосферных плит.

В 1906 г. Б.Брюн, измеряя магнитные свойства неогеновых, сравнительно молодых лав в Центральной Франции, обнаружил, что их намагниченность противоположна направлению современного геомагнитного поля, т.е. Северный и Южный магнит-

ные полюса как бы поменялись местами. Наличие обратно намагниченных горных пород является следствием не каких-то необычных условий в момент образования лав, а результатом обратного направления магнитного поля Земли в тот момент.

Обращение полярности геомагнитного поля – важнейшее открытие, которое привело к возникновению новой науки – магнитостратиграфии, изучающей расчленение отложений горных пород на основе их прямой или обращенной намагниченности. И главное здесь заключается в доказательстве синхронности изменений намагниченности в пределах всего земного шара. В руках геологов оказался действенный метод корреляции отложений и событий.

В реальном магнитном поле Земли время, в течение которого происходит изменение полярности, может быть как коротким – до тысячи лет, так и составлять миллионы лет.

Первая магнитостратиграфическая шкала для последних 3,5 млн лет была создана в 1963 г. А. Коксом, Р. Доллом и Г. Далримплом. В пределах этого интервала они установили две временные зоны прямой полярности (как современное поле) и одну зону – обращенной. С тех пор составлено много магнитостратиграфических шкал, полнота и нижний возрастной предел которых все увеличиваются, а само расчленение становится более точным. Магнитостратиграфическая шкала является, по существу, глобальной шкалой геомагнитной полярности за наблюдаемую часть геологической истории.

Временные интервалы преобладания какой-либо одной полярности получили название геомагнитных эпох, и части из них присвоены имена выдающихся геомагнитологов: эпохи Брюне-

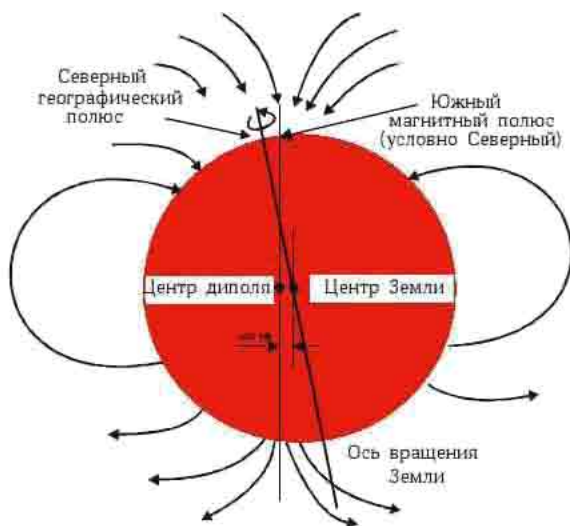


Рис.1.10. Магнитное поле Земли
(Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

са, Матуямы, Гаусса и Гильберта. В пределах эпох выделяются меньшие по длительности интервалы той или иной полярности, называемые геомагнитными эпизодами.

Наиболее эффектно выявление интервалов прямой и обратной полярности геомагнитного поля было проведено для молодых в геологическом смысле лавовых потоков в Исландии, Эфиопии и некоторых других местах. Недостаток этих исследований заключается в том, что излияние лав было прерывистым процессом, поэтому вполне возможен пропуск какого-либо магнитного эпизода.

Анализ магнитных свойств образцов из пород океанского дна позволил составить детальную шкалу инверсии поля до поздней эпохи юрского периода включительно, т.е. на интервал времени в 170 млн лет, что дало возможность реконструировать магнитное поле Земли за это время. До рубежа в 570 млн лет — для всего фанерозоя — такая шкала тоже создана, но она хуже по качеству. Есть шкала и для рифея — венда (1,7–0,57 млрд лет), однако она еще менее удачна. Остаточная намагниченность обнаруживается даже у архейских пород с возрастом 3,4 млрд лет.

Распределение геомагнитных инверсий во времени характеризуется довольно сложной ритмичностью, состоящей как из длительных, так и из кратких интервалов обращения знака поля (рис.1.11). Почему это происходило — неизвестно, но значение этого события для геологии очень важно.

В начале XXI-го века в области наук о Земле произошло осознание того факта, что вся наша планета представляет собой единую систему, хотя и состоит из ряда сфер или геосфер, которые находятся в тесном взаимодействии друг с другом. А ведь еще сто лет назад мы ничего не знали о внутреннем строении Земли, прогресс в изучении которой, связан, конечно, с новой техникой и новыми технологиями. Прежде всего, это сейсмологический метод и сейсмическая томография, позволившие получить информацию о самых глубоких горизонтах нашей планеты; глубоководное бурение и использование обитаемых подводных аппаратов; данные искусственных спутников Земли (см. рис. 1.6); изучение влияния на геосферу

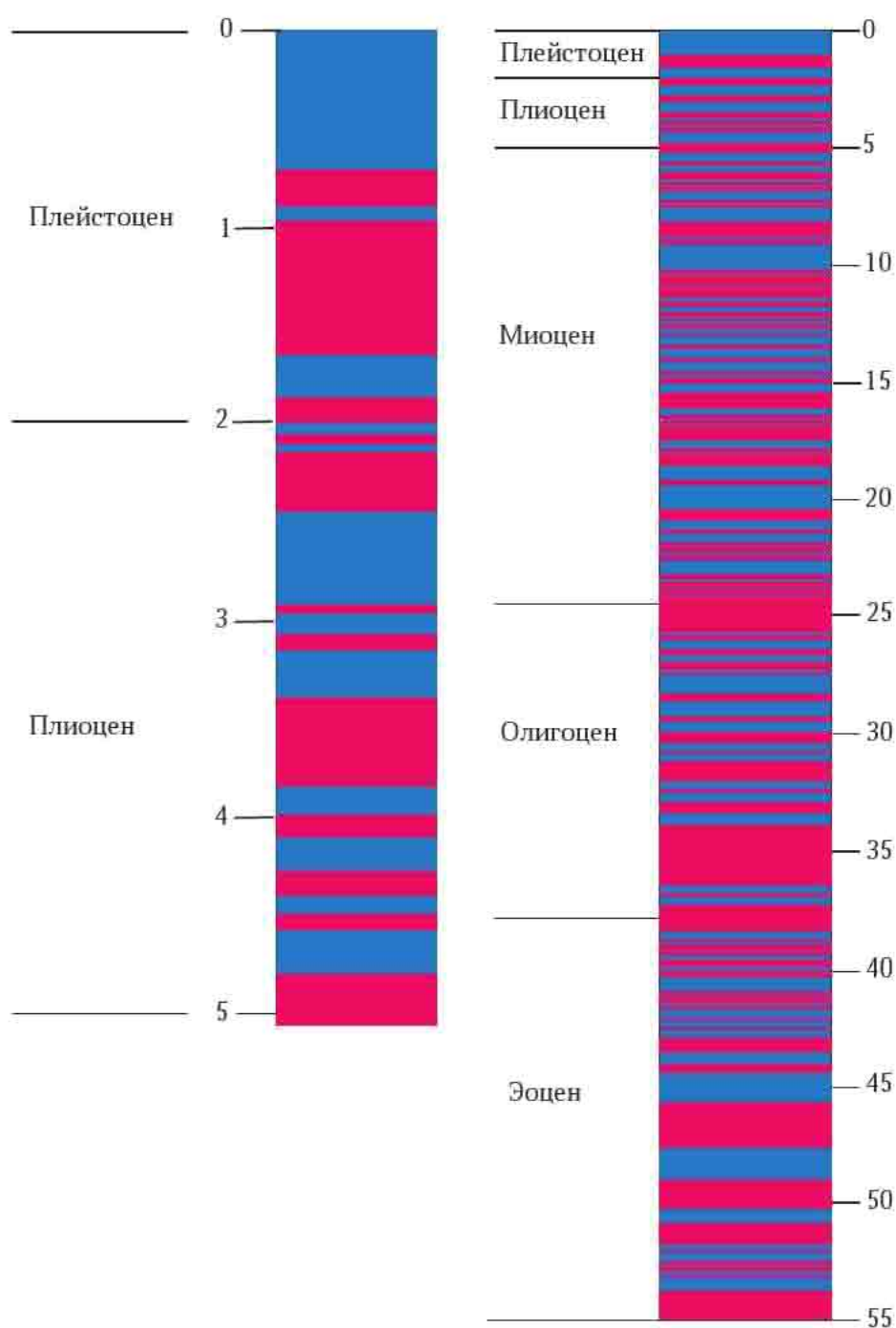


Рис. 1.11. Шкалы инверсий магнитного поля:
слева — за последние 5 млн лет, справа — за последние 55 млн лет;
синий — нормальная намагниченность, красный — обратная
(по У.У. Харленду и др., 1985)

Луны и ближайших планет Солнечной системы. Впервые во всей полноте выявилась сложность и взаимодействие всех геологических сфер Земли, на первый взгляд автономных, но на самом деле тесно связанных между собой и влияющих друг на друга.

Тектоника литосферных плит — революция XX века в геологии

Начиная со второй половины прошлого века геологические и геофизические исследования проводились исключительно интенсивно, но особенно это касалось океанов, о строении дна которых и, тем более, о структуре земной коры в них и ее свойствах было известно очень мало. Полученные материалы способствовали рождению новой геологической теории — тектоники литосферных плит, согласно которой земная кора состоит из относительно целостных блоков, которые постоянно движутся относительно друг друга.

Именно теории, а не гипотезы, как часто бывает в геологии. Теория обладает «предсказуемостью». С ее помощью можно прогнозировать явления, те или иные свойства вещества и т.п. И если прогноз подтверждается, то теория имеет право на существование. Существующие взгляды, если они не могут объяснить появляющиеся новые факты, многого не стоят.

Решающий вклад в современную геологическую теорию тектоники литосферных плит внесли следующие открытия:

1) выявление грандиозной, протяженностью около 60000 км, системы срединно-океанических хребтов и гигантских поперечных, т.н. трансформных, разломов, пересекающих их (рис.1.12);

2) обнаружение и расшифровка линейных магнитных аномалий океанического дна, дающих возможность объяснить механизм и время их образования;

3) установление места и глубины гипоцентров (т.е. очагов) землетрясений в горных породах;

4) развитие палеомагнитного метода, основанного на изучении древней остаточной намагниченности горных пород, что дало возможность выявить перемещение континентов относительно магнитных полюсов Земли.

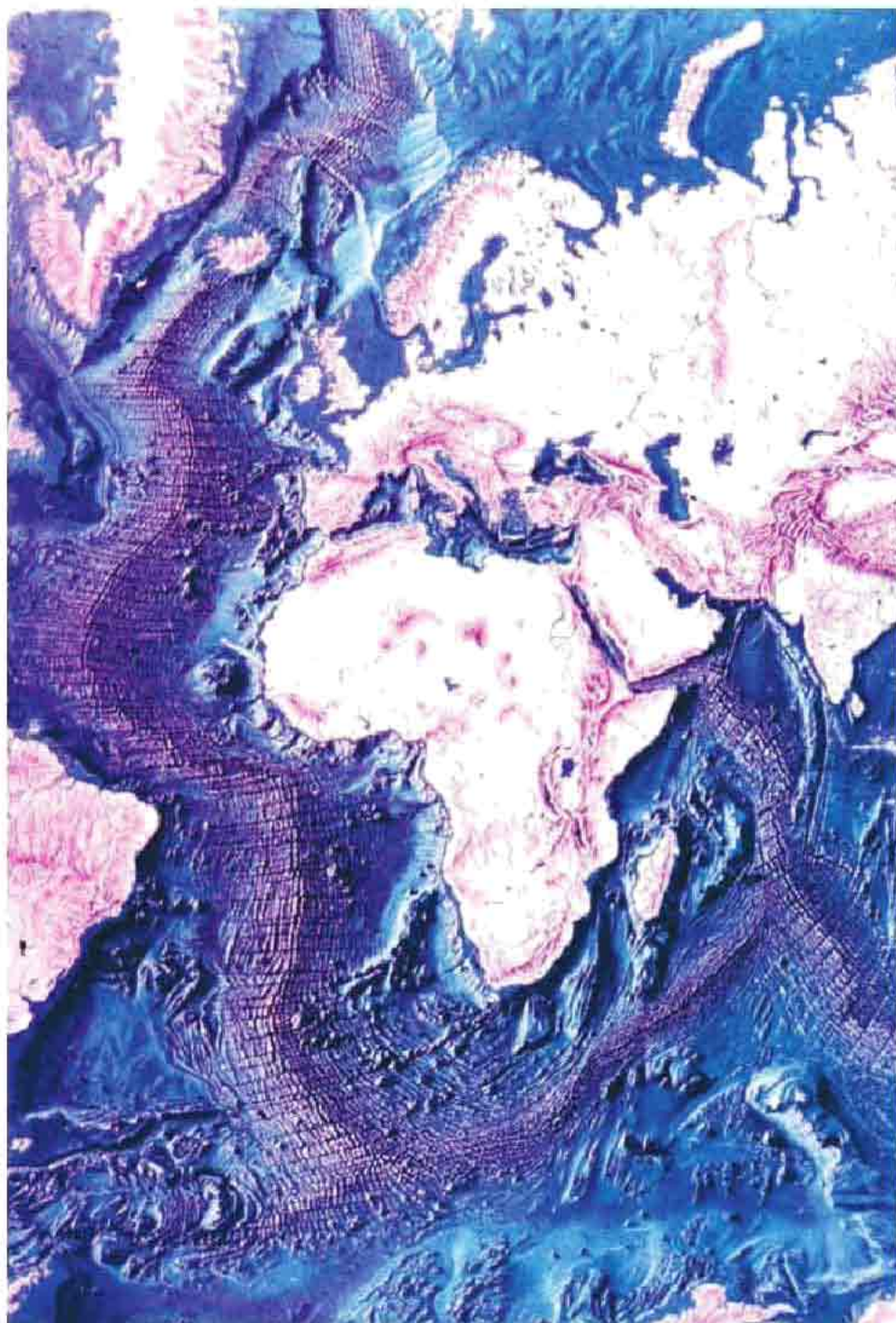


Рис.1.12. Рельеф дна Атлантического океана
(Bruce C., Heezen, 1977)

Заслуга в получении всех этих новых данных принадлежит большому коллективу геологов и геофизиков, но создание «тектоники литосферных плит» в конце 60-х годов XX века связано в первую очередь с именами Т. Уилсона (Канада), К. Ле Пишона (Франция) и Д. Моргана (США).

Новая геологическая парадигма (модель) в корне изменила прежние представления об эволюции Земли, по крайней мере за последние 3,0–3,2 млрд лет. С конца XIX века геологи были твердо уверены, что все структуры нашей планеты — океаны, материки, а также более частные структурные элементы — крупные горно-складчатые пояса и др., всегда находились на своих местах. Движения в них, хоть и медленные, могли быть только вертикальными, а горизонтальных перемещений быть не могло.

Из признания вертикальных движений, как главных сил, исходила т.н. геосинклинальная концепция Дж. Холла и Дж. Дэна, предложенная в 1873 г. на примере Аппалачей — гор в восточной части Северной Америки. Под геосинклиналью Дж. Дэна понимал относительно узкий, но длинный прогиб земной коры, впоследствии всегда находившийся на том же самом месте и не изменявшим, что важно подчеркнуть, своей ширины.

Геологи всего мира очень быстро подхватили эту идею геосинклиналей, в том числе в России, а потом и в СССР. Образование начальных геосинклинальных прогибов объяснялось глубинными вертикальными разломами, проникающими ниже подошвы земной коры, т.е. ниже границы Мохоровичича. По этим разломам происходили излияния базальтовой магмы. Прогибы постепенно заполнялись лавами и продуктами их размыва. А затем структуры усложнялись за счет возникновения внутренних поднятий. Набор отложений становился более разнообразным, происходило внедрение гранитной магмы, менялся характер вулканизма и, наконец, вся эта масса отложений, благодаря вертикально действующим силам, деформировалась, сминалась в складки, а потом целиком поднималась с образованием горного рельефа. При этом горы разрушались и поставляли обломочный материал в передовые прогибы, формирующиеся перед фронтом горно-складчатого сооружения и как бы компенсирующие поднятие.

Вот такой сценарий рисовала геосинклинальная концепция для эволюции всех горно-складчатых сооружений — Урала, Кавказа, Альп, Карпат, а также всех других. В 40-е годы XX века американский ученый М. Кэй и немецкий Г. Штиле развили геосинклинальную концепцию, выделив внутренние зоны геосинклиналей — эвгеосинклинали (греч. «eu» — полнота, совершенство), характеризовавшиеся мощным базальтовым начальным вулканизмом, гранитоидным магматизмом, интенсивной складчатостью, сильным метаморфизмом. А внешние зоны геосинклинали — миогеосинклинали (греч. «meion» — приставка, указывающая на неполноту, неполноценность) характеризуются слабой вулканической активностью, более простой и поздно проявившейся складчатостью, слабым метаморфизмом или его отсутствием. Как правило, миогеосинклинали граничат с древними докембрийскими платформами, малоподвижными участками земной коры. И во многих складчатых системах и областях стали выделять эв- и миогеосинклинали. Но потом поняли, что и этого недостаточно для характеристики разных областей. И геосинклинальная концепция столкнулась с трудностями.

С появлением теории литосферных плит стало понятно, что структуры, которые мы сейчас наблюдаем, а также крупные части континентов в прежние геологические эпохи могли находиться совсем в других широтах; а океаны, в том виде, как мы их видим сейчас, начали образовываться не раньше 170 млн лет назад. Таков возраст древнейшей океанической коры. Океаническое дно постепенно расширялось за счет поступления базальтовой магмы из верхней мантии в срединно-океанические хребты, где находится узкая щель (рифт), от которой океаническое дно и расширяется. Этот процесс получил название *спрединг* (*spread* — растекание).

Идеи о разрастании океанической коры (спрединге) и палеомагнитология тесно связаны между собой. Г. Хесс и Р. Дитц в 1961–1962 гг. опубликовали статьи, ставшие вехами в истории геологической науки. Наращивание океанической коры происходит в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, где базальтовая магма поднимается вверх по трещинам вследствие конвективных движений в относительно нагретом веществе мантии. Попадая в условия океанского дна в рифтовых

ущельях, магма не только изливается на него, но как бы и расталкивает дно в стороны, внедряясь все новыми и новыми порциями. Естественно, что базальтовая магма, остывая, намагничивается по направлению силовых линий данной магнитной эпохи.

В 1958 г. впервые была установлена полосчатая форма магнитных аномалий северо-западной части дна Тихого океана. Сравнительно неширокие (до 40 км) полосы были намагничены то отрицательно, то положительно, причем интенсивность намагничивания вдоль каждой из полос практически не менялась. Оказалось, что полосы магнитных аномалий разного знака расположены симметрично по отношению к оси срединно-океанических хребтов. Подобная картина распределения магнитных аномалий требовала объяснений, которые не замедлили появиться в 1963 г. в статье выпускника Кембриджского университета Ф. Вейна и его научного руководителя Д. Мэтьюса. Оказалось, что обратная и прямая намагниченность полос базальтов напрямую связана с их возрастом. Приобретая знак намагниченности в момент образования, базальты впоследствии раздвигаются в стороны новыми порциями магмы, которые, в свою очередь, приобретают знак полярности уже другой эпохи, после инверсии магнитного поля. Периодические инверсии создают «матрацевидную» картину магнитного поля, а ее симметричность объясняется спредингом океанского дна.

Таким образом, соединились две продуктивные идеи, и проблема объяснения строения и эволюции океанского дна была решена. В океанах ширина полос магнитных аномалий одного знака, расположенных по обе стороны от срединного хребта, прямо пропорциональна длительности эпох данной полярности. На этом основании были проведены линии одинакового возраста океанической коры — изохроны, и каждой аномалии присвоен свой номер. Подтверждение этой картине дали результаты глубоководного бурения, так как оказалось, что возраст осадков океанского дна над магнитными аномалиями хорошо совпадает с рассчитанным возрастом самих магнитных аномалий. Сейчас составлены детальные карты возраста океанической коры, и геологические события последних 170 млн лет четко к ним привязываются.

Восстановление взаимного расположения континентов в геологическом прошлом основано на палеомагнитных данных, и в наше время получены настолько убедительные подтверждения их перемещения, что вряд ли можно сомневаться в медленных, но постоянных движениях литосферных плит, несущих на себе материки.

Применение палеомагнитного метода позволило осуществить детальные реконструкции раскрытия относительно молодых Атлантического, Индийского, Северного Ледовитого океанов и понять историю развития более древнего Тихого океана. Современное расположение континентов — это результат раскола суперконтинента Пангея, начавшегося около 200 млн лет назад. Линейное магнитное поле океанов дает возможность определить скорость движения плит, а в его рисунке заключена наилучшая информация для проведения геодинамического анализа.

Благодаря палеомагнитным исследованиям установлено, что раскол Африки и Антарктиды произошел 160 млн лет назад. Наиболее древние аномалии с возрастом 170 млн лет (средняя юра) обнаружены по краям Атлантики у берегов Северной Америки и Африки. Это и есть время начала распада суперматерики. Южная Атлантика возникла 120–110 млн лет назад, а Северная — значительно позже (80–65 млн лет назад). Подобные примеры можно привести по любому из океанов и, как бы «читая» палеомагнитную летопись, реконструировать историю его развития и перемещение литосферных плит.

Но Земля не может расширяться в своем объеме, должны быть участки, где расширение океанского дна компенсируется. И такие участки нашли. Ими оказались так называемые активные континентальные окраины, например, по краям Тихого океана. Там тяжелая океанская земная кора погружается под более легкую континентальную, и там же находятся глубоководные желоба, средняя глубина которых около 9 км, большое количество действующих вулканов и очень высокая сейсмичность, как результат взаимодействия пластины океанической коры с мантией, в которую она погружается (рис. 1.13).

Исключительно важным было открытие древней океанической коры на континентах, особенно в горно-складчатых областях. И ведь, что интересно, геологи раньше правильно

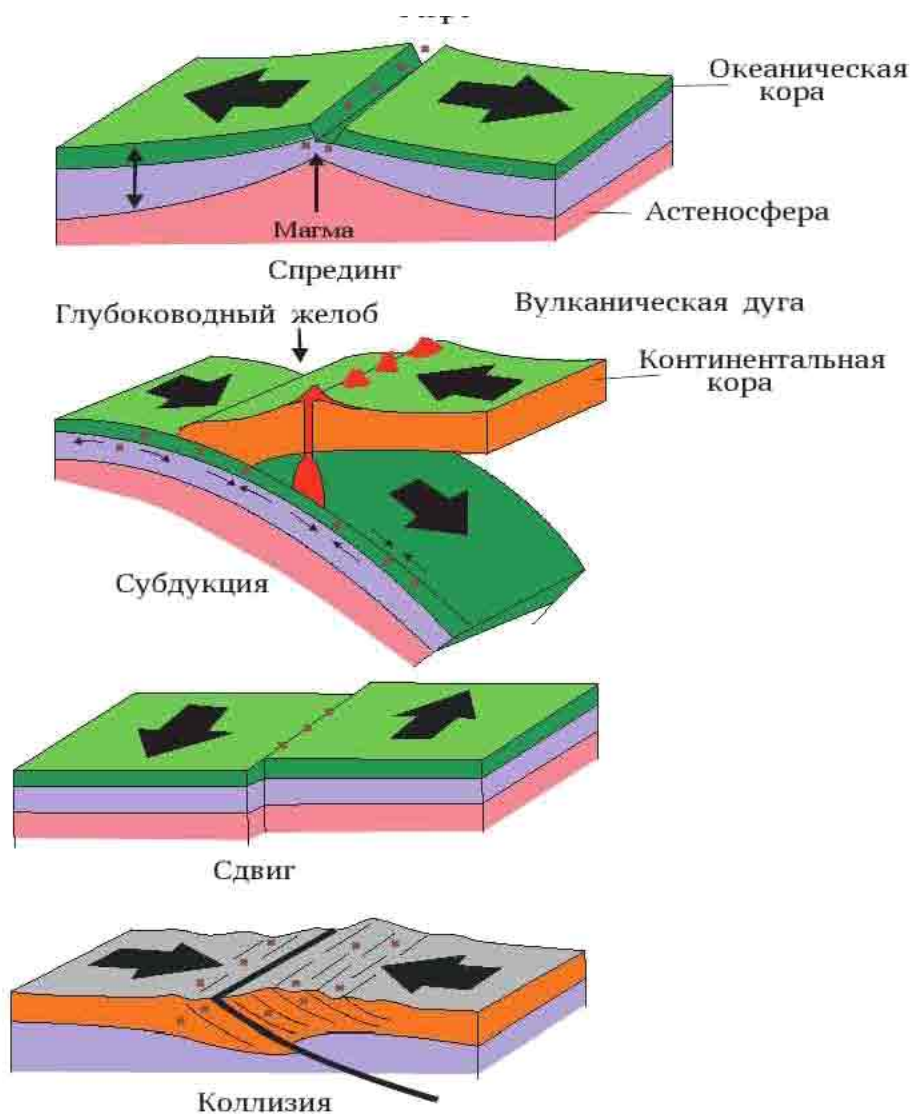


Рис.1.13. Элементы тектоники литосферных плит
(Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

описывали последовательность пород, но не могли ее верно интерпретировать. А вот когда изучили строение и разрез коры в океанах, то поняли, что в виде фрагментов, остатки такой же, но древней коры присутствуют и в горно-складчатых областях. И что же, там в прошлые геологические эпохи тоже был океан? Или, по крайней мере, какой-то бассейн с базальтовой корой океанического типа? В рамках прежней геосинклинальной кон-

цепции это было невозможно понять. Или там, где такие породы находились, как, например, в Тагильской зоне Урала, ширина океана была 10 км? Представить существование такого океана также было невозможно.

С признанием того, что на земном шаре имеют место горизонтальные, причем весьма значительные, перемещения, стала понятна история развития регионов, в которых были обнаружены фрагменты древней океанической коры. Когда-то в этих местах были бассейны с корой океанического типа. Они возникли на континентальной коре, но впоследствии расширялись путем спрединга, т.е. раскрытия океанского дна. А затем закрылись, океаническая кора погружалась под континентальную, возникали островные дуги с характерным вулканизмом, а потом эти регионы подвергались сжатию складчатости и поднятию с образованием гор в результате сближения континентальных массивов (см. рис.1.14).

Подводя итог краткому изложению революционных идей в геологической науке, надо сказать, что этот действительно новый шаг стал возможен благодаря успехам и достижениям в

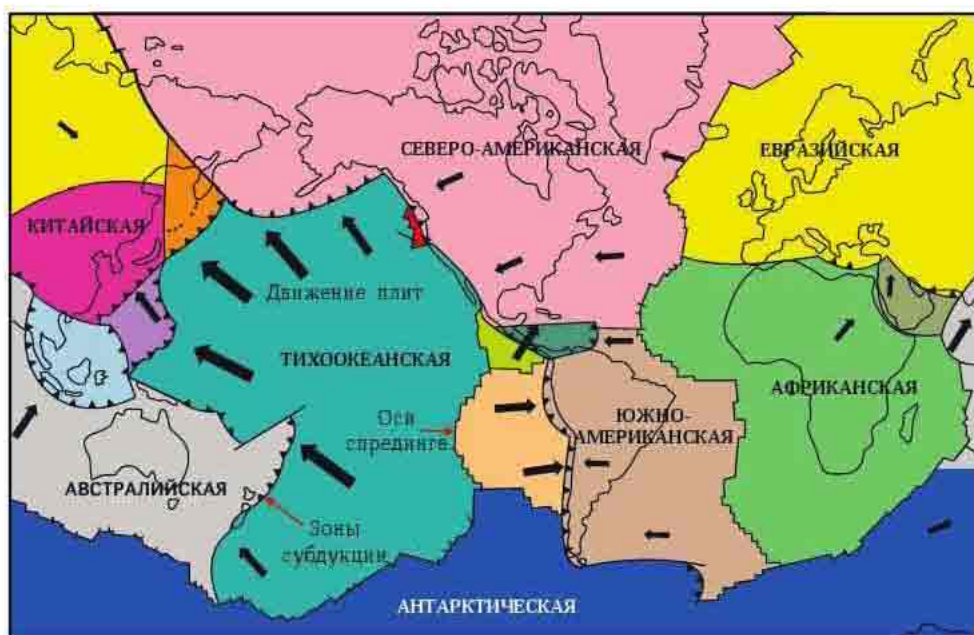


Рис.1.14. Литосферные плиты (по В.Е. Хаину и М.Г. Ломизе)

новых технологиях, особенно в изучении океана, космических исследованиях, геофизике, в частности, сейсмологии.

Становлению тектоники литосферных плит предшествовала длительная и нешуточная борьба в научном сообществе. По существу, первым, кто изложил эту концепцию в общем виде, был метеоролог из Германии Альфред Вегенер (1880–1930), выступивший в 1912 г. с публичной лекцией «Перемещение континентов» во Франкфурте-на-Майне и сразу же подвергшийся яростной критике со стороны геофизиков и геологов.

История жизни А. Вегенера (рис. 1.15) — «отца» новой геологической идеи заслуживает хотя бы краткого описания. Родившись в семье доктора теологии Рихарда Вегенера, он вместе с братом Куртом учился в гимназии и, окончив ее лучшим учеником, поступил в Берлинский университет, где в 1904 г. получил ученую степень по астрономии. В 1906 г. Курт и Альфред установили рекорд мира, продержавшись на воздушном шаре без посадки 52 часа. В этом же году Вегенер поехал с датским этнографом в экспедицию в Гренландию — это было время всеобщего увлечения полярными областями — и они составили описание побережий этого ледяного острова. Вернувшись в Германию и став доцентом Института физики, Вегенер увлекся метеорологией и даже опубликовал книгу о термодинамике атмосферы. Никогда не занимавшийся геологией, он вдруг увлекся ею и увидел, что, оказывается, континенты перемещаются, они двигаются, и этим можно объяснить не только сходство очертаний материков по обе стороны Атлантики, но и другие геологические факты.

В январе 1912 г. Альфред Вегенер выступил с докладом на съезде Немецкого геологического общества, но его соображения были разгромлены. Он не стал вступать в дискуссию с оппонентами и снова уехал в Гренландию, по возвращении из которой его застала война.

Находясь в Марбурге после ранения в руку, он много читает и пишет ряд статей, в которых уже гораздо увереннее обосновывает свою идею о движении материков. В 1924 г. А. Вегенер получает кафедру метеорологии и геофизики в университете г. Граца в Австрии. В апреле 1930 г. с небольшой группой иссле-

дователей из 14 человек он снова отправляется в Гренландию. Эта группа основала в центре ледяного щита Гренландии на высоте в 3 км маленькую станцию «Айсмитте», что означает «середина льдов», состоящую всего из одной палатки. От побережья эта станция находилась в 400 км. Сложности с доставкой грузов собачьими упряжками были огромными, и 1 ноября 1930 г., когда А. Вегенеру исполнилось 50 лет, он вместе с эскимосом Расмусом Виллумсеном отправился со станции к побережью за грузом. Больше их никто живыми не видел.



Рис. 1.15. Альфред Вегенер

12 мая 1931 г. новая группа людей со станции на побережье Гренландии двинулась к Айсмитте и где-то в 190 км в ледяном щите обнаружили лыжи и палки, воткнутые в снег и рядом тело А. Вегенера, скончавшегося, скорее всего, от инфаркта. А Росмуса Виллумсена так и не нашли. Альфреда Вегенера оставили там, где его и обнаружили, и теперь над его ледяной могилой возвышается железный крест из бурильных труб. Так отмечено место погребения ученого, идеи которого, изменившие геологию, нашли подтверждение только полвека спустя.

Геолог Р.Г. Чемберлен уже в 1926 г. на конференции в Нью-Йорке сказал: «Поверив в гипотезу А. Вегенера, мы должны будем забыть все, что узнали за последние 70 лет и начинать все сначала». Это было драматическое заявление. Борьба с идеями А. Вегенера продолжалась до конца 60-х годов XX века, после чего перестройка взглядов практически всех геологов за рубежом была завершена, но не у нас, где этой идее упорно сопротивлялись до последних лет, да и сейчас еще находятся геологи, которые высказывают сомнения.

Следует отметить, что еще за 150 лет до А. Вегенера М.В. Ломоносов, обратив внимание на сходство очертаний материков в Атлантическом океане, высказал мысль о том, что материки, которые находятся по обе стороны Атлантического океана, могли в прошлом быть вместе.

После того, как А. Вегенер впервые высказал свою идею о существовании 200 миллионов лет назад единого, огромного материка Пангея и его последующего распада, о ней, по существу, забыли, а если и упоминали, так для того, чтобы продемонстрировать нелепость этого предположения. Уничтожающая критика идей А. Вегенера происходила с позиций и взглядов, которые было очень трудно изменять геологам, впитавших их «с детства», если можно так сказать. Неприятие новых идей, сильно отличающихся от господствующих взглядов, основывалось на том, что эти взгляды надо было в корне менять. А этого совсем не хотелось, особенно пожилым ученым.

Прекрасное изложение начала и становления идей о перемещении континентов можно найти в замечательной книге профессора Бирмингэмского университета Э. Хэллеме «Великие геологические споры».

На дне океана

30 лет назад с помощью глубоководных обитаемых подводных аппаратов в океанах были обнаружены участки с выходами на поверхность океанического дна горячих рудоносных растворов, формирующих современные месторождения сульфидных руд. Это было, вне всякого сомнения, одно из крупнейших открытий нашего века. Впервые исследователи получили возможность непосредственно наблюдать образование рудных месторождений. Гидротермальные растворы далеко разносят рудное вещество, оседающее на океанское дно, образуя металлоносные осадки, сведения о которых в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия поступили еще около 100 лет назад. В настоящее время эти осадки хорошо изучены в ряде мест, особенно во впадинах Красного моря. Вокруг выходов струй гидротермальных растворов, т.н. «черных курильщиков», была обнаружена фауна, приспособившаяся к высоким температурам

и необычным условиям обитания. Для геологов было исключительно важно установить, что современные залежи сульфидных руд в океанах имеют аналоги в древних складчатых областях в виде месторождений меди, свинца, марганца, железа и, таким образом, понять их происхождение.

«Черные курильщики» (рис. 1.16) были открыты в 1978 г. на Восточно-Тихоокеанском поднятии и стало ясно, что именно они являются источниками металлоносных осадков. Глубоководное бурение с кораблей «Гломар Челленджер» и «Джоидес Резолюшн» позволило установить их присутствие в осадочных толщах океанического дна. Экспедиции с применением подводных обитаемых аппаратов позволили детально описать постройки черных и белых «курильщиков», сделать великолепные снимки и фильмы, благодаря которым каждый из нас может воочию наблюдать это природное явление.

Гидротермы разного типа обнаружены в океанических рифтах — протяженных впадинах, образующихся в результате разрыва земной коры. Рифтовые зоны, обладающие разной скоростью спрединга, представляют собой расходящиеся границы литосферных плит. Повышенный тепловой поток в этих зонах связан с многочисленными неглубоко залегающими магматическими очагами, из которых и происходят излияния базальтовой магмы, наращивающей океаническое дно. В 1986 г. одна из впадин этого рифта — Гуаймас в Калифорнийском заливе — была детально изучена экспедицией АН СССР на корабле «Академик Мстислав Келдыш».

Калифорнийский рифт обладает крутыми стенками, образовавшимися в результате разломов — сбросов, а самые молодые разломы возникли всего лишь 50–100 тыс. лет назад. Гидротермальное поле, исследованное с помощью наблюдений из подводных обитаемых аппаратов, сосредоточено у осевой, наиболее трещиноватой части дна рифта и состоит из многочисленных конусовидных построек, высотой до 50–70 м и диаметром в основании до сотен метров, но чаще всего в 20–30 м. Морфология конусов различная. Встречаются крутые конусы с острой вершиной; пологие — с «башенкой» в верхней части; конусы, меняющие свою крутизну и т. д. На вершине конусов находится сооружение, напоминающее каменную трубу, из от-

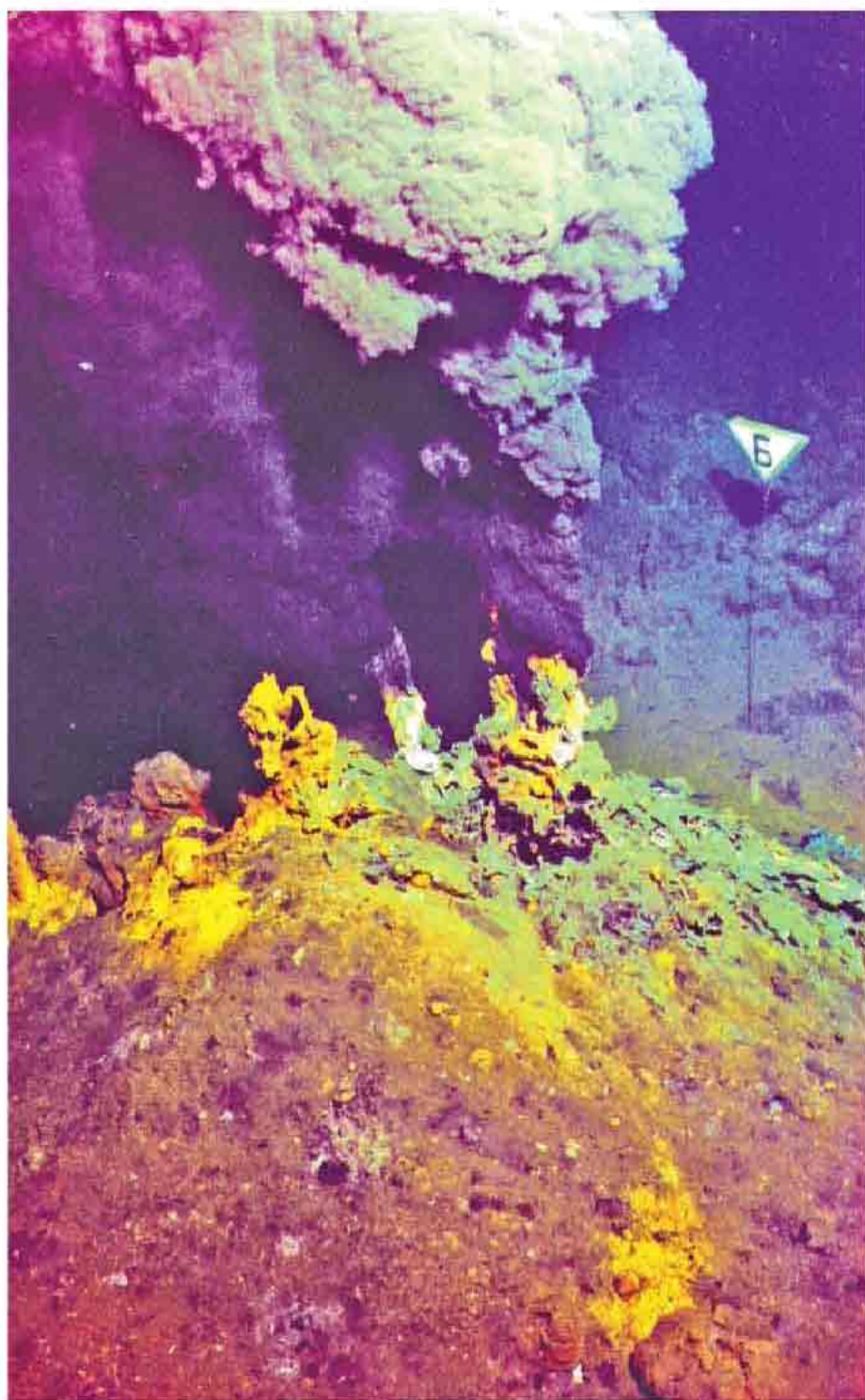


Рис. 1.16. Черный курильщик (фото О.Г. Сорохтина)

верстия которой вырывается черная взвесь, похожая на клубы густого дыма, поэтому такие образования и назвали «черными курильщиками».

У действующих курильщиков температура взвеси, выходящей из отверстий труб, достигает 320°C. Иногда вместо конусов с поверхности дна поднимаются вертикальные колонны высотой 10–25 м, на вершине которых располагаются одна или несколько труб.

На поверхности башен, колонн и конусов, сложенных шлакоподобным веществом, располагаются, как наросты на березе, бактериальные маты — скопления бактерий, прикрепленных к субстрату и, кроме того, весьма необычные организмы — вестиментиферы в форме крупных и длинных (1,5–2 м) трубок, белого, красного и зеленого цветов, колышущихся при движении воды, как щупальца какого-то животного (рис. 1.17). Эти организмы являются большими трубчатыми червями, верхняя часть которых окрашена в ярко-красный цвет, т.н. султан, а сама трубка обладает перламутровой белой или зеленоватой окраской. Вокруг построек в изобилии распространены очень крупные, до 25 см в длину, матово-белые раковины двустворчатых моллюсков — калиптоген, а также кольчатые черви, названные помпейскими, потому что они непрерывно посыпаются, как пеплом, частицами серы из взвеси «черных курильщиков».

Таким образом, гидротермальные постройки на дне океанских рифтов обрастают неповторимым сообществом организмов, приспособившихся к жизни в экстремальных условиях высоких температур и большой концентрации густой взвеси, поступающей из труб на вершинах построек.

Те формы построек, которые мы видим на поверхности океанического дна, представляют собой лишь небольшую часть гидротермальной системы, находящейся ниже его уровня. Морские воды, проникая на многие сотни метров по трещинам и разломам формирующейся рифтовой зоны в осадки и базальты океанической коры, нагреваются и обогащаются рядом химических, в том числе, рудных элементов. Такие гидротермальные растворы уже активно взаимодействуют с вмещающими породами, изменяя их и превращая в сульфидные руды.



Рис. 1.17. Вестиментиферы у черных курильщиков
(фото О.Г. Сорохтина)

Вся эта сложной формы колонна измененных пород превышает во многих случаях 0,5 км, т.е. больше Останкинской телебашни, а в ее центре находятся подводящие каналы, по которым циркулируют гидротермальные растворы, выходя на поверхность дна в виде труб «черных курильщиков». Так возникают мощные рудные залежи.

Весьма поучительно, что в древних месторождениях медно-колчеданных руд, например, на Урале (Сибайское месторождение) или на Кипре и Ньюфаундленде геологи находили окаменелые остатки вестиментифер и калиштоген. Но только после обнаружения современных «черных курильщиков» стало ясно, в каких условиях формировались эти месторождения геологического прошлого.

Гидротермальные образования в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, характеризующихся низкой, средней и высокой скоростью спрединга, в целом похожи, хотя существуют и некоторые различия. Там, где скорость спрединга высокая, гидротермальные образования располагаются внутри осевого, наиболее молодого ущелья, находящегося в центральной части рифта, причем, они связаны с открытыми трещинами, т.н. гьярами. Если скорость спрединга низкая или средняя, гидротермальные постройки могут располагаться и вне трещин, например, в Срединно-Атлантическом хребте.

Откуда берется рудное вещество в гидротермах? Несомненно, что решающую роль играют вулканические породы — базальты океанического дна и извержения базальтов, которые происходят в рифтовых зонах, наращивая океаническую кору. Как возникают собственно гидротермальные растворы — флюиды? Основным их источником является вода океанов, просачивающаяся вглубь океанической коры, сложенной базальтами. Для такого процесса вполне достаточно даже мелких, до 3 мм шириной, трещин, хотя широко развиты и более крупные, зияющие трещины. Они могут рассекать всю океаническую кору в осевых зонах срединно-океанических хребтов на глубины в несколько километров. Так, для Исландии достоверно установлено просачивание океанских вод на глубину до 3 км.

Факт глубокого проникновения в океаническую кору воды устанавливается и по изменениям древних аналогов современной океанической коры — офиолитовых комплексов, в которых влияние воды на процессы изменения пород затрагивает глубоко залегающие слои.

На циркуляцию воды влияет повышенный тепловой поток в рифтовых зонах, способный вызвать ее неустойчивость и конвективное перемещение. Неустойчивое состояние воды достигается при разных температурах в зависимости от давления. Так, при давлении в 250 бар критическая температура равна 375°C, а при $P=700$ бар $\sim 500^\circ\text{C}$. Высокие температуры на глубине приводят к тому, что вода устремляется к поверхности, в сторону понижения давления.

Породы, располагающиеся непосредственно над магматическими очагами в рифтах, глубина залегания которых около

2–4 км, долгое время остаются горячими, и если до их уровня просачивается вода, то быстро охлаждаясь и уплотняясь, они растрескиваются, что облегчает дальнейшее проникновение воды. Область над очагом, по-видимому, является тем местом, где океанская вода, будучи сильно разогретой, активно взаимодействует с породами, извлекая из них ряд элементов.

Рудное вещество в гидротермальных струях осаждается на дно рифта в виде металлоносных сульфидных осадков. Так образуются слоистые залежи колчеданных руд. Металлоносные осадки впадины Атлантик II в Красном море являются современным рудным месторождением, и если бы не экологические проблемы, его можно было бы пустить в эксплуатацию. По данным новейших исследований за последние 3600 лет во впадине Атлантик II накапливалось: железа – 1780 тонн в год; марганца – 742 тонн; цинка – 110 тонн; меди – 23 тонн. Нетрудно представить, какой огромный объем руд мог сформироваться только в одной этой впадине, тянущейся вдоль оси Красного моря всего лишь на 14 км при ширине 5 км.

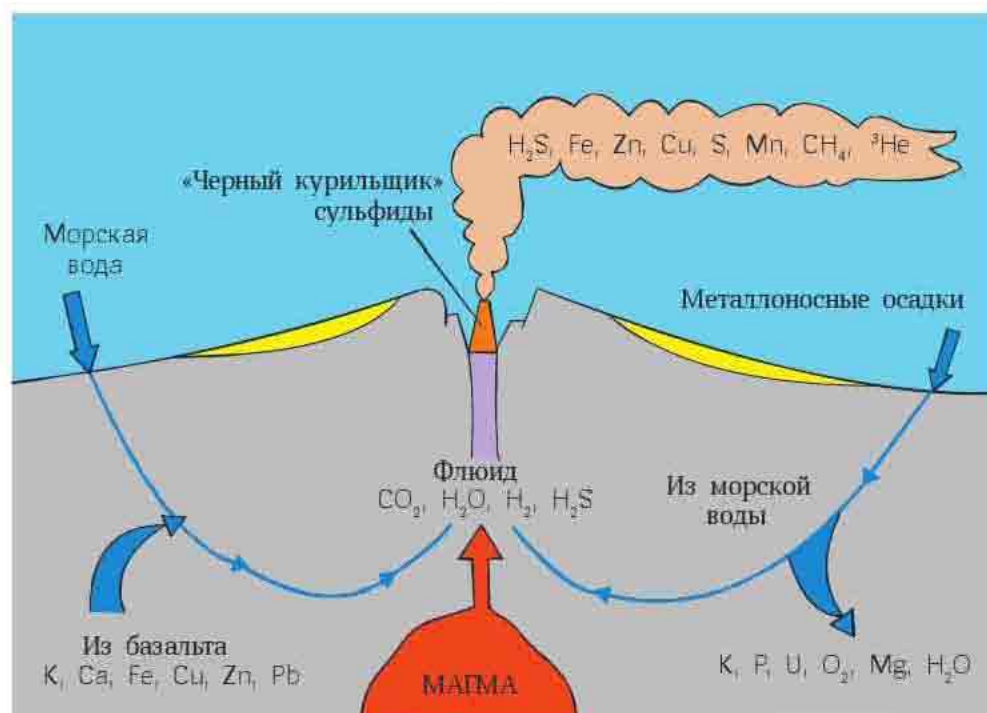


Рис. 1.18. Гидротермальная система срединно-океанического хребта (по Д. В. Гричуку)

Открытие в конце 70-х годов нашего века в рифтовых зонах дна океанов горячих источников, выносящих огромное количество рудного вещества, состоящего из сульфидов железа, меди и цинка, позволило геологам воочию увидеть, каким образом формируются рудные месторождения. «Черные курильщики» распространены в большинстве рифтовых зон океанов. Но рудные залежи образуются не только в гидротермальных постройках. Взвесь, содержащая рудные компоненты, разносится течениями на большое расстояние от «курильщиков» и, осаждаясь, формирует металлоносные осадки (рис. 1.18).

То, что читатель узнал о рудных постройках в океанах, до последнего времени нам абсолютно неизвестных, говорит об открытиях, которые еще будут сделаны, т.к. технология и техника исследований не стоит на месте, и мы все больше убеждаемся во взаимодействии геосфер в Земле. Действительно, не существовал бы особый слой на границе внешнего ядра и мантии, не было бы медленно поднимающихся нагретых струй-плюмов; не было бы плюмов — не происходил бы спрединг — раскрытие океанов, не возникали бы очаги магмы и не формировались бы «курильщики», рудные столбы с фауной, ранее нам не известной. Иными словами, биосфера, гидросфера, кора, мантия, внешнее ядро — все оказывается в тесном взаимодействии, которое нельзя разорвать.

КАТАСТРОФА, ПРИШЕДШАЯ С НЕБЕС

Заголовок может показаться странным. Однако ничего удивительного в нем нет. Все, конечно, слышали о метеоритах — небесных пришельцах, время от времени падающих на Землю. Удар даже сравнительно небольшого метеорита о поверхность Земли, учитывая их огромные скорости, — это всегда катастрофа, размеры которой зависят от диаметра упавшего космического тела. Сейчас известны десятки следов столкновения крупных метеоритов с Землей, и при этом ударные кратеры имеют размеры до 200–300 км в диаметре и возраст до 2 млрд лет. С наиболее крупными кратерами связаны месторождения никеля, золота, алмазов. Поэтому так важно изучение следов «бомбардировки» Земли космическими телами в геологическом прошлом.

Метеориты

Видимо все слышали о Тунгусском «метеорите», взорвавшимся над западной частью Восточной Сибири 30 июня 1908 г. В 1947 г. обломки метеорита упали в горах Сихотэ-Алинь на Дальнем Востоке. Сталкивались небесные тела с Землей и в прошлые геологические эпохи. И размеры их были огромные, больше 10 км в диаметре! А столкновение с землей космического тела диаметром в 1 км на скорости 7–14 км/сек — это уже катастрофа. Метеориты падали, падают и будут падать на поверхность земли. Но только в конце XX века поняли, что

падение таких космических тел — это серьезная опасность для человеческой цивилизации, и надо предпринимать какие-то действия, способные хотя бы предвидеть катастрофу, а еще лучше, попытаться ее предотвратить.

Метеориты — это твердые тела космического происхождения, достигающие поверхности планет и при ударе образующие кратеры разного размера в зависимости от диаметра метеорита. Источником метеоритов является в основном пояс астероидов — твердых космических тел, обращающихся вокруг Солнца на орбите между Марсом и Юпитером на расстоянии 1,7–4,0 а.е. 1 астрономическая единица (а.е.) = 150 млн км — расстояние от Земли до Солнца). В этом поясе насчитывается сотни тысяч астероидов и некоторые из них обладают большими размерами. Например, астероид Церера, открытый в 1800 г., имеет диаметр около 1000 км, Веста и Паллада ≈ 500 км, Гигея — около 400 км. Астероиды образуют семейства, и присутствие в семействе наиболее крупного астероида показывает, что более мелкие образовались за счет столкновения между собой, распада и дробления больших тел.

Почему возник этот пояс гигантских обломков? Было предположение, что на этой орбите была планета, которую называли Фазтон, что означает «сверкающий, блистающий». Это название восходит к древнегреческому мифу о Фазтоне, сыне Гелиоса, не сумевшего совладать с огненной колесницей, которую он выпросил у своего отца, за что Зевс пронзил его молнией, и пораженный ею Фазтон превратился в сверкающую блестящую звезду. Интересно, что согласно правилу планетных расстояний Тициуса-Бодде расстояния планет от Солнца увеличиваются в геометрической прогрессии: $R = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$, где $n = 0$ для Венеры, $n = 1$ для Земли, $n = 2$ для Марса, $n = 4$ для Юпитера. А где $n = 3$? Вот это как раз и место для планеты Фазтон.

Но исследования показали, что суммарная масса всех астероидов в этой области слишком мала (4% массы Луны), а различия химического состава астероидов исключают возможность их образования из одного тела. Так что, скорее всего, это не разрушенная планета, а «планета», которая не смогла образоваться из-за гравитационного влияния Юпитера и других планет-гигантов.

В настоящее время в Центре малых планет Смитсоновской астрофизической обсерватории зарегистрировано более 36000 астероидов, орбиты их известны и каждый имеет свой номер. Количество пронумерованных астероидов около 300 тысяч. Более половины из них обнаружены за последние 15 лет. Опасными для Земли являются только те астероиды, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли. Конечно, таких астероидов гораздо меньше, однако их не так уж мало, и все они представляют для нас известную угрозу, их надо обнаруживать и следить за ними. Поэтому еще в 2000 г. в Великобритании была образована комиссия по астероидной опасности, а в России проведены совещания на такую же тему в 1997 и 2000 гг.

Недавно в журнале *Nature* была опубликована интересная статья о «размножении» астероидов, вызванном давлением Солнечного ветра, под воздействием которого астероид начинает все быстрее и быстрее вращаться и, наконец, разламывается на две части, причем всегда разные. Сейчас известно 35 таких астероидных пар, часть из которых обращается по своим орбитам, а другие — по новым. Периодически в средствах массовой информации появляются пугающие сообщения о сближении астероидов с Землей.

Так что же нам известно об этой планетарной угрозе? Имели ли место в прошлом катастрофы космического происхождения, существует ли возможность предсказания в будущем и, наконец, каковы прогнозы возможности предотвращения этой угрозы?

Источником метеоритов является в основном, как уже говорилось, пояс астероидов. Когда космическое тело входит с большой скоростью в атмосферу Земли, его поверхностные слои, разогреваясь, могут расплавиться и тело «сгорит», не достигнув поверхности нашей планеты. Однако у крупных тел прогревается лишь поверхностный слой. Они достигают земной поверхности, а их вес может составлять десятки тонн. Сихотэ-Алиньский метеорит, упавший в 1947 г., дал примерно 30 тонн осколков.

Огромное количество собранных метеоритов позволило подробно их классифицировать по соотношению химических элементов, их изотопного состава и структуры. Подавляющее

число метеоритов, более 50%, — каменные, около 45% — железные и 5% — железокаменные. Среди каменных выделяются *хондриты* и *ахондриты*. Хондриты имеют в своей структуре мелкие шарики-хондры, размером в несколько миллиметров, образовавшиеся из расплавленного силикатного вещества и включенные в основную массу, состоящую из разных фрагментов. По химическому составу хондриты близки к составу Солнца, разумеется, без учета водорода и гелия, что может служить свидетельством образования хондритов и Солнца из единого облака. Ахондриты не содержат хондр и образовались в результате плавления пород, напоминающих базальты.

Железокаменные метеориты (палласиты) состоят из никелистого железа (7–16%), силикатного материала и иногда сульфида железа. Силикатный материал — кристаллы оливина, распределен в никелистом железе. Железные метеориты почти полностью состоят из никелистого железа с редкими силикатными включениями.

Происхождение метеоритов связывается с формированием планет Солнечной системы и образованием первичных «комков» — *планетезималей*. Эти комки росли за счет захвата более мелких планетезималей, формируя таким образом малые тела — астероиды, в которых благодаря разогреву за счет распада короткоживущих изотопов алюминия и железа (^{26}Al и ^{60}Fe), ныне не существующих, происходило частичное плавление вещества и его дифференциация с образованием металлической и силикатной частей. Железные метеориты как раз и являются обломками железо-никелистых ядер подобных малых космических тел. Возраст метеоритов, соизмеримый с началом формирования Солнечной системы, оценивается разными изотопными методами примерно в 4,5 млрд лет.

В последние годы в антарктических льдах, а также в Египте, Нигерии, Индии, США, Бразилии и в некоторых других местах были обнаружены необычные по химическому составу SNC-метеориты (по первым буквам их собственных названий: *Shergotty*, *Nakhla*, *Chassigny*). Содержание в них редкоземельных элементов, особенности минерального состава и изотопов кислорода и структура пород делают их похожими на земные базальты и заставляют предполагать, что родительское тело

этих метеоритов по размерам было сопоставимо с Землей. Радиометрический возраст метеоритов SNC небольшой, всего $1,3 \pm 0,1$ млрд лет, по сравнению с обычным возрастом метеоритов приблизительно в 4,5 млрд лет. Ряд американских ученых высказали предположение, что метеориты SNC являются породами с Марса, выбитыми оттуда в результате столкновения с Марсом какого-то космического тела. Это предположение было подтверждено Ю. А. Шуколюковым, С. С. Ассоновым и Л. Булгаковой при изучении соотношения изотопов ксенона — отмечено необычно высокое отношение ксенона-129 и ксенона-132 в марсианских породах. Время выброса обломков с Марса оценивается в 180 млн лет назад, а их взаимное столкновение между собой или с другими обломками — в 11,0, 2,6 и 0,6 млн лет до того, как эти метеориты попали на поверхность Земли.

Если на Земле встречаются метеориты, представляющие собой породы Марса, то, может быть, стоит поискать на Луне породы ранней Земли, выбитые метеоритами в период интенсивной бомбардировки нашей планеты 4,2–3,9 млрд лет назад? В журнале «*Nature*», недавно были опубликованы данные о древнейших породах на Земле возрастом 4,5 млрд лет. Конечно, это не сами породы, т.к. они образовались из магмы всего 62 млн лет назад, а вот магма — расплав, который сохранил древнейшее вещество, и изотопные хронометры не ошиблись. Точно так же, в метеорите 2364 (Марокко, 2004 г.) изотопный возраст алюмокальциевых включений составил 4,568 млрд лет! Это самое древнее вещество, известное ученым, хотя цирконы из Австралии обладают возрастом 4,3 и даже 4,4 млрд лет. Так наука подбирается к началу жизни нашей планеты.

Железные метеориты занимают по распространенности второе место и представляют собой твердый раствор никеля в железе, при этом содержание никеля сильно колеблется. В настоящее время наиболее крупным обнаруженным метеоритом является железный метеорит Гоба, упавший в Намибии примерно 80 тыс. лет назад. Этот метеорит, весом около 60 тонн, лежит практически на поверхности земли, не образовав при своем падении почти никакой воронки! Возможно атмосфера так замелила его падение, что при ударе о землю не произошло значительного выделения энергии. Сейчас метеорит — объ-

ект для многочисленных туристов, желающих посмотреть на «кусок железа», свалившийся с неба.

В горах Сихоте-Алиня 12 февраля 1947 года произошел сильный взрыв. Когда предполагаемое место взрыва посетили, то оказалось, что на одной из сопок действительно было много воронок разного размера. А самая большая имела диаметр в 27 метров и до 6 метров в глубину. В этих воронках лежали обломки метеорита на 99% состоящие из железа, самый крупный кусок весил 1,75 тонн. Обломков было так много, что самые мелкие еще до сих пор не найдены. В этом железном метеорите только 1% примесей серы, фосфора и кобальта. Повидимому, большой железный метеорит при входе в плотные слои атмосферы нагрелся и разрушился, а его обломки упали на площади в десятки квадратных километров. Надо отметить, что падение такого крупного метеорита было единственным в XX веке.

Железокаменные метеориты, занимающие по распространенности третье место, состоят из смеси силикатного каменного материала и никелистого железа, который вкраплен в каменный материал как в губку.

Возраст метеоритов, определенный радиоуглеродным уран-свинцовым и рубидий-стронциевым, т.е. наиболее точными методами, составляет 4,4–4,6 млрд лет, что соответствует возрасту формирования Солнечной системы и, в том числе, Земли. Следовательно, и планеты, и тела, из которых впоследствии образовались астероиды и метеориты, возникли одновременно.

На Земле обнаружены метеориты с Луны и даже с Марса. Общий вес лунных метеоритов более 2 кг, а марсианских — около 80 кг! Причем их происхождение, благодаря точным геохимическим исследованиям, можно считать твердо доказанным. Метеориты с Марса, общим числом 12, частично были найдены в XIX веке, а несколько — в XX веке.

Наибольший интерес представляет знаменитый метеорит ALH 84001 весом 1930,9 г, найденный в 1984 г. в Антарктиде. Его история такова: 16 млн лет назад он был выбит с поверхности Марса ударом какого-то большого метеорита и, попав в поле притяжения Земли, упал в Антарктиде 13 000 лет назад, а недавно вытаял из льда,

был подобран американскими геологами в 1984 году, и только через 10 лет, в 1994 году, геохимики точно идентифицировали его как осколок породы с Марса.

Любопытно, что в 1996 г. в этом метеорите были обнаружены окаменевшие остатки, чрезвычайно похожие на первые прокариоты — цианобактерии размером $(2-10) \cdot 10^{-6}$ см, располагавшиеся внутри глобул, состоящих из сульфидов и сульфатов железа и окислов, возраст которых определен в 3,6 млрд. лет. Иными словами, метеорит, несомненно, марсианского происхождения, т.к. изотопный состав кислорода и углерода глобул идентичен таковому в марсианских газах, определенных в породах Марса на его поверхности космическим аппаратом «Викинг» еще в 1976 году. И конечно, возникает вопрос, а не было ли жизни на Марсе, и не занесена ли она к нам на Землю? Тем более что космический аппарат «Оппортьюнити» (*Opportunity*) нашел на Марсе дигидрат сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а это — вода. Мало того, в метеоритах с Марса и на самом Марсе были обнаружены аденин и гуанин внеземного происхождения, а также части нуклеотидов, из которых и строится «жизнь».

Кометы

Кометы всегда поражали воображение людей, видевших в них предзнаменование каких-то исключительных событий. Кометы состоят из головной части, или комы, и хвоста, часто видимого невооруженным глазом. Кома представляет собой шарообразный сгусток газов и пыли, окружающий ледяное ядро, а хвост — газовый или пылевидный материал комы, сдуваемый с нее давлением солнечного ветра и всегда направленный в сторону противоположную Солнцу (рис. 2.1). Ядра комет имеют размеры всего лишь 1–5 км, редко 10–20 км. Состав ядра — лед, диоксид углерода, метиловый спирт и аммиак. Изучение кометы Галлея с помощью космических аппаратов «Джотто» и «Вега 12» показало ее высокую температуру за счет космической пыли, около $+110^\circ\text{C}$ на стороне, обращенной к Солнцу, размер неправильного по форме ядра составлял $8,2 \times 8,5 \times 16$ км.

Особенность движения комет заключается в их необычных орбитах. Существует два класса комет: короткопериодические и долгопериодические. Короткопериодические кометы имеют сравнительно близкие орбиты, с периодом менее 200 лет и малым наклонением к плоскости орбиты Земли. Долгопериодические кометы имеют очень вытянутые орбиты, порядка тысяч астрономических единиц, и появляются со всех наклонений. Источником последних считается облако



Рис. 2.1. Комета Хейла-Боппа 1997 г.

Оорта, идея о существовании которого была предложена нидерландским астрофизиком Яном Оортом в 1950 году. Оно представляет собой как бы оболочку периферии Солнечной системы на расстоянии около 150 тыс. астрономических единиц. Из-за различных возмущений отдельные кометы «сходят с рельсов» и устремляются в пределы Солнечной системы. Под влиянием излучения Солнца ядра комет постепенно «тают» и они прекращают свое существование.

Ранее считалось, что источником короткопериодических комет служит пояс Койпера, расположенный за орбитой Нептуна и содержащий огромное количество тел с размером в 1 км и более. Однако наблюдения, проводимые с середины 1990-х годов, показали, что пояс Койпера динамически стабилен. Настоящий источник этих комет, вероятно, рассеянный диск — динамически активная область, слабозаселенная малыми телами, в основном состоящими из льда, и расположенная за поясом Койпера.

Сталкивались ли кометы с Землей? Достоверных следов не зафиксировано. Большие подозрения вызывает Тунгусское событие, произошедшее 30 июня 1908 г. Скорее всего это была комета или ее часть, размером до 100 м, которая затормозилась

и нагрелась в атмосфере, что вызвало взрыв на высоте в несколько километров. Но с тех пор, сколько ни искали, хотя бы мельчайшего кусочка метеорита найдено не было.

Астроблемы — звездные раны Земли

Вопросами падения метеоритов на Землю ученые начали задаваться еще в начале XIX века, когда были высказаны предположения о метеоритном происхождении лунных кратеров. В середине XX века было доказано, что знаменитый Аризонский кратер диаметром до 1200 и глубиной 180 метров связан с падением метеорита 50 тыс. лет назад (рис. 2.2). Метеорит был железный, диаметр имел около 50 м и массу до 300 тыс. тонн. Скорость его сближения с Землей была ~20 км/с. Несмотря на то, что гипотезу о происхождении Аризонского кратера высказывали еще более 100 лет назад, его метеоритная природа была доказана лишь в 1962 г.

А есть ли другие крупные астроблемы (греч. *astra* — звезда, *blema* — рана) на Земле, и вызывало ли падение метеоритов катастрофические последствия? Безусловно, да. Но прежде давайте рассмотрим проблему столкновения метеорита с Землей и те процессы, которые сопровождают это явление.

Крупные метеориты, размером в сотни метров при столкновении с поверхностью Земли имеют очень высокую скорость, например, 7–13 и даже 20 км/с, что намного превышает скорость звука в горных породах.

Естественно, что при ударе тела, летящего с такой скоростью, на земной поверхности возникают колоссальные давления, превышающие 3000 МПа, а температура при этом может составлять несколько десятков тысяч градусов. Возникает гигантская ударная волна, распространяющаяся во все стороны со сверхзвуковой скоростью; горные породы мишени претерпевают скачкообразное изменение — метаморфизм; они дробятся, образуя брекчию (раздробленные породы). Ударная волна оказывает разное воздействие на породы Земли. Вблизи места упавшего космического тела они просто испаряются, несколько дальше — расплавляются, а далее преобразуются и дробятся. И через несколько десятков секунд начинается выброс всех этих



Рис. 2.2. Аризонский кратер (cometasite.ru)

материалов из кратера в стороны, т.к. в породах мишени после сверхвысокого сжатия наступает разрежение, и они выбрасываются, образуя вал по краю кратера, в котором перемешаны все типы образовавшихся новых пород.

Горные породы, возникающие при мгновенном ударном событии, называются импактными (*impact* — удар) и подразделяются на три группы: 1) импактированные породы, т.е. подвергнутые воздействию ударной волны; 2) расплавленные породы; 3) импактные брекчии. При таких огромных и мгновенно возникающих давлениях и температурах в минералах образуются специфические структуры, связанные со скольжением блоков кристаллической решетки относительно друг друга (т.н. планарные элементы), и в итоге минерал превращается в изотропное вещество. При давлениях в 45–60 МПа и температуре в 1500°C минералы становятся аморфными и начинается их плавление. Любопытно, что в процессе удара, некоторые минералы могут переходить в более плотные модификации. Так кварц, с плотностью 2,2–2,5 г/см³ переходит в стишовит с плотностью 2,85–3,0 г/см³; углерод может переходить в алмаз или

лонсдейлит; оливин и пироксен сменяются более плотными модификациями. Ударный метаморфизм не выходит за пределы метеоритного кратера.

На сегодняшний день известно 176 астроблем — настоящих импактных структур, но только 4 из них имеют диаметр от 100 до 300 км. Чтобы образовать кратер таких размеров космическое тело должно быть больше 10 км в диаметре. Наиболее древние астроблемы имеют возраст около 2 млрд лет — Вредефорт в Южной Африке и Садбери в Канаде. Они же обладают наибольшими размерами: Вредефорт — 300 км, Садбери — 250 км.

Импактные события геологического прошлого во многом стерты активными процессами выветривания и эрозии, но все-таки обнаружено много метеоритных кратеров разного возраста. Известно, что активная бомбардировка Земли и Луны происходила около 4 млрд лет назад в относительно короткое время, примерно в интервале 200 000 лет, что по сравнению с возрастом Земли в 4,5 млрд лет, просто мгновение. В недавно изданной книге иркутских ученых Н.В. Задониной, К.Г. Леви и С.А. Язева «Космические опасности геологического и исторического прошлого Земли. Анализ временных рядов» (2007) подведены итоги импактных событий геологического прошлого и показано, что со многими из них могли быть связаны биотические кризисы — массовая гибель организмов. Многие «удары» метеоритов нам неизвестны, т.к. 70% территории земного шара занимает океан, а в геологическом прошлом континенты — литосферные плиты то сходились, то расходились вновь, поэтому метеоритные кратеры просто могли стать недоступными для наблюдений. В каталоге, приведенном в книге, значится 815 импактных событий, хотя не все достоверны.

Трудно представить, какими катастрофическими событиями сопровождалось образование импактных структур большого размера. В случае Вредефорта это половина расстояния от Москвы до С.-Петербурга.

Пожалуй, наиболее изученной является крупная Попигайская астроблема, диаметром около 100 км, располагающаяся на се-



Рис. 2.3. Кольцевой вал Попигайского кратера (bourabai.kz)

вере Восточной Сибири, на краю Анабарского массива древних докембрийских пород. Эта структура образовалась 37,7 млн лет назад при падении космического тела около 5 км в диаметре и очень хорошо изучена российскими геологами. Открыта она была в 1946 г. Д.В. Кожевиным, но метеоритным кратером ее тогда не признали.

Попигайская астроблема, как никакая другая, прекрасно сохранилась, имеет плоское днище в круглой котловине и три вала, окружающие впадину, причем внешний вал представляет собой систему крупных глыб, разделенных разломами различного типа (рис. 2.3). В центре котловины есть погребенное поднятие, глубина разрушенных пород достигает 4 км, а по внешним приподнятым краям имеются радиальные «овраги» длиной до 15 км, образовавшиеся массами, двигавшимися из центра кратера. Вокруг астроблемы распространены закратерные выбросы, которые в настоящее время сильно размывы, но прослеживаются на расстоянии 20–25 км от кратера.

Благодаря хорошей обнаженности краевых валов Попигайской астроблемы, в них детально описаны такие импактные породы как тагамиты и зювиты. Тагамиты — это мгновенно расплавленные породы мишени, очень похожие на лавы, а

зювиты — раздробленные породы, включая породы мишени и тагамиты, а также импактное стекло, образовавшееся за счет мгновенного ударного плавления пород докембрийского фундамента. Взаимоотношения всех этих пород детально описаны и свидетельствуют о перемещивании материала во время ударного взрыва. Очень любопытно внедрение в породы мишени и в импактиты флюидно-расплавленных смесей под очень большим давлением. Такие породы называются флюидолитами, они описаны во многих районах — на Северном Урале, в Приэльбрусье и в других местах.

Чрезвычайно интересно, что в расплавленных импактитах Попигайской астроблемы В.Л. Масайтисом еще в 1970 г. были найдены своеобразные алмазы.

Впервые алмазы, не похожие на обычные, были найдены еще в 1966 г. З.В. Бартошинским в россыпях в Северной Якутии на Анабарском массиве. Эти мелкие уплощенные алмазы, похожие на шлаковые зерна, получили название «якутитов», размеры их колебались от долей миллиметра до 9 мм, с массой около 2-х карат. И только в 1970 г., когда В.Л. Масайтисом, геологом из Ленинграда, было доказано ударное происхождение Попигайской котловины, и в ней были найдены такие же алмазы, стало понятным их происхождение. Месторождение было засекречено, а его изучение заморозили в связи с тем, что в то время в стране строились заводы по производству синтетических алмазов. Рассекретили только в 2012 году.

Удар космического тела был настолько сильным, что раздробленные и частично переплавленные кристаллические породы сейчас находятся на глубинах в несколько километров. Наибольшее мгновенное давление оценивается в 600 ГПа, это 6 млн атмосфер! $1 \text{ атм} \approx 100 \text{ КПа}$. Чтобы в астроблеме образовались алмазы необходимо углеродистое вещество — графит. Последний содержится в древних породах в количестве 10%. Вот из него-то и образовались «импактные» (ударные) алмазы, сильно отличающиеся от своих «родственников» в кимберлитовых трубках.

Следствием ударного метаморфизма является найденный минерал рингвудит (γ -оливин). Вспомните, что рингвудит предполагается в верхней мантии на глубинах более 500 км, где он образуется в результате фазового перехода β -оливина в γ -оливин при высоком давлении и температуре. Вообще существует много минералов — индикаторов ударного метаморфизма, в том числе и высокотемпературных. Все эти минералы прекрасно описаны в интересных книгах С. А. Вишневого «Астроблемы» и Т. В. Посуховой, В. К. Гаранина, К. В. Гаранина «Минералогия месторождений алмаза» (2012).

Попигайская астроблема, одна из немногих, подвергалась детальному изучению в течение 40 лет. Так же хорошо изучена астроблема Нордлингенский Рис в южной Германии. Но она значительно меньше, всего 24 км в диаметре, и моложе — около 15 млн лет.

Опустошительная катастрофа, произошедшая 37 млн лет назад на севере Восточной Сибири, видимо повлияла на природную обстановку на всем земном шаре, особенно на биоту (совокупность всех видов живых организмов), т. к. именно на это время приходится один из биотических кризисов, когда вымерло более 40% семейств морских организмов.

Примерно в это же время происходило образование еще нескольких крупных астроблем: Чезапик Бэй (США), диаметр 90 км; Мистастин (Канада), диаметр 28 км; Гоат-Пэддок (Австралия), диаметр 5,1 км. Вряд ли это случайное совпадение.

Однако наиболее впечатляющая опустошительная катастрофа космического происхождения случилась на Земле 65 млн лет назад. Эта цифра точно отвечает границе мелового и палеогенового периодов. На это время приходится падение 5-ти крупных космических тел, оставивших большие кратеры: Чикскалуб (Мексика, п-в Юкатан), диаметр 170–200 км; Карский (Россия), диаметр 65 км; Мэнсон (США), диаметр 35 км; Каменский (Россия), диаметр 25 км, Болтышский (Украина), диаметр 24 км.

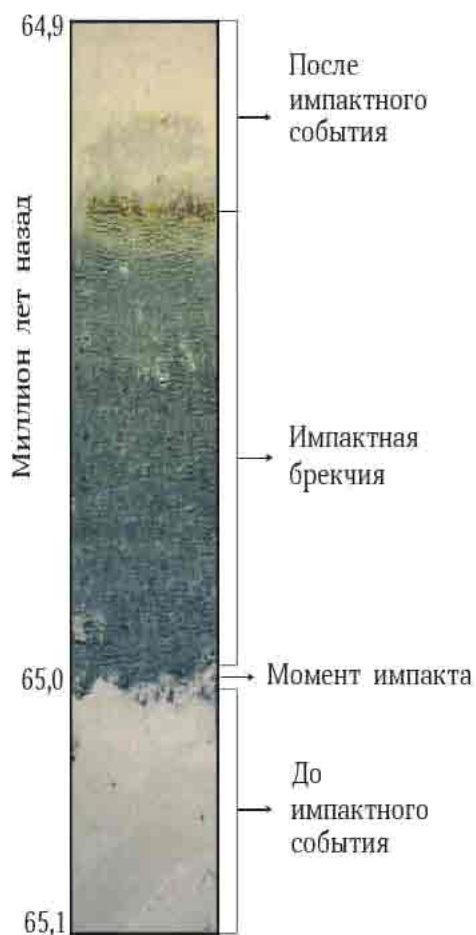
Именно с этим рубежом в истории Земли связывают мел-палеогеновое Великое вымирание биоты, когда исчезло около 80% семейств. Глобальную катастрофу способны вызвать падающие космические тела размером более 10 км, а меньшего диаметра — опустошить отдельный крупный регион.

Так вот, 65 млн лет назад Земля содрогнулась от удара астероида диаметром около 15 км. Мощность этого удара соответствует мощности одновременного взрыва более 8 млн атомных бомб, таких, какая была сброшена (одна!) в 1945 г. на Хиросиму в Японии. Этот взрыв был настолько колоссальным, что в материнских породах его следы прослеживаются до глубины в 100 км при диаметре кратера 170–200 км. Часть его находится на п-ве Юкатан, но больше половины скрыто водами Мексиканского залива. Мощная ударная волна должна была пробежать по всему земному шару, действуя как спусковой крючок на землетрясения или на извержения вулканов. Но, пожалуй, самое главное, это поднятая в атмосферу огромная масса пыли и обломков разного размера. Т.к. породы мишени в этом месте п-ва Юкатан содержат много минерала ангидрида – сульфата кальция, то высокая температура способствовала выделению сернистого газа, убивающего все живое. Пылевая завеса уменьшила солнечную радиацию, температура резко понизилась и наступило похолодание. По-видимому, оно было катастрофическим, т.к. произошло очень быстро. А в это же время шли холодные кислотные дожди, угнетавшие растительность. Фотосинтез, если и не исчез совсем, то сильно уменьшился вследствие уменьшения солнечной радиации. Весь фитопланктон погиб, а с ним и те организмы, которые им питались. Погибло 95% свободно плавающих фораминифер – мельчайших организмов, обитающих в верхней зоне океанических бассейнов.

Скважина глубоководного бурения, заложенная в 563 км от кратера Чикскалуб недалеко от побережья Флориды (США), позволила по поднятым осадкам детально воссоздать события этой величайшей катастрофы (рис. 2.4). На таком расстоянии от кратера в осадках найдены в изобилии тектиты – сферулы из стекла, размером в доли миллиметра, образовавшиеся при конденсации из раскаленных облаков. Обломочный импактный материал выпадал на поверхность Земли в течение нескольких месяцев после события.

То, что эта катастрофа носила поистине глобальный характер, свидетельствует распространенный практически по всему земному шару, как раз на границе меловых и палеогеновых отложений, слой глины, обогащенный иридием, элементом, кото-

Рис. 2.4. Катастрофическое событие 65 млн. лет назад (кратер Чикскалуб) по данным глубоководного бурения в Мексиканском заливе



рый особенно характерен для астероидов и метеоритов. Этот слой, впервые описан Луисом и Уолтером Альваресами в Италии в местечке Губбио в ущелье Боттагонэ, где обнажается толща осадочных пород от верхнего мела до палеогена. В 1979 г. они опубликовали статью в журнале «*Nature*», в которой впервые связали иридиевую аномалию с падением на Землю крупного небесного тела. Сейчас это уже общепризнанный факт, но то, что иридиевые слои связаны именно с импактной структурой Чикскалуб стало ясно только 10 лет спустя, после работ геофизика Алана Хильдебранда из Канадской геологической службы.

Так, шаг за шагом, была расшифрована одна из величайших, мгновенных по своему развитию, катастроф, постигших нашу Землю. Она по своим масштабам превосходит, по-видимому, региональные катастрофы, вызванные меньшими по размерам космическими телами, упавшими на землю примерно в это же время. Но в общую картину Армагеддона они могли внести свою лепту.

Заканчивая рассмотрение катастрофических событий далекого геологического прошлого, нельзя не упомянуть о падении какого-то космического тела в Восточной Сибири, в бассейне реки Подкаменная Тунгуска у с. Ванавара 30 июня 1908 года. Редкие очевидцы говорили, что с востока на запад на небе пронеслось нечто, окутанное не то дымом, не то паром, и вскоре

произошел грандиозный взрыв в глухой тайге, где практически нет населения. Когда в 1921 году на место взрыва пришла экспедиция А. А. Кулика, известного специалиста по метеоритам, то увидела потрясающую картину сплошь поваленных деревьев, а там растут преимущественно лиственницы, причем стволы были направлены радиально от некоторого центра (рис. 2.5). На площади более 2000 км² все деревья лежали и, по-видимому, было уничтожено все живое. Экспедиция искала куски метеорита, так как предполагалось именно его падение. Следы метеорита найдены не были, и с тех пор так ничего и не было обнаружено.

Исследования показали, что на площади около 500 км², т. е. намного меньше, чем площадь поваленного леса, возник пожар и, как свидетельствуют очевидцы, находившиеся в 30–40 км от центра взрыва, он возник одновременно со взрывом. Однако это был скорее не столько пожар, сколько мгновенный ожег стволов со стороны, обращенной к эпицентру взрыва, но не более чем в 30 км от центра. В целом пожар был слабым и быстро прекратился. Тунгусский взрыв ощущался на расстоянии до 1000 км в виде гула, сейсмических колебаний поверхности, световой вспышки. На огромных пространствах в Европе и в Азии отмечались аномальные атмосферные явления, по-видимому, связанные с пылью, поднятой взрывной волной.



Рис. 2.5. Тунгусская катастрофа 1908 г.

В последние 30 лет были проведены многочисленные исследования района Тунгусского взрыва, изучались керны из скважин, пробуренных в разных местах. Практически везде отмечалось аномальное содержание ряда элементов, в частности, изотопа ^{15}N — тяжелого азота, был обнаружен иридий, а в торфе — изотоп ^{13}C . Многие геохимические особенности изотопов разных элементов свидетельствуют в пользу кометной природы Тунгусского тела.

Любопытные исследования были проведены итальянскими учеными. Они разыскали вблизи эпицентра деревья, пережившие катастрофу. Сделали из них поперечные распилы, подсчитали годовые кольца и пришли к выводу, что кольца 1908–1910 гг. шире остальных (рис. 2.6). Они объяснили это тем, что пережившие взрыв деревья получали больше солнечной радиации, т.к. стояли особняком на открытой местности. В годовом кольце 1908 г. нашли капельки смолы, по-видимому, выступившие при нагреве. Исследовав смолу при большом увеличении, обнаружили импрегнированные, т.е. как бы «вбитые» в смолу микрочастицы — силикатные сферулы и магнетитовые частицы.



Рис. 2.6. Срезы говорят о нормальном развитии деревьев до 1908 г.

Так что же врезалось в Землю утром 30 июня 1908 года? Огромное количество различных исследований, проведенных как российскими, так и зарубежными специалистами, несмотря на многие, еще неясные вопросы, все-таки позволяет сделать вывод о том, что космическое тело, скорее всего, было кометой или ее частью размером около 100 метров, летевшей под углом в 15–30 градусов к поверхности Земли. Нагревшись в атмосфере, оно взорвалось на высоте 7–10 км, вызвав все те сопутствующие события, о которых говорилось выше. Мощность взрыва была 10–50 мегатонн тринитротолуола, и взрывная волна обошла весь земной шар. Безусловно, это была катастрофа века.

Чем же опасны столкновения космических тел с Землей? Тут всё, конечно, зависит от размера, но уже очевидно, что падение тела размером в 10 км или более приведет к глобальной катастрофе, сценарий которой сходен со сценарием «ядерной зимы», разработанным учеными для последствий взрыва многих атомных и водородных бомб.

Какие процессы сопровождают столкновение с Землей крупного астероида или кометы? Это, прежде всего, мощные ударные волны или грандиозные цунами, если тело падает в океан; это повсеместные пожары; поднятые в воздух огромные объемы пыли, способные много месяцев держаться в атмосфере; это выбросы и образование различных смертельно ядовитых газов, в том числе окислов азота. И все эти события приводят к изменению климата — похолоданию, кислотным дождям, пожарам, приостановке фотосинтеза и вымиранию биоты.

В настоящее время существуют компьютерные модели столкновения с Землей астероидов или комет диаметром более 1 км, с массой более 1 млрд тонн и скоростью сближения с поверхностью Земли в несколько десятков километров в секунду. Вычисления показали страшную картину мировой катастрофы. Не так уж важно, астероид это или комета. Последствия в любом случае будут ужасные. Падение крупных астероидов в океан может вызвать цунами высотой более 1 км.

Имеется случай выявленного падения метеорита диаметром до 2 км в море Беллинсгаузена в южных широтах 2,2 млн лет назад, где глубина около 4 км. Плохо выраженный кратер Элтанин был идентифицирован как

ударный разными методами и в том числе наличием иридиевой аномалии и метеоритного вещества в осадочных породах. Можно только догадываться, какой высоты были при таком ударе волны цунами.

Известен еще один кратер — Мьолнир диаметром в 40 км, образовавшийся в результате падения астероида диаметром 3 км в Баренцевом море 142 млн лет назад, когда глубина моря достигала 0,5 км.

Частота падения крупных космических тел на Землю хоть и невелика, но все-таки не равна нулю, и опасные объекты могут встретиться с нашей планетой. Существует более 2000 астероидов, размер которых превышает 1 км, а орбиты пересекаются с земной. Огромный астероид JG, более километра в диаметре, в 1996 г. пролетел рядом с Землей на расстоянии 2,5 млн км! А если бы он столкнулся с Землей? Тогда цивилизации пришел бы конец.

Нельзя не отметить, что удар крупного метеорита о поверхность Земли может послужить спусковым крючком для землетрясений, когда они уже подготовлены в геологической среде и не хватает лишь какого-либо внешнего воздействия, чтобы вывести среду из равновесия.

Но человечество все же осознало угрозу от подобных космических объектов и работает по возможному предотвращению сближения с ними. Предположений, что делать с приближающимся опасным телом — множество, но все они пока находятся в стадии проектов, далеких от своего завершения. Но суть их одна: надо либо разрушить объект, либо изменить его орбиту. При этом, конечно, возникают огромные трудности, начиная от способа доставки к объекту ядерных зарядов; посадки на объект космического корабля, который силой своей двигательной установки изменит орбиту объекта; воздействие лазером на опасное тело, чтобы изменить траекторию его полета. Способов множество. Пока мы лишь можем прочесть в опубликованных таблицах время опасных сближений с Землей космических объектов и радоваться, что в декабре 2012 г. астероид *Toutatis* сблизился с Землей на 0,0463 астрономической единицы, которая равна 150 млн километров. Вот сами и подсчитайте, близко он прошел или нет.

9 ноября 2011 г. мимо Земли, на расстоянии 324,6 тыс. километров пролетел астероид 2005 YU55, размером около 400 метров со скоростью 13,7 км/с. Это расстояние ближе, чем от нас находится Луна (384 тыс. км). Черный астероид не первый раз сближается с Землей. Последнее сближение было в 1976 году, а следующее ожидается только в 2015 г., но тогда он пройдет дальше от нас уже за орбитой Луны. На таких орбитах астероид для Земли не представляет опасности, но за ним тщательно наблюдают.

В последнее время НАСА провела ревизию количества и размеров астероидов, которые могут представлять реальную, вернее, потенциальную, угрозу нашей планете. Их оказалось чуть меньше 20 000, тогда как раньше эта цифра была почти в два раза больше. Сейчас, по уточненным данным о координатах астероидов и их расчетным траекториям, ее понизили почти до 150, но эти, действительно, угрожают нам.

В 2029 г. астероид Апофис, размером в 325 метров пройдет в опасной близости, на расстоянии 37,6 тыс. км от центра Земли, но с ней не столкнется. Но он может пролететь там, где находятся спутники телевизионного вещания, и будет виден как яркая звезда. С другой стороны, как повлияет на орбиту астероида притяжение Земли? И куда он полетит, когда вернется в 2036 г.? Существует идея, а не попробовать ли отклонить его траекторию силами солнечных лучей, соорудив где-нибудь рефлектор, а на астероид посадить маленький радиопередатчик, который бы передавал его точные координаты?

Есть сообщение о том, что в феврале 2013 г. астероид размером в 45 метров и массой в 130 тысяч тонн пролетел над Землей на высоте всего в 34,9 тысяч километров. Это чуть ближе, чем орбиты геостационарных спутников.

12 октября 2011 г. метеорит, размером с большое куриное яйцо пробил крышу дома в пригороде Парижа. Возраст породы, его слагающей, т.н. хондрита, оказался равным 4,5 млрд лет, а его происхождение уверенно связывается с поясом астероидов между Марсом и Юпитером. А 22 апреля 2012 г. метеорит упал в США. Утверждается, что его масса была около 45 тонн, но, войдя в атмосферу Земли, он разрушился, и на поверхности

собрали только 943 грамма — всего 77 осколков. Но их оказалось достаточно, чтобы определить состав метеорита — углеродистый хондрит с возрастом 4,5 миллиарда лет. Предполагается, что он откололся от астероида.

Недавно российские астрономы обнаружили в космическом пространстве астероид диаметром до 80 метров, получивший наименование 2012 DA14, который вполне мог бы столкнуться с Землей в 2013 г.

Падение на Землю астероидов, метеоритов и комет происходило всегда. С момента ее рождения. Размеры этих космических тел были разными и последствия их ударов о поверхность Земли также сильно различались. Раньше на них практически не обращали внимания, но теперь стало ясно, что все эти столкновения играли большую роль в жизни нашей планеты, начиная от образования полезных ископаемых, даже алмазов, до возможных массовых вымираний биоты.

Человечество всегда хотело узнавать о грозящих ему катастрофах заранее. Но как это можно было сделать? Казалось, что появление на небе кометы, солнечное или лунное затмение, возникновение на Солнце темных пятен, полярные сияния — все это предвестники каких-то несчастий, которые обрушатся на Землю. Предсказывали всегда, да ведь и сейчас полно тех, кто готов предсказать все что угодно, по одним только ему ведомым признакам. Ну, а что же ученые, современные исследователи, владеющие последними научными методами, технологиями и аппаратурой, они в состоянии предсказывать падение астероидов, извержение вулканов, землетрясения, обвалы, оползни? Может ли наука вообще давать прогноз? На этот, казалось бы, простой вопрос, однозначного ответа нет. И об этом мы специально поговорим позже, когда будем рассматривать катастрофические процессы и явления.

Книжка уже была закончена, когда произошло событие, которое не может остаться без внимания. Утром 15-го февраля 2013 года в небе над Северным Казахстаном и Южным Уралом возникла характерная полоса, очень похожая на инверсионный след, но не было самолета, который мог бы его оставить. В головной части этого следа постепенно разрастался светящийся шар, и через несколько мгновений небо осветила яркая

вспышка. Прошло несколько секунд, и Челябинск был потрясен мощными взрывными волнами. Было выбито множество стекол в домах, обрушились стены и потолки некоторых зданий. Больше тысячи жителей обратились за помощью, т.к. были многочисленные ранения стеклом, ушибы и переломы. Что это было? А произошло падение метеорита, имевшего размеры до 10 или несколько больше метров. При вхождении в плотные слои атмосферы со скоростью около 30 километров в секунду он нагрелся и взорвался, породив ярчайшую вспышку и взрывную волну, наделавшую много бед и вызвавшую панику у населения.

Скорее всего, это был метеорит, размером в 10–15 метров, разрушившийся в воздухе на мелкие осколки, поднятые жителями в разных местах и уже исследованные учеными, специалистами по метеоритам. Они пришли к выводу, что это был наиболее распространенный тип каменных метеоритов, так называемых хондритов, по составу очень похожих на земные базальты или ультраосновные породы, слагающие на Земле верхнюю мантию под земной корой. Ничего необычного пока в этом метеорите обнаружено не было, как, впрочем, и в самом падении метеорита.

Так, в 2003 году крупный метеорит упал в Бодайбинском районе на северо-востоке Иркутской области. Его падение также сопровождалось вспышкой, взрывом и ударной волной, но еще не найдено ни одного его кусочка. 11 февраля 2012 года в Китае были падения нескольких метеоритов и были взрывы с ударными волнами, а потом собрали около 13 кг обломков. Крупный метеорит упал 15 сентября 2007 года в Перу в провинции Пуно на границе с Боливией. Также был огненный шар и шум взрыва, а впоследствии была обнаружена глубокая воронка — кратер, диаметром около 30 метров. Есть и другие примеры недавних падений на Землю более мелких метеоритов. Но для нас событие под Челябинском, конечно, неожиданное, загадочное и даже пугающее.

ГОРЯЧЕЕ ДЫХАНИЕ ЗЕМЛИ

В апреле 2010 г. вся Северная Европа была в транспортном шоке. Авиасообщение было прервано. В аэропортах скопились тысячи пассажиров, рейсы непрерывно отменялись и никто не знал, когда они могут возобновиться. А все это произошло в результате извержения всего лишь одного (!) вулкана Эйяфьядлайокудль в Исландии, выбросившего на высоту более 10 км массу вулканического пепла, т.е. разорванной взрывом магмы, мгновенно превратившейся в мельчайшие кусочки вулканического стекла (рис. 3.1). Такой пепел, попадая в турбореактивные двигатели самолетов, немедленно выводит их из строя.

В июне 2011 г. внезапно началось извержение вулкана Пойя-уеу в Чили, в Андийской горной цепи, где расположены десятки действующих вулканов. Извержение было взрывным – эксплозивным, на высоту более 10 км непрерывно выбрасывались огромные массы пепла, разносящиеся ветром, дующим на восток. Аэропорт Буэнос-Айреса, столицы Аргентины, был закрыт, полеты отменены, а все окрестности вулкана засыпаны толстым слоем пепла. При таких выбросах из жерла вулкана вырываются газы, идут проливные дожди. Горячий пепел повысил температуру в реках и озерах до 45°C, что вызывало гибель рыбы.

Действующие вулканы широко распространены по земному шару, и их активность представляет большую опасность, т.к. часто они находятся в густонаселенных районах. Почти сотня

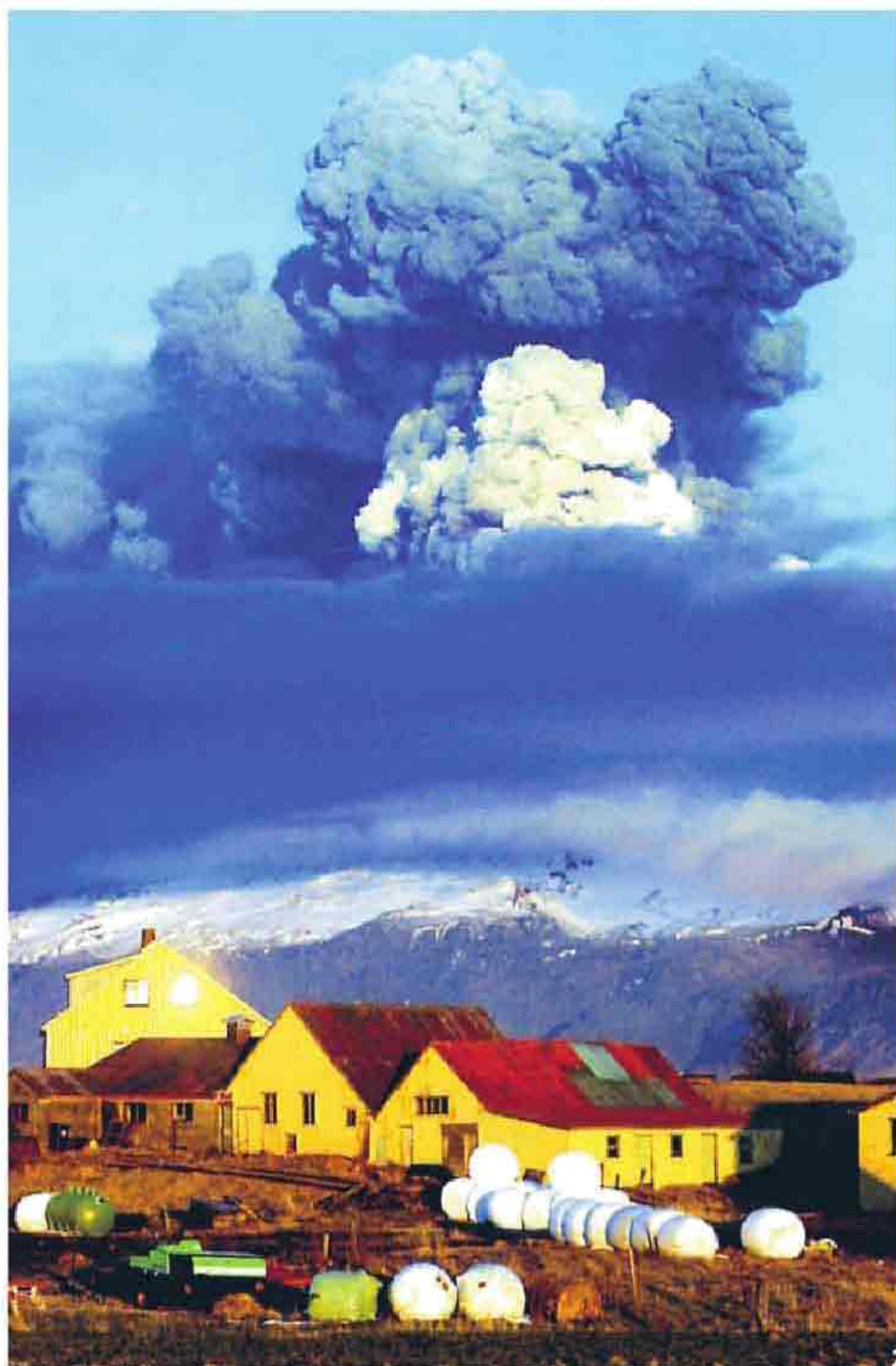


Рис. 3.1. Извержение вулкана Эйфьядлайокудль
в апреле 2010 г. в Исландии

«работающих» вулканов у нас в России сосредоточена в Курильской островной дуге и Восточной Камчатке. Многие вулканы как бы «уснули» и не действуют сотни или тысячи лет и вдруг «просыпаются», обычно со взрывами, чреватými катастрофой.

Всего в мире насчитывается около 600 действующих вулканов, половина которых проявляли себя в историческое время. Извержения вулканов, «спавших» сотни лет, особенно опасны, т.к. проявляют свой неистовый характер совершенно неожиданно.

Известно много катастрофических извержений, во время которых гибли тысячи людей и даже исчезали цивилизации. Это опасное природное явление геологами – вулканологами и геофизиками – сейчас изучено достаточно хорошо. Ученые знают, почему вулканы возникают только в определенных местах; как и где образуется магма, питающая вулканы; какой тип извержения можно ожидать от магмы определенного состава. Наконец, сейчас можно и предсказывать извержения. Для этого существует много методов. Мы кратко рассмотрим все эти вопросы и расскажем о наиболее впечатляющих извержениях, как в историческое время, так и в геологическом прошлом.

Вулканы всегда вызывали восхищение, благоговение, когда человек смотрел на гигантские горы конусовидной формы, часто накрытые снежной шапкой. И неважно, были это мощный вулкан Эльбрус на Северном Кавказе, завораживающий своими ледяными вершинами, стройный конус священной горы Японии Фудзиямы со снежной шапкой, окаймленной зелеными лесами, или огромная «нашлепка» вулкана Килауэа на Гавайских островах. Все они внушают нам мысль о силе и непредсказуемости явлений природы. Вулканы несут страх во время извержений, когда в кромешной тьме сверкают молнии, грохот взрывов, сотрясения земли и удушливые газы парализуют волю человека, а река раскаленной до ярко-желтого цвета лавы с огромной скоростью течет вниз по склону, сметая все на своем пути. Однако вулканическая почва плодородна, вокруг вулканов всегда много поселений, там возделывают поля и растут сады. Так что вулканы – это еще и наши благодетели.



Рис. 3.2. Грязевой вулкан. Иран (фото В.А. Галкина)

Существует тип вулканов, отличающийся от всех описанных выше. Это грязевые вулканы, известные в Дагестане и на Таманском полуострове в России, на Керченском полуострове, в Крыму, в Азербайджане в Куринской низменности в Кобыстане, в Грузии, на Сахалине и в Ставропольском крае (рис. 3.2). Гомер в «Одиссее» писал о грязевых вулканах Тамани и считал их входом в подземное царство Аида.

Грязевой вулканизм тесно связан с газонефтепроявлениями, т.к. именно они и являются его причинами. Обычно грязевой вулкан представляет собой сопку, конус, иногда и весьма значительную гору, сложенную сопочными брекчиями – глинистыми породами, либо только глиной, либо глиной с обломками глинистых или мергелистых пород. На вершине сопки есть воронкообразное углубление – кратер, из которого периодически выделяется вода со следами нефти, газ, обломки пород, глинистая грязь. Иногда извержения происходят очень бурно, газ взрывается, подбрасывая на большую высоту обломки и грязь.

Обычно грязевые вулканы образуют кольцевые структуры, хорошо видимые на космических снимках, есть и подводные

вулканы. Для образования грязевых вулканов необходима мощная толща глинистых пород, играющая роль своеобразной подушки, которая служит экраном для возникновения аномально высоких пластовых давлений, наличие разрывов, по которым прорываются газы, наличие нефти и водоносных горизонтов.

Разрывы или разломы — это пути, по которым газы, находящиеся под высоким давлением, прорываются наверх, увлекая с собой глинистые породы. Глубины зарождения грязевых вулканов достигают 7–10 и даже 15 км. Именно такую мощность имеют осадочные толщи в Керченско-Таманском регионе. Грязевые вулканы действуют периодически, иногда выдавливая лишь потоки жидкой глины, но временами и взрываются, и газовый фонтан с грязью поднимается на десятки метров.

Что представляет собой вулкан

В первом разделе этой книги мы уже выяснили, что земная кора и мантия Земли представляют собой твердое силикатное вещество, плотность и температура которого растет с глубиной. Породы разного состава начинают расплавляться при разной температуре, а при 1000–1300°C плавятся даже ультраосновные породы с малым содержанием оксида кремния, которые слагают верхнюю мантию. Но мантия не плавится. Почему? Этому процессу мешает высокое литостатическое давление (литос — камень), увеличивающееся с глубиной. Однако сейчас геофизическими методами достоверно установлено существование некоторых объемов жидкого вещества — расплавленных пород на разных глубинах, чаще всего на глубине 100–150 км. Вспомните, что поперечные сейсмические волны не проходят через жидкость, и если где-то в мантии располагается такой участок, то он может представлять собой магматический очаг (магма — месиво, густая мазь).

На Восточной Камчатке много действующих вулканов, образующих пояс, протягивающийся с севера, начиная от вулкана Шивелуч и кончая Курильским озером — кальдерой (обширная котловина вулканического происхождения с крутыми стенками и ровным дном) на самом юге полуострова. Магматические очаги, питающие вулканы, располагаются на глубинах 80–100 км,

но еще глубже, судя по геофизическим данным, на уровнях 200–300 км, в мантии находятся участки, в которых может наблюдаться начало плавления верхней мантии. Эти участки находятся выше сейсмофокальной зоны, фиксирующей погружение океанической плиты под континентальную кору Камчатки.

Не надо думать, что в магматическом очаге плещется расплав мантийных пород. Нет, конечно. Степень плавления может быть и небольшой, когда возникает своеобразная губка — порода, пропитанная расплавом.

Но что же заставляет твердую породу переходить в расплав? В первую очередь, это локальное понижение давления, или декомпрессия, которая связана с тектоническими разломами. А во вторую очередь — флюидный режим, т.е. поток газов или флюидное давление, которое резко понижает температуру плавления породы. Если эти факторы действуют вместе, то плавление мантии или земной коры происходит намного легче. Но сам процесс плавления идет своеобразно. Поскольку горная порода состоит из кристаллов различных минералов, плавление начинается на их стыках или, как говорят, в участках концентрации напряжений, и только потом первые капли расплава начинают объединяться в более крупные и передвигаться выше в сторону понижения давления, обычно вверх. Так из первичного магматического очага могут образоваться другие — периферические очаги, располагающиеся на более высоких уровнях. И, наконец, уже недалеко от земной поверхности формируется тот очаг магмы, из которого и происходит ее извержение и образуется вулкан.

Почему магма вырывается на поверхность почти всегда со взрывами, часто катастрофическими? В магматическом очаге постепенно растет давление газов, и когда оно превышает предел прочности вышележащих пород — происходит взрыв.

Вспомните открывание бутылки шампанского, особенно теплого. Вино содержит растворенный газ, находящийся под давлением и его пузырьки не видно. Но стоит открыть пробку, т.е. резко снять давление, и пузырьки мгновенно расширяющегося газа вырываются наверх, увлекая и вино, которое может вылиться из бутылки полностью. То же самое происходит и с магмой. Если давление газов в ней велико, то происходит

взрыв. Если оно не такое сильное, то магма может подняться до земной поверхности и начать изливаться в виде лавы, образуя потоки, длина которых зависит от состава и вязкости магмы. Все дело заключается в скорости всплывания пузырьков газа в магме, т.е. в скорости процесса дегазации.

Начав извергаться, магма постепенно образует на поверхности Земли конусообразное тело, форма которого зависит от многих условий. Магма поднимается из очага по каналу, называемому подводным, который сама же разрабатывает. Если скорость роста газовых пузырьков опережает скорость их подъема в магме, то они разрывают последнюю и тогда образуется вулканический пепел — обломки вулканического стекла, мгновенно застывшей магмы. Но также из жерла выбрасываются и кристаллы, уже находившиеся в магме, и их обломки. Тогда образуется вулканический туф. Все это приводит к взрывным или эксплозивным извержениям, и постепенно формируется вулканический конус из туфов и пепла. Если потом изливается лава, то она перекрывает местами туфы и пеплы.

Неоднократное повторение взрывных процессов и излияния приводит к образованию стратовулкана (*stratum* — слой), т.е. слоистого вулкана, обладающего конусовидной формой. Например, знаменитый вулкан Фудзияма в Японии или вулкан Кроноцкий на Камчатке.

Все разнообразие типов извержений, в конечном счете, зависит от скорости и характера дегазации магмы в подводном канале и ее состава, а магма всегда является трехфазной системой, расплав — кристаллы — газ (флюиды). Каждый вулканический конус имеет на вершине кратер — круглое углубление, представляющее собой выход на поверхность подводного канала — жерла вулкана.

Температура извергающейся магмы основного состава — базальтов обычно составляет 1000–1200°C, а кислых магм, т.е. содержащих много оксида кремния — 800–1000°C. Т.к. периферический, близповерхностный магматический очаг питается магмой из более глубоко расположенных очагов, давление в нем может достигать 200 МПа, но обычно давление меньше — 40–60 МПа, хотя и этого достаточно, чтобы при определенных условиях началось диспергирование магмы, приводящее к об-



Рис. 3.3а. Побочный прорыв, произошедший в 1983 г. на Ключевском вулкане. Отбор образцов. Лавовый поток выходит на высоте 2700 м (фото В. Подтабачного)

разованию пепла. Нередко на вулкане развивается не один, а несколько кратеров, образовавшихся за счет ветвления главного подводящего канала, как, например, на вулкане Этна в Сицилии, извергающемся почти каждый год.

Существует три главных типа извержений (рис. 3.3):

- а) эффузивное (*effusion* — излияние);
- б) эксплозивное (*explosion* — взрываться);
- в) экструзивное (*extrusion* — выдавливание).

В первом случае это преимущественно излияние лав, чаще всего базальтовых, в которых мало оксида кремния, и такие лавы называются основными. Эксплозивные — это взрывные извержения, при которых образуется масса туфов и пеплов. В этом случае в магме больше оксида кремния, они низкотемпературные, в них много летучих (газов). Экструзивные извержения — это медленный подъем обычно кислой, реже средней

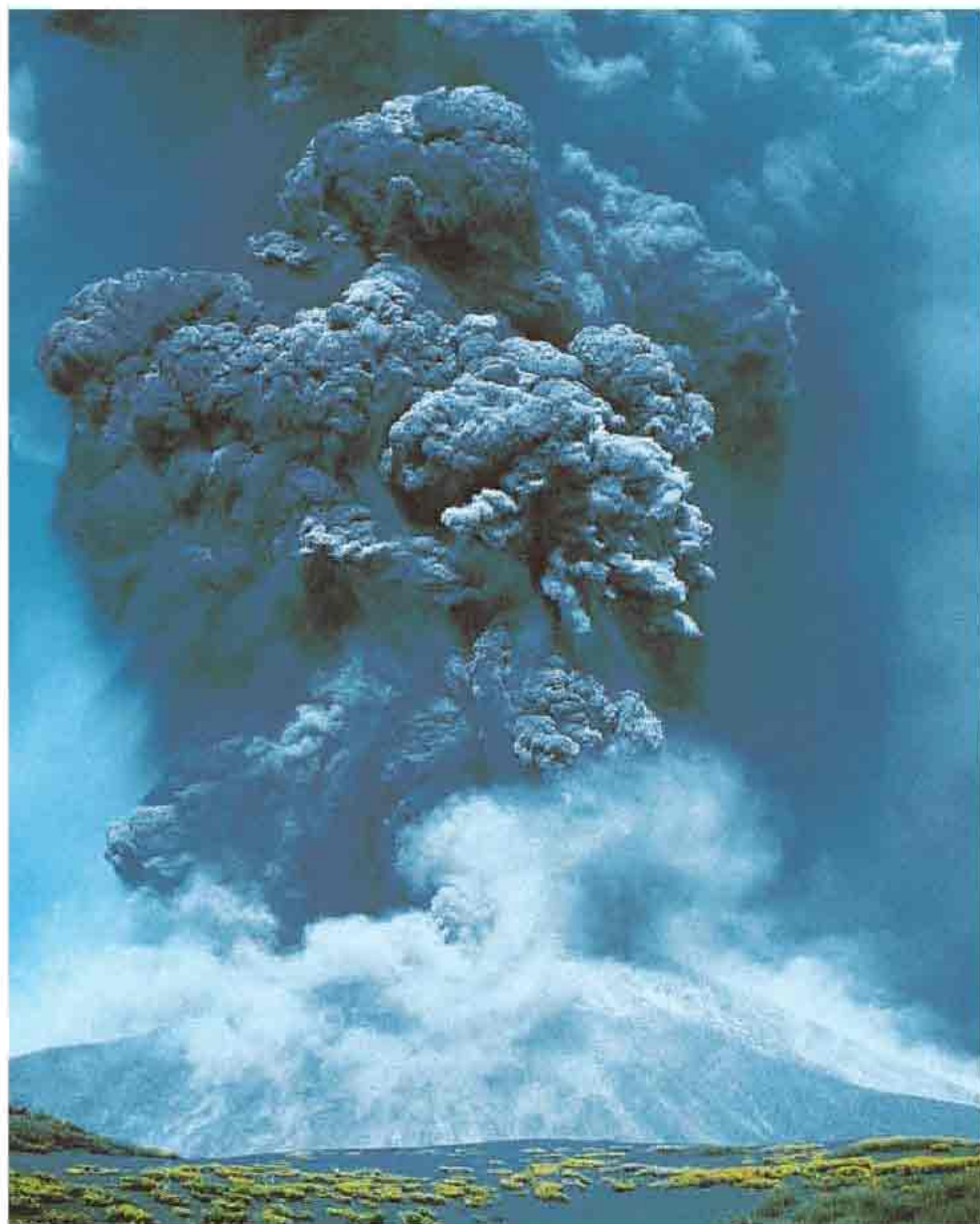


Рис. 3.36. Мощное эксплозивное извержение вулкана Толбачик в 1974 г. Камчатка (фото А.П. Хренова)

магмы, очень вязкой и низкотемпературной. Такая магма не растекается, а выдавливается из подводящего канала, как зубная паста из тюбика. Нередко после взрывного извержения образуется глубокая чашеобразная впадина — кальдера, в ней начинает расти экструзивный купол, как результат выдавливания оставшейся, лишенной газов, магмы.



Рис. 3.3в. Вулкан Безымянный. Экструзивный купол Лохматый. Камчатка (фото Ю.Демянчука)

Известны весьма своеобразные вулканы, извергающие т.н. «холодную» лаву с температурой всего в 500°C , тогда как базальтовые лавы при излиянии из кратеров вулканов обладают температурой около 1000°C . «Холодная» лава, причем весьма подвижная, извергается в Восточно-Африканском рифте в Танзании из вулкана Оль Дойньо Ленгаи. Это название на языке племени масаев, обитающих в районе вулкана, означает «Гора Богов». Последнее извержение этого вулкана было в 2010 году, хотя и до этого из него неоднократно изливались лавы, имеющие черный цвет и обладающие карбонатным составом со значительным содержанием калия и натрия. Этот удивительный вулкан, выбрасывающий из своего кратера карбонатную «холодную» лаву — единственный в мире.

А какое же извержение вулкана за последние 200 лет можно считать самым мощным? Мощность взрыва вулкана Кракатау 23 августа 1883 г. в Зондском проливе между Явой и Суматрой была 200 мегатонн. В то время как мощность наиболее крупной водородной бомбы испытывавшейся на земле была «всего» 50 мегатонн. Но взрыв вулкана Тамбора в Индонезии в 1815 г. был еще более мощным, пожалуй, самым мощным в истории человечества, при котором объем выброшенной лавы составил

180 км³. Взрыв Тамбора был слышен за 2000 км на острове Суматра. На огромном пространстве выпал вулканический пепел. Число погибших было более 700 000 человек, полностью исчезла культура жителей острова Сумбава, а вместе с ними и язык этой культуры. Грандиозный объем выброшенного пепла вызвал похолодание во всем мире. Например, в Европе 1816 год был неурожайным, цены на зерно выросли во много раз. Сейчас, после долгого молчания, Тамбора опять подает признаки жизни.

Много молодых вулканов, которые сейчас «уснули», расположено во Франции в провинции Канталь, где их разрушенные вершины поднимаются до высоты 1700–1850 м. Последнее извержение произошло около 7000 лет назад, и в кратере этого вулкана сейчас находится оз. Павен. В нагорье Шен-де-Пюи множество молодых вулканических конусов выстроились в одну линию, по-видимому, вдоль трещины. Конусы с кратерами имеют очень свежий вид, и кто знает, может быть они еще оживут.

Расположение вулканов на земном шаре

Вулканы размещены отнюдь не беспорядочно, а имеют ясную геологическую позицию, определяемую закономерностями тектоники литосферных плит (рис. 3.4). Иногда трудно установить, является ли вулкан действующим или окончательно потухшим, т.к. довольно часто вулканы не проявляют себя в течение тысяч лет, а потом вдруг становятся активными.

Примерно 75% действующих вулканов располагается по периферии Тихого океана, образуя знаменитое «Тихоокеанское огненное кольцо», «привязанное» к активным континентальным окраинам, к конвергентным (сходящимся) границам литосферных плит, где тяжелая океаническая кора погружается под более легкую континентальную с образованием глубоководных желобов, окружающих кольцом окраины Тихого океана. Погружение, «ныряние» океанической коры в мантию Земли, сопровождается колоссальным трением, ростом напряженного состояния в этой коре или пластине и обилием землетрясений.

Затягивающиеся вместе с океанической плитой осадки, способствуют выделению флюидов, которые вместе с повышающейся температурой вызывают образование первичных магма-

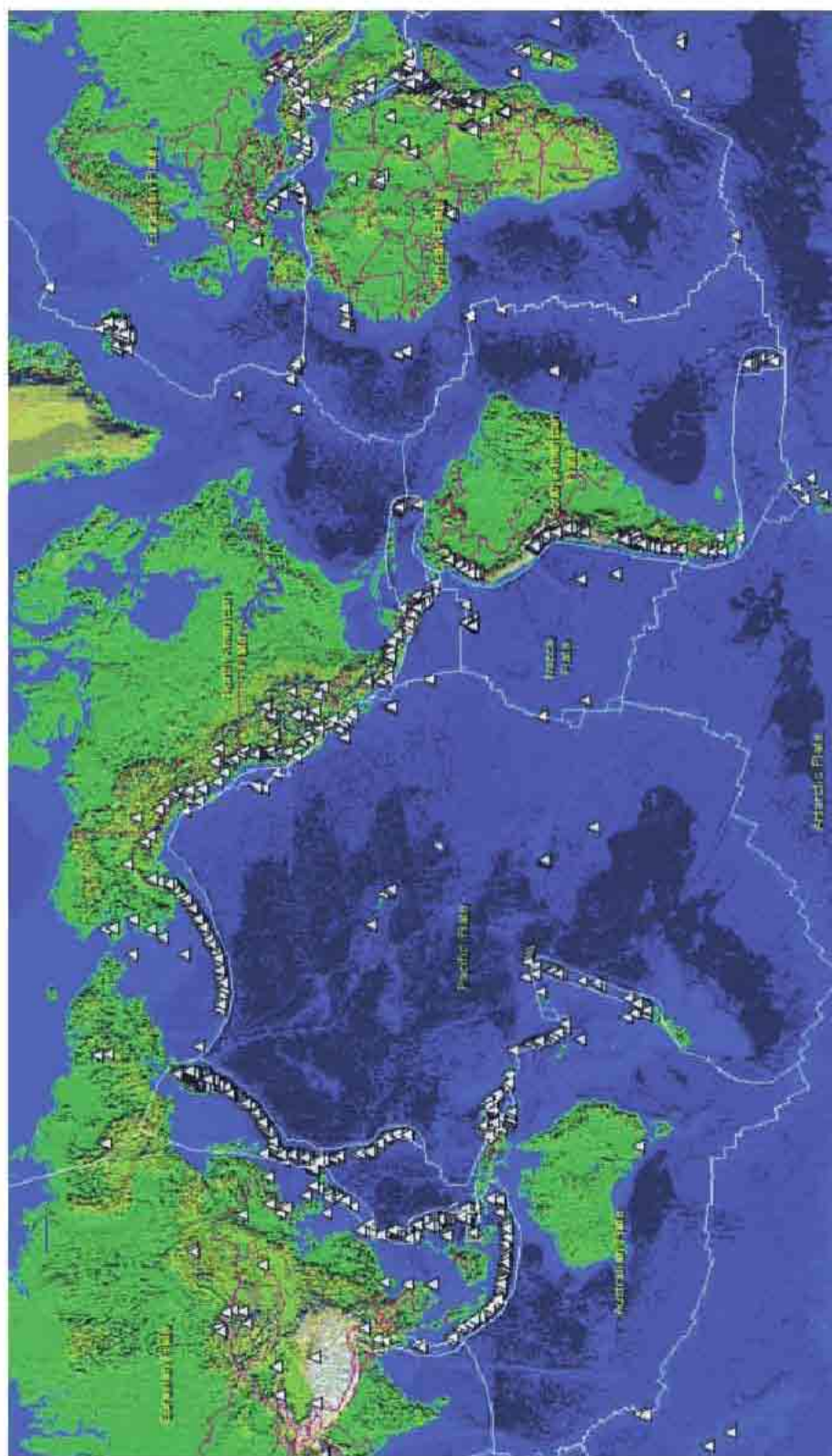


Рис. 3.4. Геологическая позиция действующих и молодых вулканов на земном шаре

тических очагов, дающих целую серию вторичных, более высоко расположенных очагов, из которых магма и поступает на поверхность. Вулканизм проявляется либо в островных дугах — Алеутской, Курильской, Японской, Филиппинской и др., либо в пределах окраинно-континентальных вулканических поясов — Андийского, Центрально-Американского, Северо-Американского. В Тихоокеанском кольце активных вулканов наиболее распространены средние и кислые вулканические породы, содержащие повышенное количество оксида кремния.

Второй тип областей, в которых находятся действующие вулканы, это срединно-океанические хребты, именно те зоны, в которых происходит дивергенция — расхождение океанических литосферных плит. Но активных вулканов там не так много, несмотря на то, что в этих зонах широко известны свежие лавовые купола и потоки базальтов. К этой группе относятся, прежде всего, вулканы Исландии, о-ва Ян-Майен, Азорских островов в Атлантическом океане; вулканические острова Реюньон, Кергелен в Индийском океане.

В ряде случаев вулканы находятся внутри литосферных плит, где связаны с т.н. «горячими точками», т.е. поднимающимися плюмами — колоннами нагретого вещества мантии. Это, прежде всего, вулканы Гавайских о-вов. Согласно данным известного вулканолога Г.Макдоналда 75% действующих вулканов находится в Тихоокеанском кольце, 13% — в Атлантическом океане, 1% — в Индийском, а остальные 11% расположены на континентах. Активный вулканизм связан также с Восточно-Африканской континентальной рифтовой зоной, образовавшейся в условиях тектонического растяжения над мантийным плюмом. В этой зоне в Кении и Танзании находятся такие известные вулканы как Килиманджаро, Вирунга, Нирагонго, Ньямурагира Ол Доиньо Ленгаи, Меру, Телени, Элгон и др. Активные вулканы есть и в Западной Африке в Камерунском рифте.

И еще один регион, где проявляется современный вулканизм — это Альпийско-Средиземноморский пояс — зона столкновения Африкано-Аравийской и Евроазиатской литосферных плит. В этом поясе находятся знаменитые действующие вулканы Везувий, Этна, Стромболи, Вулкано, Липари, а также вулканы, извергавшиеся совсем недавно, — Эльбрус, Казбек, Арарат

на Кавказе; Немруд, Хасандаг в Турции; Демавенд в Иране; Санторин в Эгейском море и другие.

Вулкан Эльбрус, находящийся на самом юге России, на Северном Кавказе, всегда привлекает тысячи туристов, начинающих альпинистов и горнолыжников. Две вершины вулкана, имеющего высоту более 5,5 км, представляют собой два вулканических конуса, причем на более молодой Восточной вершине хорошо сохранился кратер, тогда как на Западной вершине он наполовину разрушен крупными разломами.

Эльбрус начал впервые извергаться 700–800 тысяч лет назад, и за все время произошло 4 или 5 крупных извержений, во время которых образовались лавовые потоки, заполнившие ледниковые долины, так называемые трог (*trog* – корыто) разного возраста. За последние 10 000 лет было, по крайней мере, 4 излияния лав с Восточной вершины, а возраст самых молодых потоков около 2000–3000 лет. Из-за того что разновозрастные потоки спускаются в долины рек, создается впечатление огромного вулканического массива, хотя на самом деле он не превышает 2-х километров, т.к. основание конуса находится на высоте 3,5 км.

Является ли Эльбрус потухшим вулканом или он может еще «проснуться?» Этот вопрос заставляет непрерывно проводить различные исследования, которые установили, что у вулкана есть близповерхностный магматический очаг, хорошо фиксирующийся геофизическими методами на глубинах около 10 км. На Восточной вершине вулкана уже давно отмечены выходы сернистого газа. Вокруг Эльбруса много минеральных источников, в том числе теплых. Например, источник Джилы-Су (теплая вода) на северном склоне среди молодых лавовых потоков. Так что нет твердой уверенности, что Эльбрус уже совсем успокоился. Но если он «проснется», то извержение будет взрывным, т.к. магма имеет кислый состав, много оксида кремния, а следовательно, и газов много. Поэтому за Эльбрусом продолжают наблюдать.

Известны вулканы, которые «спали» несколько столетий, а потом «просыпались», приводя к катастрофам. Но есть вулканы, которые все время находятся в состоянии активности, например, вулкан Яху на Новых Гебридах к востоку от Австралии.

На Камчатке находящийся в Ключевской группе вулкан Безымянный молчал несколько столетий, а в конце сентября 1955 г. начались землетрясения, частота местных вулканотрясений была более 100 в сутки. Было очевидно, что магма поднимается по каналу из близповерхностного очага. В октябре произошло несколько умеренных взрывов, сопровождавшихся пеплопадом на расстоянии более 200 км от вулкана. В марте 1956 г. начал подниматься лавовый купол, возникший ранее над подводным каналом. И вот 30 марта в 17 часов 11 минут произошел грандиозный взрыв, снесший верхнюю часть вулкана и образовавший кратер диаметром более 1,5 км. Мощные пепловые тучи достигли высоты в 43 км. А на расстоянии около 20 км была выброшена огромная, более 1,5 км³, масса раскаленных обломков лав, туфов и пепла, вызвавшая таяние снегов и образование грязекаменных потоков до 80 км длиной, пока они не попали в реку Камчатка. Это было крупнейшее эксплозивное извержение XX века.

Одним из наиболее изученных и опасных вулканов мира является крупнейший вулкан Этна на востоке острова Сицилия (рис. 3.5) высотой более 3-х км и 45 км в поперечнике. У подно-



Рис. 3.5. Извержение вулкана Этна, Сицилия
(по А. В. Прокину)

жия этого гиганта располагается город Катания, не раз подвергавшийся «атакам» лавовых потоков гиганта, и много деревень. Активность Этны очень высокая, в историческую эпоху вулкан действовал все время, извергаясь около 150 раз. Строение вулкана весьма необычно, так как кроме главного кратера на вершине, на склонах существует очень много небольших паразитических конусов, расположенных у радиальных трещин. Именно из них чаще всего и происходят извержения.

В 1699 г. вулкан ожил. Произошло сначала сильное землетрясение, а потом из трещины пошли лавовые потоки, достигнувшие города Катания, разрушившие его западную половину, а заодно и 14 деревень. Это было мощное извержение, во время которого погибли десятки тысяч жителей. Излияния лав происходят во время спокойствия вулкана, когда нет взрывов, выбросов газа и пара. В январе 2012 года вулкан стал выбрасывать пепел и газ на высоту до 15 км. Опять началось извержение.

Извержение, погубившее цивилизацию

Нет ничего более завораживающего, чем картина отвесных берегов острова Санторин, возникающих перед тобой, когда плываешь на теплоходе в огромную чашу, обрамленную несколькими скальными массивами, вертикальные стены которых, высотой до 200 метров, раскрашены в белые, желтые, красные и черные полосы, как будто нарисованные гигантской кистью художника-великана (рис. 3.6). По верхней бровке обрывов разбросаны белые домики селений, а в центре чаши, заполненной изумрудной водой Эгейского моря, возвышается мрачный, черный хаос из глыб, образующих небольшой остров Неокамени. И по мере того как теплоход пересекает пространство внутри чаши, сразу же возникает мысль о том, что лучшего места, чем этот удивительный остров, для легендарной Атлантиды Платона не найдешь.

Что привело к катастрофе не только на самом острове, но и во всем Восточном Средиземноморье и, в частности, на Крите, где в 1900 г. археологи Артур Эванс и Генрих Шлиман раскопали Кносский дворец царя Миноса, по имени которого и вся древнейшая цивилизация получила название минойской?



Рис. 3.6. Кальдера о. Санторин. Обрывы о. Фира
(фото Н. В. Короновского)

Именно она и исчезла около 1500 лет до н.э., т.е. 3500 тысячи лет назад.

Что же это была за катастрофа, что ее вызвало, и какие последствия она имела? Автор несколько раз бывал на Санторине, изучил разрезы отложений, собрал образцы, получил возможность ознакомиться с новейшими данными, и сейчас можно представить далекие события уже более или менее правдоподобно.

Современная геология о. Санторин. Санторин — один из вулканических островов Кикладской островной дуги, сформировавшейся севернее Гелленского глубоководного желоба, маркирующего собой субдукцию, т.е. погружение одной литосферной плиты под другую. Именно в таких условиях и возникают вулканические островные дуги, наподобие Курильской, Алеутской и других. Выше погружающейся плиты в литосфере возникают магматические очаги, расплав в которых постепенно перемещается вверх, в сторону уменьшения давления и образует периферическую магматическую камеру или близповерхностный очаг.

Остров Санторин (Святая Ирина) в древности назывался Стронгиле (круглый), а также Каллисто (самый прекрасный) и

является самым южным островом Кикладской островной дуги в Эгейском море (рис. 3.7). От о-ва Крит он располагается в 120 км. к северу. Санторин состоит из нескольких островов: двух крупных – Фира и Фирассия и маленького – Аспрониси, обрамляющих огромную, километров 10–12 в диаметре, чашу, в центре которой располагаются два небольших острова – Палеокамени и Неокамени. Самым большим является остров Фира, имеющий форму полумесяца, который своим внешним краем подчеркивает прежнюю форму всего острова Стронгиле (Круглого). Аспрониси и Фирасия обрамляют западную часть внутренней чаши, расположенной между островами.

Одного взгляда на слои вулканических пород, обнажающихся в вертикальных обрывах Фире, любому геологу достаточно,



Рис. 3.7. Остров Санторин (NASA)



Рис. 3.8. Строение вертикального обрыва кальдеры Санторина (фото Н. В. Короновского)

чтобы признать в системе островов гигантскую кальдеру (котел), образовавшуюся в результате мощнейшего взрыва и обрушения вулканической постройки — стратовулкана, имевшего округлую форму и высоту большую, чем сейчас имеют высшие точки островов. Если мысленно продолжить вверх пологие внешние склоны Фиры и Фирассии, то высота вулканической постройки будет явно превышать 1 км.

Вертикальные обрывы Фиры как бы расчерчены по горизонтали полосами необычайно красивой цветовой гаммы: черные дацитовые¹ лавовые потоки чередуются с красными толщами лавобрекчий; желтыми, серыми и оранжевыми пластами туфов, туфобрекчий, а также пород, которые называются тефрой (собирательный термин для отложений вулканического пепла) и свидетельствуют о чередовавшейся эксплозивной (взрывной) и эффузивной (излияния лав) деятельности древнего вулкана (рис. 3.8). В одних местах пласты расширяются, например, крас-

¹ Даци́т — высокосиликатная магматическая порода. Слово происходит от Дакии (современная Румыния) — там порода была описана впервые.



Рис. 3.9. Пемзовый слой с включениями обломков черных лав
(фото Н. В. Короновского)

ные туфобрекчии в районе поселка Ия, в других – выклиниваются и сходят на нет, что говорит об извержениях различной силы и разного типа, происходивших из разных центров на склонах вулкана. Только в двух местах на Фире имеются выходы метаморфических мезозойских пород. Одно – это гора Меса-Вуно с вертикальными скальными обрывами, выступающими в море, а второе – обрывы около порта Афиниос на юге Фиры. Наиболее древние вулканические породы на полуострове Акротири имеют возраст 0,640–0,527 млн лет.

Поверхность всех островов, образующих Санторин, покрыта толщей светлого пемзового или пемзовидного материала, местами сильно размытого, но хорошо сохранившегося и выделяющегося на фоне темных слоев лав и тефры. Его мощность варьирует от нескольких метров до 150 м. Таких слоев насчитывается три, но верхний – самый мощный, а другие выклиниваются, исчезают и имеют толщину не более 5–6 метров, как, например, около пристани Афиниос.

Наиболее впечатляющие обнажения пемзовой светло-желтой тефры находятся в обрывах, южнее городка Фира, где в конце XIX века ее разрабатывали и пароходами отправляли в Египет на строительство Суэцкого канала в качестве добавки в цемент для устойчивости к морской воде. В обрывах высотой до 40–50 метров обнажается слоистая толща пемзовой тефры, слоистость которой подчеркивается различной ее плотностью (рис. 3.9). Толща состоит из округлых, редко угловатых, кусков светло-серой или желтоватой пемзы. Слоистость выражена чередованием более плотных и более рыхлых участков, свидетельствующих, что пемза наслаивалась с некоторыми перерывами. Она как бы «стекала» по склонам. В пемзовую толщу включены обломки черных дацитовых лав, в распределении которых также ощущается некоторая слоистость за счет изменения концентрации обломков. Пемзовая тефра, облегающая все неровности древнего рельефа, подстилается черными слоистыми туфами и туфобрекчиями, в изобилии встречаются отпечатки листьев оливковых деревьев, которые после извержения на острове уже не растут (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Черные туфы под пемзовым слоем с отпечатками листьев оливковых деревьев (фото Н. В. Короновского)

Извержение пемзовой тефры, судя по объему выброшенного материала (несколько десятков кубических километров), было грандиозным, после него вулканическая постройка просела и обрушилась. На месте вулкана образовалась огромная кальдера диаметром 10–12 км и глубиной до 500 м.

В доминойской истории Санторина выделяется три наиболее крупных события активного действия вулкана, изверженный материал которых содержит до 20% вкрапленников безводных минералов, что свидетельствует об относительной сухости расплава. Минойская тефра преимущественно афировая, т.е. в породах мало минералов вкрапленников, при этом содержание воды в магме составляло 3–4%.

Именно с высоким содержанием воды в магме многие исследователи и связывают катастрофическое извержение Санторина, но встает вопрос об источнике воды. Вероятно, морская вода поступала в магматический очаг вдоль разломов, ограничивающих более древнюю кальдеру. Растворимость ее в дацитовой магме повышалась с ростом давления до 5–6% на глубинах порядка 4–5 км. В дальнейшем из-за декомпрессии насыщенная водой магма «вскипала, пузырилась», что и привело к катастрофическому извержению.

Мы считаем, что флюид, т.е. различные газы насыщавшие магму Санторина, изверженную при катастрофическом событии около 1500 г. до н.э., имел глубинную природу. Работами Д.С. Коржинского, А.А. Маракушева, Л.Л. Перчука и многих других убедительно показано, что кислые магмы возникают под воздействием на плавящийся субстрат потоков глубинных флюидов — смеси преимущественно газовых компонентов. Их глубинная природа доказывается повышенным содержанием тяжелых изотопов водорода и углерода. При инфильтрации флюидов, особенно богатых водой и фтором, температура плавления кислой магмы может снижаться на 300°C и более. Установлено, что содержание воды в кислых магмах, в которых много оксида кремния, возрастает с ростом давления при увеличении глубины. Кислый расплав, находящийся под давлением 1 килобар, содержит 4% H_2O ; в 5 килобар — 10%; а в 10 килобар — 15%. В то же время многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями показано, что чем выше содержание

флюида в кислой магме, тем меньшей плотностью и вязкостью она обладает. Вязкость магмы зависит и от температуры, повышение которой вызывается также разогревом за счет трения при течении расплава. Разогрев приводит к падению вязкости. Это в свою очередь увеличивает скорость течения магмы, что приводит к ее дальнейшему разогреву. При определенных условиях процесс приобретает лавинный характер, а прогрессирующий разогрев может вызвать как бы испарение магмы и взрывы в ней. Все это и способствует ее быстрому подъему к земной поверхности.

Такое, может быть, не очень простое изложение подготовки извержения вулкана Стронгили, сделано для того, чтобы показать, как на основе вулканических пород можно воссоздать картину катастрофического взрыва. Геолог по крупице собирает сведения о породах, использует законы физической химии и на основе всех этих данных воссоздает механизм и последовательность извержения.

Катастрофическому извержению Санторина предшествовала повышенная тектоническая активность региона. Движение по разломам привело к понижению давления в глубоких горизонтах его недр, способствовало проникновению глубинных магматических газов, что, в свою очередь, привело к интенсивному плавлению субстрата и быстрому подъему магмы. Время между плавлением и извержением расплава не было длительным, поскольку вулканические породы минойского извержения не несут признаков дифференциации. Предвестниками катастрофы служили частые землетрясения и возобновившаяся вулканическая активность Санторина. Это вынудило жителей Акротири покинуть свои дома. При раскопках погребенного города было найдено всего несколько человеческих скелетов, в то время как численность населения составляла не менее 30 тысяч.

Мощное эксплозивное извержение с выбросом около 80 км^3 материала привело к обрушению кровли вулкана и образованию крупной кальдеры, т.к. верхняя часть очага оказалась опустошенной, а магматический очаг вулкана Санторин находился на глубинах от 2 до 6 км и вмещал преимущественно магму с большим содержанием оксида кремния. Однако в отношении многих компонентов ее состав был неоднороден. Среди основ-

ных причин, вызывающих неоднородность расплава, прежде всего необходимо указать на процессы кристаллизационной дифференциации магмы. Неравномерное распределение многих микроэлементов свидетельствует о неоднородности плавящегося субстрата, при этом большое значение имеет также степень его частичного плавления.

Кто не слышал об Атлантиде? Этом загадочном острове–государстве, соперничавшем в могуществе с Афинами, которое в одночасье исчезло, погрузившись в океан?

Об Атлантиде мы знаем от Платона, написавшего в IV веке до н.э. два философских трактата – «Тимей» и «Критий», в которых сообщается о том, что он узнал из рассказов своего родственника греческого законодателя Солона. Солон, в свою очередь, находясь в Египте, слышал об Атлантиде от жреца, старого египтянина, рассказавшего ему о внезапной гибели острова со всем населением примерно 9 тыс. лет до н.э.

Афины были основаны около 1550 г. до н.э., и как всё можно связать вместе, оставим историкам, которые обсуждают это уже почти 2500 лет.

Платон поместил Атлантиду за Геркулесовыми столбами, так в его время назывался Гибралтарский пролив, и по мнению греков край света. Не будем вдаваться в проблему местонахождения Атлантиды. На этот счет есть десятки, если не сотни предположений.

Но, может быть, Атлантида существовала только как философская система Платона? Может быть, этими красивыми повествованиями в своих диалогах Платон хотел описать лишь наиболее справедливое, по его мнению, устройство государства? Следует вспомнить, что Платон не любил Афинскую власть своего времени еще и потому, что она вынесла смертный приговор его учителю и другу Сократу, учившему Платона философии. Кто знает об этом? Но легенда об Атлантиде жива и по сей день, временами она затухала, но потом оживала вновь.

Первым, кто высказал в 1872 г. предположение, что современный остров Санторин и есть Атлантида Платона, был французский археолог Фигье, хотя несколькими годами раньше другие французские археологи уже нашли под пемзой остатки нескольких домов.

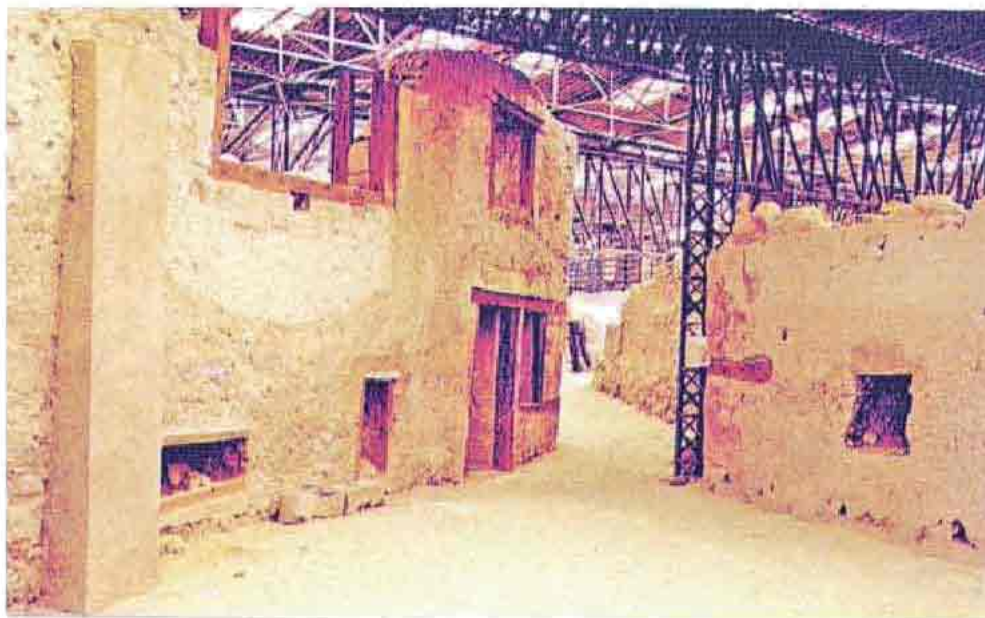


Рис. 3.11. Остров Санторин, раскопанный город Акротир
(фото Н. В. Короновского)

В 1960 г. на юге острова Санторин профессор Спиридон Маринатос начал раскопки, почти на берегу моря у современной деревни Акротир (рис. 3.11). И вот из-под мощной, в несколько десятков метров, толщи пемзового туфа показался город с двухэтажными домами, покрытыми черепицей, с улицами и площадями; с кладовыми, уставленными орнаментированными большими кувшинами — пифосами; с каменными лестницами, мельницами. Комнаты в домах были украшены потрясающими фресками, которые сейчас представлены в отдельной экспозиции Афинского исторического музея. Полы во многих домах были мозаичными. Сохранилось много разнообразных керамических изделий — пифосов, сосудов, ваз и других, покрытых великолепной росписью, изображениями морской и наземной фауны. Были фрески и с кораблями, на которых жители Акротира, очевидно, плавали на соседние острова, на Крит, Кипр и на восточное побережье Средиземноморья. Очень важно, что на глиняных черепках были обнаружены надписи, которые являются точной копией критских и выполнены т.н. критским «линейным письмом А».

Археологические раскопки в Акротири производят неизгладимое впечатление. Перед нашим взором предстает древнейшая, но высокоразвитая цивилизация, такая же, как была в это же время на Крите.

Но никаких украшений, драгоценностей, останков людей или животных найдено не было. Радиоуглеродный метод показал время гибели этого поселения примерно 1540–1550 лет до н.э., т.е. 3,5 тысячи лет назад. И тут все заговорили, что, наконец-то, нашли Атлантиду, это исчезнувшее царство, не оставившее никаких следов. Это время Микен, Тиринфа, царя Миноса на Крите, Кносский дворец которого был найден Артуром Эвансом и Генрихом Шлиманом. Дворец находится на северном берегу Крита, около современного города Гераклиона.

Но что же заставило жителей покинуть этот город? Что произошло на этом острове 3,5 тыс. лет назад? И тут за дело взялись геологи, геофизики и вулканологи, которые путем длительных и разнообразных исследований выяснили, что в столь давнее время произошла гигантская катастрофа, последствия которой сказались на всем Восточном Средиземноморье.

Хранитель музея в Оксфорде Артур Эванс, отправившись на остров Крит в краткосрочную поездку, до конца своей жизни изучал открытую им древнейшую цивилизацию, которая разительно отличалась от всех других. Население Крита появилось 4 тысячи лет назад неизвестно откуда и исчезло неизвестно куда, оно ушло в «небытие». Эта цивилизация не строила крепостей, как будто им не надо было защищаться от врагов. Зато люди, жившие на Крите, строили великолепные дворцы и украшали их фресками, выращивали пшеницу, разводили овец, делали прекрасную одежду, создавали сады и строили для себя удобные и просторные дома. Обладая сильным флотом, они никого не боялись.

Раскопав дворец в Кноссе, на северном побережье Крита, археологи были поражены его размерами и сложностью расположения сотен комнат, находившихся на разных этажах и соединявшихся между собой узкими коридорами, иногда тупиковыми, что создавало впечатление сложного лабиринта. Именно в нем царь Минос, сын Зевса и Европы, держал поедавшего молодых девушек и юношей Минотавра, которого убил Тесей,

сын царя из Афин — Эгея. Выбраться из лабиринта ему помогла Ариадна — дочь Миноса, давшая Тесею клубок ниток. Еще много легенд связано с Критом, с минойской цивилизацией.

И вот она исчезла, не оставив следа. И причиной этой катастрофы стало, скорее всего, грандиозное извержение вулкана Стронгили, не только засыпавшего находящийся в 200 км Крит пемзовым пеплом, но и разрушившего прибрежные города грандиозным цунами.

Погиб и город Акротери на Санторине. Сохранившиеся фрески из Акротери поражают своими сюжетами, мастерством изображения и радостным настроем (рис. 3.12). Мы видим разнообразные цветы, играющих обезьян, юношу со связкой ставрид, кулачный бой мальчиков, грациозных антилоп, плывущие лодки, нарядных женщин. Нигде нет картин войны, оружия, воинов. Все изображения дышат мирной, спокойной жизнью, как будто у людей, живших на острове, не было врагов. Ведь то же самое мы видим и на Крите, где 3500 лет назад обитала высокоразвитая цивилизация. И вся она исчезла с лица Земли из-за единственного извержения вулкана. Воистину с господнею стихией царям не совладать!

По современной классификации силы и последствий вулканическое извержение на Санторине относится к VII, предпоследнему классу извержений, с энергией, соответствующей нескольким сотням атомных бомб.

Наиболее впечатляющее в геологическом разрезе Санторина — сплошная толща светло-желтых пемзовых ту-

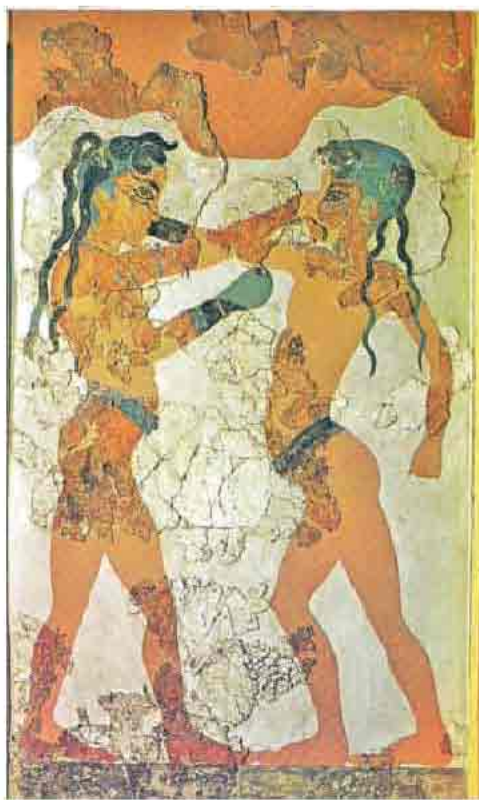


Рис. 3.12. Остров Санторин, город Акротери, фреска на стене дома (по Христосу Г. Итоймасу)

фов, покрывающая все отложения, как шапкой. Мощность пемзы достигает местами почти 100 метров, но чаще составляет несколько десятков. В этой пемзовой толще и находится разгадка Санторина. Остров 3,5 тыс. лет назад представлял собой вулканический конус, может быть, не совсем правильной формы, но его название Стронгили – круглый, скорее говорит в пользу этого предположения. На острове были поселения. Склоны горы были засажены оливами, на полях выращивали ячмень. И вот внезапно произошло землетрясение, или их было несколько. Частично поселение было разрушено, и люди покинули его, уплыв на лодках, может быть, к Криту. Возвратились ли они еще раз, чтобы забрать оставшиеся вещи – неясно.

И началось извержение вулкана! Магма, насыщенная газами, поднимаясь по каналу от близповерхностного очага и, попадая в условия резкого снижения давления, вспенивалась, превращаясь в пемзу – породу, в которой масса пузырьков газа, ведь недаром пемза легче воды. При таком извержении главное жерло вулкана находилось где-то в центре современной чашеобразной впадины. Это было не простое извержение. Пемзовый материал, истекая из жерла, подобно струе газа из реактивного двигателя, поднимался на большую высоту и выпадал не только на склоны вулкана, но и разносился далеко по Восточному Средиземноморью.

Сама пемзовая тефра содержит очень мало минералов-вкрапленников, всего от 2 до 18–20%. Температура извергавшейся тефры, по-видимому, была в диапазоне 900–1100°C. Как долго продолжалось это извержение – остается неясным, но очевидно, что оно не было мгновенным, а имело предварительные пемзовые выбросы, о чем свидетельствуют два более ранних пемзовых пласта.

Следы извержения обнаружены во многих глубоководных впадинах Восточного Средиземноморья, в Сирии, Египте и, конечно, на Крите. Взрывное извержение было грандиозным и достаточно длительным. И после того, как значительная часть магмы из очага исчерпалась, вулканическая постройка провалилась, т.к. масса извергнутого материала была большая и в очаге образовались полости. Возникла классическая большая кальдера обрушения. После этого извержение затихло, а остат-

ки склонов вулкана Стронгили оказались покрыты мощнейшим пемзовым плащом. Остров, как место существования цивилизации эпохи поздней бронзы, перестал существовать.

Существует предположение, что это грандиозное извержение вызвало цунами, которое могло частично разрушить Кносский дворец царя Миноса, который располагался недалеко от берега. Экспедиция Жака Ива Кусто обнаружила вблизи северного побережья Крита затонувшие корабли с полным грузом пифосов, т.е. катастрофа обрушилась на них внезапно.

Так погибла на Санторине и на Крите минойская цивилизация. Микенская цивилизация, выходцы которой из Микен на Пелопоннесе основали Афины где-то около 1550 г. до н.э. сохранилась, а минойская — исчезла.

После образования кальдеры вулканическая деятельность не прекратилась. В ее центре начал расти небольшой вулкан, как это часто бывает в извержениях подобного типа, и магма изливалась в виде небольших лавовых потоков с классической поверхностью глыбовых или «аа» лав. Этот гавайский термин обозначает тип лавовых потоков, верхняя пленка которых, быстро застывая, благодаря продолжающемуся движению лавы, снова дробится, образуя остроугольные глыбы разного размера. Так образовались два островка Палеокамени и Неокамени, на которых видны кратеры с трещинами, выделяющими сернистый газ.

После минойской эпохи подводные извержения в центре образовавшейся кальдеры продолжались с перерывами до 197 г. до н.э., когда появился остров Камени. Последующие надводные извержения происходили много раз вплоть до 1956 г. н.э.

Все извержения вулкана в историческое время описывались как катастрофические для населения острова Фира. Крупнозернистая тефра, вулканические бомбы и глыбы выбрасывались на расстояние до 3 км от вулкана. Тонкий пепел распространялся над островами Эгейского моря, а иногда отмечался даже в Анатолии. Обильные газы и пары временами были настолько сильно насыщены сернистым водородом, что вызывали у людей удушье, частые обмороки, сильные головные боли и рвоту. Все извержения вулкана в историческое время сопровождалось цунами разной высоты, вызывавшими разрушения на берегах Эгейского моря. Извержения Санторина сопровождалось силь-

ными взрывами. Во время извержения 1650 г., например, взрыв был настолько силен, что его слышали у Дарданелл, на расстоянии 500 км от Санторина.

9 июля 1956 г. сильное землетрясение повредило большинство зданий на о. Фира и 48 человек погибло. Профессор Джордж А. Галанопулос, директор сейсмологической лаборатории Афинского Университета, отправился на остров для проведения полевых исследований причиненного ущерба. Он посетил шахты, где добывается вулканическая пыль для цементных заводов в Афинах, и на дне наткнулся на руины каменного дома, в котором нашел два маленьких кусочка дерева и несколько человеческих зубов. Радиоуглеродное датирование дало для кусков дерева возраст 1410 ± 100 г. до н.э.

На Санторине и сейчас довольно часто происходят землетрясения, и кто знает, чем дело может кончиться. В любом случае извержения еще будут, весь вопрос в том — какого типа и когда?

Гибель Помпеи, Геркуланума и Стабии

Дуга красивейшего Неаполитанского залива, с какой бы точки мы не смотрели, венчается конусом вулкана Везувий, вернее одним центральным конусом и обрамляющим его с востока полумесяцем остатков более древнего конуса. Это все, что осталось от древнего вулкана после мощного извержения 79 г. н.э., которое скрыло от нас на долгие столетия руины процветающих римских городов — Помпеи, Геркуланума и Стабии. В 1599 г. архитектор из Рима Доменико Фонтана прокладывал подземную галерею для водопровода на плодородных полях к югу от Везувия и неожиданно наткнулся на развалины каких-то строений. В 1710 г. рытье колодца на участке одного крестьянина на берегу залива привело к открытию новых развалин. А 1 апреля 1748 г. испанский военный инженер Роне Хоакин де Алькубьерре начал уже настоящие раскопки. И если первые говорили о погребенных Помпеях, то вторые о другом городе — Геркулануме или, как его называли в начале I тысячелетия — Эрколано. С начала XVIII века раскопки Помпеи, Геркуланума, а сейчас и Стабии, на месте которой располагается

современный городок Каstellамаре, продолжаютс я непрерывно, открывая нашему взору римскую цивилизацию, существовавшую в этих местах в I веке н.э.

Что же скрыло на многие века от нашего взора эти города? И снова приходится говорить о страшной природной катастрофе — извержении вулкана Везувий 24–25 августа 79 г. н.э. До этого момента склоны вулкана — конусовидной горы высотой до 2 км с кратером на вершине — были покрыты густым лесом и диким виноградом. В 72 г. н.э. в зарослях Везувия скрывался Спартак с восставшими рабами, перед тем как спуститься к побережью Адриатического моря. Почва вокруг горы была плодородная, поэтому там охотно селились и строили города, совсем не маленькие на то время. До начала раскопок все как-то забыли об этих исчезнувших городах. Великий русский живописец Карл Брюллов под впечатлением посещения этих мест в 1828 году написал свою знаменитую картину «Последний день Помпеи». Но в то время Помпеи еще не были раскопаны, и Брюллов изобразил кладбище на окраине города. За более чем 200 лет раскопок Помпеи сейчас выглядят большим городом, в котором обитали тысяч 30 или более жителей. Это был красивый и хорошо обустроенный город, о котором мы поговорим чуть позднее.

А сейчас давайте воспроизведем те сутки, те 24 часа, за которые города, расположенные на южном подножье Везувия, исчезли. Мы очень хорошо можем воспроизвести все, что происходило в течение этих 24 часов, на основании детального изучения геологического разреза толщи вулканогенных образований, под которыми была погребена Помпея, и по описаниям очевидцев: Плиния Младшего — племянника известного римского ученого и адмирала, и Плиния Старшего, командовавшего галерным флотом, базировавшимся у мыса Мизено на севере Неаполитанского залива. Плиний Младший по заданию своего дяди ежедневно писал сочинения и вел дневник, в котором описана вся картина катастрофы.

Извержение началось внезапно и продолжалось не более суток. Плиний Младший описывает, что жители Мизено обратили внимание на поднявшийся над Везувием столб сначала белого, а потом и черного дыма, ветром относимого к юго-

востоку. Через несколько часов после начала извержения к Плинию Старшему прискакал гонец от его знакомой, жившей на побережье залива под Везувием, с просьбой о помощи, т.к. земля тряслась, а с неба падали камни. Адмирал Плиний Старший распорядился послать туда легкую быстроходную галеру — либурнику, чтобы разведать, что же там произошло. Но вскоре опять прискакал всадник с просьбой о немедленной помощи. Тогда Плиний Старший снарядил несколько больших кораблей — квадрирем, которые могли вместить много людей, и сам отплыл с ними.

Путь от Мизено к подножью Везувия не близкий, и когда они уже ночью пытались пристать к берегу, то не смогли этого сделать. Море отступило, сверху все время что-то сыпалось. Тогда они решили плыть дальше в Стабии, к другу Плиния Помпониану. Войдя в дом, где все тряслось и качалось, Плиний принял ванну (!), пообедал, потом лег почитать. Среди ночи он вышел на берег, велел расстелить там парус, и упал мертвым. Сверху непрерывно сыпались куски пемзовидного материала. Так окончил свои дни адмирал и естествоиспытатель Плиний Старший, в честь которого тип извержения Везувия в 79 г. н.э. был назван Плинианским.

Геологический разрез вулканогенной толщи, похоронившей Помпеи, позволяет точно восстановить, что же происходило в эти августовские дни. Вулкан к началу извержения имел конусовидную форму с одной вершиной высотой до 3 км. К кратеру вулкана поднялась по каналу вязкая, насыщенная газами магма. Пузырьки газа, расширяясь при быстром падении давления, разрывают магму, как бы вспенивая ее, и образуют кусочки пемзовидного материала и пепла, поднимающиеся на большую высоту, где разносятся ветром, образуя облака по форме напоминающие средиземноморскую сосну — пинию.

Вулканологи полагают, что вспенивание магмы начинается еще в подводящем канале и из кратера с огромной силой вырывается диспергированная масса, раскаленная струя обломков. Эта масса и начала засыпать Помпеи, т.к. они оказались прямо по центру облака разносившегося ветром материала, который и накрыл город слоем в 4 метра. А недалеко, на о. Капри, толщина слоя была всего 5 см.

В середине пемзовидной толщи находится тонкий, не более нескольких сантиметров, слой вулканического песка, который, как полагают, является следствием выбросов из вулкана палящей газовой тучи. Возможно, именно она стала причиной смерти Плиния, как и некоторых его спутников.

При раскопках Помпей щупами протыкают вулканогенную толщу и если находят пустоты — заливают их гипсом. Так были найдены следы людей, погибших при катастрофе. От них остались только пустоты, повторяющие форму тела. В одном месте, называемом «садом беглецов», были обнаружены слепки женщин, мужчин и детей. По их позам можно предположить, что они умерли от удушья, т.к. лежали ничком, закрывая рот руками. Может быть, это результат действия палящей тучи? Конечно, утверждать сейчас это трудно (рис. 3.13).

Выше по разрезу от слоя вулканического песка снова прослеживается серый пемзовидный материал, и на этом, по существу, разрез кончается. Интересно, что раскопанный город прекрасно сохранился, но у домов нет крыш, т.к. они рухнули под тяжестью вулканических обломков.

Извержение продолжалось всего сутки или даже меньше. Его заключительная стадия подробно описана Плинием Младшим, наблюдавшим за катаклизмом издали. Он пишет, что на следующее утро ветер изменился и погнал тучи пепла и туфа на северо-запад, т.е. прямо на Мизено. Небо почернело, наступила ночь, и жители бросились из города по дорогам. Он тоже пошел с матерью, но боясь быть задавленными и затоптанными в толпе мчащихся неизвестно куда людей, они отошли в сторону, сели на камень и стали ждать смерти.

Но через некоторое время стало светлее, ветер отнес пепловую тучу в сторону. Потом выглянуло солнце и все закончилось. Это



Рис. 3.13. Погибшие жители Помпей

было 25 августа, середина дня, так что все извержение продолжалось около суток. Населению Помпей частично удалось спастись — многие ушли из города.

Сейчас мы можем видеть высокий уровень градостроительства 2000 лет тому назад (рис. 3.14). Улицы были вымощены каменными плитами, везде имелись тротуары и через улицы положены плоские камни, чтобы пешеход мог по ним перейти улицу, когда шел дождь. Дома имели внутренние дворики с фонтанами. В городе был настоящий хлебозавод. Сохранились каменные мельничные жернова и печи, где пекли хлеб. В городе было четыре театра — арены, трибуны которых вмещали несколько тысяч зрителей. Там же проходили и бои гладиаторов. Посещение Помпей оставляет неизгладимое впечатление.

А вот другой город — Геркуланум, в котором было около 10 тысяч жителей, располагался на берегу Неаполитанского залива у западного подножья Везувия, и его постигла другая участь. Во время извержения в газовой-пепловых облаках часто возникают грозы, выпадают ливни, вызывающие грязекаменные потоки — лахары (термин из Индонезии). Они бывают холодными



Рис. 3.14. Вид раскопанных Помпей

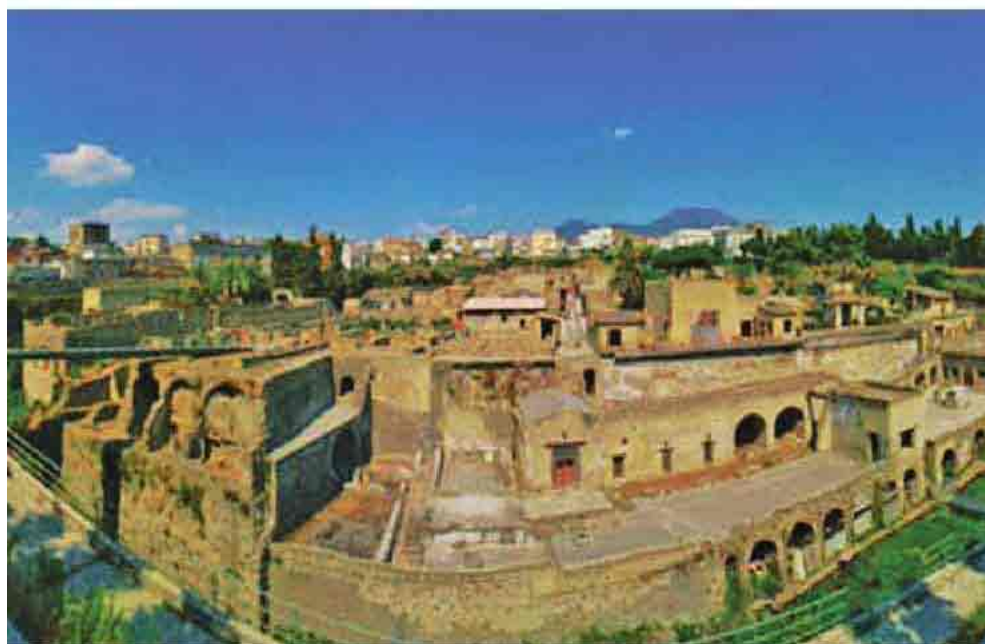


Рис. 3.15. Геркуланум. Вид части раскопанного города

и горячими. И вот такая масса грязи и камней в мгновение ока накрыла Геркуланум, и все было погребено под многометровой толщей. Город перестал существовать, все жители погибли. Если подняться по склону Везувия выше современного города Геркуланума, располагающегося над древним Эрколано, то можно увидеть глыбовую поверхность грязекаменного потока, который разрушил город (рис. 3.15). Со временем эта грязекаменная толща превратилась в монолитную каменную массу, которая поддается только отбойному молотку, что приводит к большим сложностям при раскопках.

Геркуланум, как и Помпеи, был открыт случайно в 1710 г., когда крестьянин копал колодец на своем участке и наткнулся на какие-то развалины. Сейчас раскопана только часть города, и при изучении стало ясно, что люди были застигнуты врасплох. Найдены скелеты (рис. 3.16), находящиеся в разных позах, на женщинах сохранились золотые украшения, предметы обихода перевернуты, расплющены.

А что же произошло после извержения Везувия в 79 году. Еще во время эксплозии, т.е. взрывного истечения магмы, склоны конусовидного вулкана частично разрушились взрывом, а

Рис. 3.16. Погибшие в грязевом потоке (лахаре) жители города Геркуланума (timescity.ru)

частично опустились, образовав обширную кальдеру с более высоким северным краем. Это современная Монте Сомма. А внутри кальдеры начались новые извержения, постепенно формировавшие современный конус Везувия. За 84 извержения, случившихся после 79 г., конус вырос.

В 1906 г. очередное извержение Везувия было хорошо изучено и весьма подробно описано. Небольшие эксплозивные выбросы сопровождались открытием на склонах конуса ряда побочных жерловин, из которых вытекали лавы, образовав потоки, почти достигнувшие подножия Помпеи. А у восточного подножия Везувия городки Сан-Джузеппе и Оттаино оказались сильно разрушенными падающими вулканическими обломками. После этого извержения высота конуса Везувия уменьшилась почти на 200 метров.

Последнее извержение было в 1944 г. Шла Вторая мировая война, американские войска наступали на север. Началось извержение вулкана, облака газа с пеплом поднялись на высоту почти в 6 км. Из-за пеплопада машины и самолеты выходили из строя и наступление застопорилось.

Сейчас на вершину Везувия можно подняться по канатно-кресельной дороге и по тропинке обойти весь кратер, сохранившийся от последнего извержения 1944 г. Внутри кратера поднимаются облачка газов, иногда там что-то урчит. Вулкан дремлет, но в любой момент он может о себе напомнить. А новые дома уже опоясали вулкан со всех сторон, поднимаются



все выше и выше по склонам, и в опасной зоне проживает более полумиллиона человек. Что будет с ними и их жителями, если вулкан рванет снова? За ним внимательно следят на специальной вулканологической станции, но очень трудно, почти невозможно предвидеть, когда и с какой силой начнет извергаться Везувий. В лучшем случае жителей успеют предупредить за пару недель, а может быть, и за меньшее время.

Другие вулканы

Есть один тип извержений, страшный по своим последствиям, но почти не оставляющий следов в виде вулканогенных отложений. В Малой Антильской островной дуге, что в Карибском море, находится небольшой остров Мартиника. Остров — это один вулкан, у подножья которого расположен небольшой городок Сен-Пьер. В 1902 г. в нем было 30 тыс. жителей и в мае готовились выборы губернатора. Все знали, что они живут на вулкане, и участвовавшие землетрясения и выбросы пепла обеспокоили людей, которые хотели хотя бы на время уехать с острова. Однако губернатор, переживая за выборы, уговаривал всех остаться, т.к. по его мнению опасности не было никакой, и он сам приехал в Сен-Пьер.

Но вот 8 мая 1902 года в 7 часов 50 минут, после затишья совершенно неожиданно раздалось несколько мощных взрывов. Из кратера вулкана, нависшего над городом, вырвалась черная, в нижней части красноватая, тяжелая газово-пепловая туча, как говорили, «огненная стена», которая имела температуру 800–1000°C. Эта лавина менее чем за 2 минуты достигла города и накрыла его, прокатившись дальше по бухте, где стояли корабли. Целыми остались только 2 корабля — «Рорайма» и «Родам». Они сумели как-то выйти в открытое море из бухты. Температура была настолько высока, что все жители города погибли мгновенно, а вода в бухте закипела.

В живых остался только заключенный, сидевший в каменной тюрьме, дверь которой была обращена в сторону от движения палящей тучи, и еще один человек, спрятавшийся под столом в доме. Город был полностью разрушен. В домах остались только стены, т.к. окна продавливались воздушной волной, и

из домов все было выброшено этой мощной силой. Деревья упали, с одной стороны у них была ободрана кора, но они не загорелись.

Когда стали изучать катастрофу на Мартинике, то выяснили, что скорость движения тучи была около 200 км/час, что соответствовало ураганному ветру. Почти все суда в гавани были сожжены или перевернуты и потом затонули. Уцелели, как сказано выше, лишь два корабля. Выяснилось, что в самой «палящей туче», кроме газа и пыли, были раскаленные мелкие частицы вулканических пород, которые, как водяной поток стекали по оврагам и долинам, т.к. из частичек еще раскаленной лавы выделялся газ, игравший роль воздушной подушки, и поэтому частицы стекали вниз по долинам почти без трения.

Эта катастрофа была описана очевидцами, которые остались живы, находясь на кораблях в дальней части залива перед городом. После этого мгновенного извержения, не оставившего после себя почти никакого вулканического материала, только лишь немного пепла, из кратера начала медленно выдавливать-ся очень вязкая магма, богатая оксидом кремнезема. Это была классическая экструзия, т.е. выжимание магмы. Образовалась мощная «игла», высотой в 300 метров, но остывая, она быстро разрушилась под влиянием дождей и жаркого тропического климата (рис. 3.17).

Тип извержений, сопровождающийся палящими, т.е. высокотемпературными газово-пепловыми лавинами, получил по наименованию вулкана название пелейского. Такие извержения происходят, когда вязкая, насыщенная газами магма испытывает перегрев и как бы выплескивается со взрывом через кратер. Такие палящие тучи очень опасны, и предсказать их появление весьма трудно. Они могут быть в тех вулканах, где магма богата оксидом кремнезема, а в подводящем канале образовалась «пробка» из застывших пород предыдущего извержения.

В последнее время многие вулканологи пытаются разработать физическую модель извержений разного типа. Очевидно, что этот процесс носит нелинейный характер, поэтому так трудно учесть все параметры и те незначительные, на первый взгляд, факторы, приводящие к резкому, непредсказуемому изменению системы очаг-канал-поверхность.

Рис. 3.17. Экструзивная «игла», выдавленная из кратера вулкана Мон-Пеле после извержения палящей тучи



Можно привести много примеров катастроф, связанных с извержениями различных типов. Все извержения опасны, если вулканы находятся в густонаселенной местности. Уже приводились примеры исчезновения цивилизаций, например, минойской. То же случилось с цивилизацией майя в 270 году н.э., когда на территории нынешнего Сальвадо-

ра взорвался вулкан Тьера-Бланка с образованием огромной кальдеры площадью в десятки квадратных километра, а в ее окрестностях все было полностью уничтожено.

Даже трудно себе представить, что произошло при извержении вулкана Тоба в Индонезии на о. Суматра 74 тыс. лет назад, после которого образовалась гигантская кальдера. Считается, что это было одно из самых мощных извержений за последние 180 тыс. лет. Тоба представляет собой супервулкан, который извергался много раз, но то, что произошло 74 тыс. лет назад, будоражит воображение. Было выброшено более 2800 км^3 вулканического материала, тогда как при сильнейшем взрыве вулкана Кракатау в 1883 году — 20 км^3 , при извержении вулкана Пинатубо в 1991 году — 5 км^3 , а при взрыве вулкана Сент-Хеленс в 1980 году в Кордильерах Северной Америки — всего $0,5 \text{ км}^3$. Хотя последнее извержение и считается очень сильным, но взрыв вулкана Тоба был в 5000 раз мощнее. Археологические раскопки в Индии позволили выявить картину ужасных последствий для людей, которые уже жили в это время. После выброса такой огромной массы пепла средняя температура на

земном шаре должна была упасть на 10°C, хотя это предположение и подвергается критике. Но влияние извержения вулкана Тоба устанавливается на расстоянии более 2000 км от центра взрыва. Считается, что подобные извержения супервулканов происходят в 5–10 раз чаще, чем падение крупных метеоритов.

Островная Индонезийская дуга вообще богата вулканами, т.к. литосферная плита восточной части Индийского океана погружается под дугу с образованием глубоководного желоба и постоянными землетрясениями. Взрыв вулкана Тамборо на о. Сумбава в 1815 г. привел к гибели почти 100 тыс. человек, а в 1919 г. при извержении вулкана Келуд на о. Ява погибло около 5 тыс. жителей, оказавшихся погребенными под колоссальными лахарами — грязевыми потоками.

Извержения вулканов в высокогорных областях, там, где конусы вулканов покрыты ледяной шапкой, приводят к плавлению льда и снега, что вызывает грязекаменные потоки. Так произошло в Колумбии при извержении вулкана Невадо-дель-Руис высотой в 5 км, покрытого ледниками. В 1983 г., во время излиянии лав, ледники растаяли, образовав мощнейший поток из воды и камней. И ночью он ринулся вниз по долине, сметая все на своем пути. Промчавшись около 50 км, лахар полностью разрушил город Армеро (рис. 3.18), и 30 тыс. жителей оказались похороненными в десятиметровом слое грязи. Селиться в долине реки, выше по течению которой располагается действующий вулкан, да еще покрытый льдами, конечно, безумие. Но кто знал, что так будет?

Вулканы опасны еще и тем, что находясь даже в состоянии покоя, они непрерывно выделяют ядовитые газы. Так, в Камеруне, в центре Западной Африки, располагается молодая рифтовая зона, у которой есть целый ряд активных вулканов. От некоторых остались только кратеры, заполненные водой. Выделившийся в 1986 году из такого кратера (озеро Ньос) углекислый газ вызвал массовую гибель людей и животных.

Существует еще один тип извержений, характер которых предсказать невозможно, но последствия могут быть трагичными, если они произойдут в населенной местности. Это так называемые пепловые потоки. Примером таких извержений может служить колоссальный взрыв в июне 1912 г. на Аляске, к



Рис. 3.18. Город Армеро, разрушенный селевым потоком вулкана Невадо-дель-Руис в 1983 г.

счастью, в ненаселенном районе. Там произошел взрыв двух вулканов — Новорупта и Катмай, в результате которого было выброшено почти 30 км^3 вулканического материала, заполнившего большую ледниковую долину с притоками толщиной до 200 и более метров. Толща была горячей, и из нее долгое время поднимались столбы дыма и пара, из-за чего ботаник Р.Ф. Григгс, посетивший долину спустя 4 года после извержения, назвал ее «Долиной десяти тысяч дымов». Взрыв был такой силы, что вулканический пепел выпадал в Калифорнии на расстоянии 4 тысячи километров.

Геологи, посетившие эти места спустя 13 лет после извержения, выделили новый тип пород — игнимбриты (от лат. *ignis* — огонь, *imber* — ливень). Они решили, что кислые породы, содержащие много оксида кремния, главным образом, риолиты, занимающие огромные площади и обладавшие гигантским объемом, образовались именно из «огненного ливня», т.к. кислые риолитовые вулканы сами по себе не могут распространяться на большие расстояния в силу высокой вязкости. Впоследствии эта теория была оставлена как несостоятельная,

так как в мощной туфогенно-пепловой толще частицы не были спекшимися, а в игнимбритах «настоящих» они все спеклись, как бы сварены при высокой температуре.

Образование «настоящих» игнимбритов, под которыми понимают спекшиеся или сваренные частицы вулканического стекла, образовавшиеся при взрыве магмы, и по сей день представляет загадку и ей посвящено очень много работ.

На Северном Кавказе в верховьях реки Чегем в Кабардино-Балкарии, находится огромная толща риолитовых игнимбритов мощностью в 2 км (!), не имеющая никаких перерывов. Т.е. она образовалась, как говорят, в один присест и находится в кальдере — впадине, от которой шлейф игнимбритов тянется к северу еще километров на 80, вплоть до Нальчика, имея мощность в 200–300 метров. Возраст риолитов около 2,8 млн лет. Магматический очаг, причем первичный, был на глубине 20–25 км, т.е. в верхней гранитно-метаморфической коре. Когда масса, эквивалентная более 100 км³ была вынесена из очага, субстрат просел, образовав впадину. И только потом, после длительного перерыва, во время наступившего оледенения, произошло извержение андезитовых лав, содержавших меньше оксида кремния. По-видимому, это были магмы из низов дифференцированного очага.

Сейчас человек способен лишь тщательно наблюдать за вулканами, иногда предсказывать время и место извержения, а иногда бессильно смотреть на природную стихию.

Так, утром 20 февраля 1943 г. в Мексике на кукурузном поле крестьянина из деревни Парикутин, что вроде бы означает на местном диалекте «на краю поля», вдруг образовались трещины и из них пошел дым с запахом серы. Крестьянин пытался их засыпать, но вскоре понял, что это бесполезно, трещины расширялись, дым валил гуще, а на другой день уже вырос шлаковый конус и началось извержение, выбрасывались куски лав, туфы, пепел, а через пару недель вырос правильный конус высотой в 150–200 метров. Надо сказать, что этот вулканический конус образовался на высоте 2800 метров на склоне крупного, высотой уже в 3300 метров, вулкана Танцитеро. Извержения

продолжались, и конус Большого Парикутина вырос за 6 лет до 400 метров. Рядом с ним образовался такой же конус, но поменьше – Малый Парикутин. Эксплозивные извержения чередовались с излиянием ландезито-базальтовых лавовых потоков – типичных «аа» лав с глыбовой поверхностью (рис. 3.19).

У подножья Танцитеро был равнинный участок, где находилось селение Сан-Жуанс (Сан-Хуан-де-Парангарикутиро) с 6000 жителями. С приближением лавового потока в январе-августе 1944 г. они сумели покинуть селение, но лава его полностью перекрыла. А сейчас из мрачных, черных, покрывших почти 25 км² лав, торчит колокольня и стены собора 1618 г. (рис. 3.20). Жителям окрестных деревень оставалось только наблюдать за стихией, т.к. извержение продолжалось почти 9 лет. Сейчас



Рис. 3.19. Шлаковый конус вулкана Парикутин, возникшего в 1943 г.

вулкан замер. Но сколько он будет еще спать? Никто не знает. В наши дни 20 февраля в собор приносят цветы, т.к. считают, что он сохранился не без помощи Божественных сил.

Надо сказать, что недалеко от вулкана Парикутин, но уже в 1759 году, также неожиданно возник вулкан Хорульо, извержения которого продолжались почти 16 лет.



Рис. 3.20. Лавовый поток вулкана Парикутин (Мексика). Извержение 1943 г. Лавы залили большое поселение, от которого осталась только часть церкви (фото Н. В. Короновского)

В Японии, на юге о-ва Хоккайдо, находится вулкан Усу, извержение которого в 1909 г. вошло в историю благодаря необычным событиям. Все началось с непрерывно нарастающих сильных подземных толчков, а на склоне вулкана начал быстро расти купол. За несколько месяцев он вырос на 150 метров, а затем прекратил рост на 3 десятилетия, но в декабре 1943 г. землетрясения, причем сильные, пошли одно за другим, до 200 за сутки. Потом их количество то уменьшалось, то возрастало вновь, и снова начал расти «волдырь», но уже в другом месте. Наконец, в конце июня 1943 г. «волдырь» прорвался выбросами глыб лавы, туфа, грязи и фонтанов воды и в кратере возникло озеро. После небольшого перерыва из кратера почти на километр поднялся столб воды, обломков и грязи. А 2 июля произошел мощный взрыв и выброс туфа и пепла, покрывших окрестные поселения слоем до 50 см. Все было уничтожено в окрестностях на десятки километров.

Но вулкан не затих. Снова на склоне вулкана как нарыв начал расти купол, достигший относительной высоты в 200–250 м.

Наконец, из трещин на его поверхности начала медленно выдавливаться, как паста из тюбика, вязкая андезитовая магма с низкой температурой. Это именно ее напор обеспечивал образование куполовидных вздутий на склонах Усу, который довольно часто эксплозивно извергается.

Мы все время вели речь о вулканах, которые в той или иной степени обладали взрывным типом извержений. Нельзя не сказать еще об одном очень интересном и опасном типе. А именно, об извержениях трещинных покровных базальтов, характеризующихся большими объемами излившихся жидких лав из протяженных открытых разломов. Такие извержения часто бывают в Исландии – острове, «сидящем» прямо на Атлантическом срединно-океаническом хребте. В 1783 г. на острове образовалась трещина Лаки длиной больше 25 км. Сначала происходили взрывы с образованием туч пепла, а потом изливавшиеся из нее в обе стороны с большой скоростью жидкие базальты покрыли площадь в 600 км^2 , объем лав достиг 15 км^3 , а длина базальтовых лавовых потоков достигла 60–70 км, такими жидкими они были. Европу, особенно Шотландию и Норвегию, накрыли тучи пепла, везде ощущался запах серы. Когда вулканическая активность стала уменьшаться, вдоль трещины возникли десятки небольших, до 30–40 метров, шлаковых конусов с хорошо выраженными кратерами. При извержении базальтов выделилось много сернистых газов массой более 500 млн тонн, ставших причиной массовой гибели скота и людей, птиц и рыбы и уничтожения пастбищ на десятки километров вокруг. Все это вызвало голод и гибель почти 20% населения Исландии, которое в то время не превышало 30 000 человек. А в Европе зима 1783 г. была очень холодной, т.к. температура понизилась из-за пепла, долго державшегося в воздухе.

Надо отметить, что извержения, при которых выбрасываются огромные массы пепла, газов, особенно содержащих серу, оказывают непосредственное воздействие на климат, главным образом, в сторону понижения температуры. Так, даже при одиночном извержении вулкана Пинатубо на острове Лусон (Филиппины) в 1991 году, когда в воздух было выброшено не менее 10 км^3 пепла, средняя температура в экваториальной зоне стала ниже на $0,5^\circ\text{C}$ (рис. 3.21).

Признаки извержения Пинатубо, молчавшего 600 лет, начались 2-го апреля, но максимальный взрыв произошел 12-го июня, когда газово-пепловая туча достигла высоты почти в 20 км, а 15-го июня — 40 км. В связи со сходом палящих туч по склонам вулкана, температура которых была почти в 900°C, из опасной зоны были эвакуированы десятки тысяч жителей. А тут еще налетел тайфун и грязекаменные потоки или лахары снесли все в радиусе 30 км от вулкана. Это была крупнейшая природная катастрофа в XX веке, и все сельскохозяйственные угодья на многие километры вокруг были уничтожены.

Огромное количество пепла и газов было выброшено при взрыве вулкана Кракатау 26 августа в 1883 г. в Малайском архипелаге в Индонезии. Этот взрыв считается одним из самых сильных в истории человечества. Он был слышен за 5000 км, облака пепла достигли высоты более чем в 55 км, объем выброшенного материала превышал 20 км³. Когда-то на этом месте был большой стратовулкан, который был частью дуги островов. Из-за мощного извержения в далекие времена вулкан взорвался, и на его месте возникла обширная кальдера диаметром почти в 7 км. Впоследствии в кальдере выросли три самостоятельных вулкана, образовавшие единый остров — Кракатау. Именно он и взорвался 27 августа 1883 г.

После гигантского взрыва вулкан обрушился и возникло несколько волн гигантских цунами, высотой до 40 м, от которых погибло более 40 тыс. человек. На расстоянии около 200 км от вулкана тьма от пепла наблюдалась двое суток, в том числе и в Джакарте. Выброшенные частицы пепла еще 2 года вызывали закаты необычайной окраски и перламутровые облака, а приземная температура в северном полушарии уменьшилась на полградуса.

Однако наиболее мощным в историческое время был взрыв вулкана Тамборо в Индонезии в 1815 г., когда объем выброшенного материала составил колоссальную цифру в 150–180 км³. Извержения Тамборо длились 2,5 месяца, начиная с 5-го апреля 1815 г. После сильнейшего взрыва 15 апреля высота вулкана уменьшилась на 1,5 км (тогда как раньше была 4 км), и на его месте возникла кальдера диаметром около 7 км и глубиной до 600 метров, что сопровождалось выбросом огромного объема



Рис. 3.21. Пепловые облака при извержении вулкана Пинатубо в 1991 г.

материала, во много раз больше, чем при взрыве Кракатау. Извержение привело к гибели почти 100 000 человек, включая погибших от последовавших болезней и голода. В 1816 г. на земном шаре повсеместно произошло понижение температуры.

Вот к чему приводит мощное эксплозивное извержение всего лишь одного вулкана. После крупных взрывных извержений и выбросов пепловых облаков температура через несколько месяцев всегда падает на 1–2 градуса.

А теперь представим себе, что извергался не один вулкан, а сотни, объем вулканогенного материала которых превысил 1 млн км³ и площадь вулканической деятельности занимала 2 млн км², да при этом выделился огромный объем газов. Так было в позднепермское и раннетриасовое время на Сибирской платформе 240–250 млн лет назад, когда формировалась так называемая трапповая серия базальтовых лав и туфов Тунгусской синеклизы². Многочисленные лавовые потоки и пластовые ин-

² Синеклиза — наклонение, очень пологий прогиб земной коры в пределах платформы

трузивы, внедрившиеся в тела базальтового состава, чередуясь с более рыхлыми туфами, образуют в рельефе как бы лестницу (швед. *trappa* — лестница). Установлено, что вся эта вулканическая деятельность происходила в очень короткий интервал времени, менее 1 млн лет, может быть даже в 100 000 лет. Такие извержения не могли не отразиться на природных условиях Земли в глобальном масштабе.

В атмосфере скопилось огромное количество углекислого газа. Его объем трудно даже представить, т.к. только один вулкан Сент-Хеллен в США в 1980 г. выбросил столько углекислого газа, сколько выделяется ежегодно на всем земном шаре. Вполне возможно, что в результате извержений загорелись угольные пласты с выделением метана. Во всех слоях возраста извержений трапповой формации был обнаружен изотоп легкого углерода, который присутствует в метане. Также установлено, что в это время в океанах неимоверно размножились пурпурные бактерии, которые выделяют сероводород, смертельный для организмов.

Грандиозные извержения базальтов в Восточной Сибири 250 млн лет назад возможно привели к массовому, беспрецедентному вымиранию биоты, когда погибли около 90% всех видов морских организмов и половина семейств. Такое извержение базальтов в относительно короткий промежуток времени стало возможным в результате подхода к литосфере мантийного плюма — мощного «столба» вещества с повышенной температурой. Он должен был содержать в себе какую-то часть погруженных ранее в мантию пластин древней океанической коры. Плавление верхней мантии при относительно более низкой температуре привело к образованию огромного объема магмы, вырвавшейся на поверхность.

Магма, исключительно богатая газами, могла вызвать биологическую катастрофу. Похожая катастрофа произошла в 1783 г. в Исландии при трещинном извержении базальтов в районе Лаки.

Совершенно очевидно, что любое запыление атмосферы приводит к снижению солнечной радиации, а крупное извержение способно уменьшить солнечное излучение на 10–20%, причем этот процесс может продолжаться даже несколько лет.

Интересное предположение о влиянии вулканических извержений сделали исследователи из Санкт-Петербурга. При изучении отложения в Мезмайской пещере, находящейся в горах Большого Кавказа в Краснодарском крае на плато Лагонаки, были найдены останки неандертальцев. Выше этих отложений располагаются слои вулканического пепла, которыми и ограничены следы неандертальцев. Поэтому был сделан вывод о том, что вулканические извержения так изменили среду обитания неандертальцев, что они больше сюда не вернулись. А произошло это около 40 000 лет назад. Возможно, эксплозивные извержения, сопровождавшиеся выбросом большого объема пеплов, вызвали резкое похолодание, и среда обитания стала непригодной для неандертальцев.

В конце мелового периода произошло образование трапповой наземной базальтовой формации огромного объема на полуострове Индостан. В это же время, вернее, чуть позже, упали метеориты, один из которых образовал кратер Чикскалуб на п-ве Юкатан в Мексике. Может быть, эти процессы наложились друг на друга, способствовав очередному великому вымиранию биоты на рубеже мелового и палеогенового периодов. Во всяком случае, любые крупные извержения безусловно, влияют на климат Земли, а теперь и на инфраструктуру нашей цивилизации. Вспомните активность вулкана Эйяфлатлайяокудль в 2010 г. и Гримсвотн весной 2011 г., «снявших» с полетов сотни самолетов. Мы пока ничего не можем противопоставить такому буйству подземной стихии.

Можно назвать один случай, демонстрирующий, что человек, все-таки, способен хоть немножко, но повлиять на взбунтовавшуюся природу.

В Исландии на острове Хеймаэй есть небольшой городок Вестманнаэйяр — главный рыболовный порт этой страны, находящийся на берегу гавани, важной для населения, занимающегося рыболовством. И вдруг, в ночь с 22 на 23 января 1973 г. произошло извержение вулкана Киркьюфелль, около другого вулкана Хельгафьелль — возникшего 5 тыс. лет назад, находящегося прямо над городом вблизи кладбища Киркьюбайр (рис. 3.22). Лавовый поток медленно продвигался вперед, за



Рис. 3.22. Извержение вулкана Киркьюффель на о-ве Хеймаэй в 1973 г. Исландия (фото G. Sigtoosson)

три недели вошел в море и сузил вход в бухту до 100 метров. Еще немного и вход был бы перекрыт, а это означало полное уничтожение рыболовного порта. Боковая стенка лавового потока, обращенная к городу, практически уже не двигалась, ее усиленно поливали водой из брандспойтов, пытаясь еще больше охладить. В конце концов, лавовый поток, первоначально изливавшийся из открывшейся трещины, остановился. Город и бухта были спасены.

На Гавайских островах есть активные, относительно невысокие, т.н. щитовые вулканы, из которых изливается подвижная базальтовая лава, потоки которой образуют обширный «щит» из базальтов. Килауэа – типичный представитель таких вулканов. У него есть обширный кратер с магматическим базальтовым расплавом, который во времена затишья покрыт застывшей коркой (рис. 3.23). Временами давление газов в очаге прорывает эту корку и тогда начинается извержение, а очень жидкие базальтовые лавы быстро стекают из кратера к океану. В начале августа 2011 г. началось очередное извержение и потоки лавы устремились к океану, попадая в который они вызывают стол-



Рис. 3.23. Кратер вулкана Килауэа, заполненный лавой
<http://udivitelnaya-planeta.blogspot.ru>

бы пара, поднимающиеся на сотни метров. На Килауэа организована вулканологическая лаборатория, сотрудники которой ведут непрерывные наблюдения за вулканом.

Интересно, что на острове Гавайи находится самая высокая гора в мире! Это вулкан Мауна-Кеа. Его высота, считая от океанского дна до вершины, составляет 10 205 метров, но примерно 60% располагается ниже уровня океана. На этом же острове есть еще два известных действующих вулкана — Килауэа и Мауна-Лоа.

Все острова Гавайского архипелага вулканического происхождения и, как полагают, связаны с происхождением Тихоокеанской литосферной плиты над горячей мантийной колонной — «хот спот», т.е. «горячей точкой», присутствие которой в мантии установлено до глубин в 600 км. Эта нагретая колонна мантии, или плюм, находится на одном месте, а Тихоокеанская плита перемещается к западу, поэтому возраст вулканических островов становится все более молодым к востоку, а Гавайский остров самый молодой — всего 800 000 лет. Предполагается, что основной магматический очаг для вулкана Килауэа находится на глубинах 70–80 км, т.е. в верхней мантии, а подошва океа-

нической коры — поверхность Мохо — в этом регионе располагается на глубине 10 км. Поскольку магма из очага все время продвигается вверх, обеспечивая частые извержения, то под вулканом до глубины в 40 км находится огромное количество гипоцентров — очагов землетрясений.

Следим за вулканами

Мы убедились в том, насколько разнообразны вулканы и типы их извержений. Это и относительно спокойное излияние жидких лав, образующих длинные потоки, и мощнейшие взрывные, эксплозивные извержения разных типов, а также медленное выдавливание из подводящих каналов вязкой магмы. После извержений еще долго продолжается поствулканическая деятельность с выходом сернистых газов, горячих вод, возникновением гейзеров. Современный вулканизм проявляется как в океанах, так и на континентах, особенно в активных окраинах, где океаническая кора погружается под континентальную, а также в зонах столкновений литосферных плит.

Вулканизм — один из самых важных геологических процессов на Земле, проявляющийся с ранних этапов ее развития. Считается, что вулканическая активность способствовала появлению жизни. В частности, именно вулканы внесли вклад в формирование земной атмосферы и гидросферы, выбросив значительное количество углекислого газа и водяного пара. Но извержения вулканов — это еще и разрушительная деятельность. Поэтому за ними надо следить.

Возможен ли прогноз вулканической опасности? Да, возможен, но конечно, с некоторыми оговорками. С одной стороны, важно предсказание начала извержения, а с другой — предсказание его характера. Для того чтобы исследовать опасность, исходящую от вулкана, необходимо изучить его возраст, природу продуктов извержения, их распределение, восстановить историю извержений, их периодичность.

Когда в близповерхностном магматическом очаге давление начинает увеличиваться и под его влиянием магма начинает двигаться по подводящему каналу, то этот процесс хорошо фиксируется сейсмографами как слабые, но частые землетрясе-

ния, как бы дрожание местности вокруг вулкана. Сейсмограммы, полученные от этих дрожаний, расшифровываются с трудом, и определить точно, где находится гипоцентр и на какой глубине находится поднимающаяся магма, удается не всегда. Ведь очаг и сейсмограф находятся очень близко друг от друга и все сейсмические волны сливаются. Но было и много случаев, когда сейсмографы «молчали», а извержение происходило внезапно, без всякой подготовки. Сама подготовка к выбросу магмы представляет собой классический нелинейный процесс, и когда произойдет бифуркация, т.е. катастрофа, зависит от столь большого количества факторов, что предсказание эволюции системы становится затруднительным.

Другие приборы – наклонометры и деформографы фиксируют деформацию местности, связанную с подъемом магмы. Термографы отмечают повышение температуры. Так, в начале марта 1961 г. на Камчатке под вулканом Безымянным, мощнейшее извержение которого в 1956 г. всем памятно, начались сейсмические толчки. А уже после этого было несколько слабых извержений, и все они предварялись нарастающими вулканотрясениями, регистрируемые только в пределах вулкана. Извержение 1961 г. предсказали с точностью в несколько дней.

Плоский Толбачик – действующий вулкан, высотой чуть больше 3000 метров. Напоминая небольшой округлый хребет длиной до 4 км с вершинным кратером, он окружен, особенно с юга, многочисленными, более сотни, небольшими вулканическими конусами, как бы насаженными на радиальные разломы, расходящиеся от главного вулкана. Все они находятся в Ключевской группе вулканов.

Извержения Плоского Толбачика происходят довольно часто, и мы знаем события 1793, 1932, 1939–1941, 1947 годов. Вулкан извергает очень жидкую базальтовую лаву, выбрасывая из жерла лавовые фонтаны с многочисленными бомбами. После взрывов 1947 г. вулкан замолчал на 28 лет, а в 1975 г. сейсмологи были обеспокоены возрастающими по силе толчками на его южном склоне. Землетрясения были мелкофокусными, и геологам удалось правильно предугадать место, где может быть прорыв магмы. И он действительно там произошел 6-го июля, образовалось четыре конуса.

Область этого Большого трещинного Толбачинского извержения протянулась вдоль зоны трещины на 40 км от вершинной кальдеры. Первые глубинные базальты были связаны с Северным прорывом, в 18 км от Плоского Толбачика, извержения которого продолжалось 72 дня, начиная с 1975 года. Затем извержение переместилось вдоль трещины и происходило в Южном прорыве уже в 28 км от Плоского Толбачика, и длилось 450 дней до 10 декабря 1976 года. После этого крупнейшего базальтового извержения, объем базальтовых лав и туфов которого составил 215 км^3 , вулкан затих и вновь дал знать о себе 27 ноября 2012 года, после 36 лет «спячки».

Источником базальтовой магмы этого нового извержения по данным академика С.А. Федотова является магматический очаг под вершинной кальдерой Плоского Толбачика, объем которого может достигать $40\text{--}70 \text{ км}^3$, а подъем магмы начинается с глубин 3-4 км. Этот новый прорыв базальтовой магмы, как и предыдущий, в 1975 году, был точно предсказан и всесторонне изучен российскими вулканологами и служит примером успешного прогноза.

Так же точно предсказали извержение недалеко от главной кальдеры вулкана Килауэа на Гавайских островах, когда зафиксировали подъем магмы под кратером Ики 14 августа 1959 г. с глубины 55 км, где располагались очаги землетрясений. Скорость подъема магмы составляла 0,6 км в сутки, поэтому дату начала извержения предсказали на 14 ноября, когда оно точно и произошло. Образовалась километровая трещина, из которой стала фонтанировать жидкая базальтовая лава. Извержение продолжалось чуть больше месяца, после чего возник новый центр, из которого излияния лав начались точно по прогнозу — 13 января.

В настоящее время взоры геологов, геофизиков и вулканологов обращены к западу США, где в штатах Айдахо и Монтана располагается Иеллоустонская кальдера. Дело в том, что Северо-Американская плита движется к юго-западу со скоростью несколько сантиметров в год. Под земной корой, в мантии находится т.н. горячая точка, или восходящая плюм-колонна нагретого материала, что вызывает образование магматических очагов, извержения и образование кальдер.

Горячие точки. В 1963 г. геолог Тузо Уилсон из университета г. Торонто (Канада), выдвинул гипотезу о горячих мантийных струях, медленно поднимающихся из нижней части мантии Земли и не меняющих свое положение в пространстве. А литосферная плита, перемещающаяся над этой мантийной струей, как бы «прожигается» ею и тогда образуются вулканические цепочки, трассирующие передвижение плиты.

Скорость продвижения Тихоокеанской плиты, если за начало отсчета взять наиболее древние вулканы, составила 10 см в год. Сейчас в океанах и на континентах выявлено более 40 подобных горячих точек – следов мантийных струй и перемещения над ними литосферных плит, что позволяет приблизительно определять скорость их движения и изменение направления, в котором они смещались (рис. 3.24).

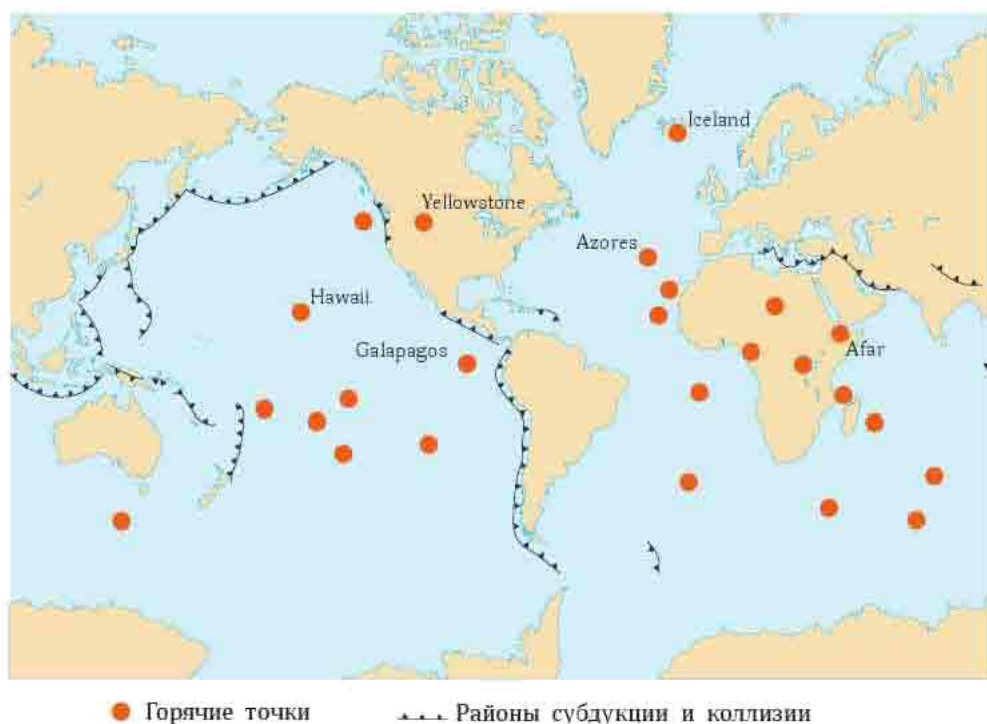


Рис. 3.24. Расположение горячих точек

Гипотеза «горячих точек» возникла у Тузо Уилсона при взгляде на грандиозную, более 2500 км, цепь потухших вулканов, образующих Гавайский хребет в Тихом океане. В головной части

этой цепи находятся действующие вулканы Гавайских островов, по мере продвижения к северо-западу, а потом и далее, уже почти к северу (Императорский хребет), каждый следующий вулкан оказывается древнее предыдущего, а возраст последнего из них 4,2 млн лет.

В этом районе насчитывается 6 таких кальдер, причем крайняя на юго-западе, находящаяся на границе штатов Орегон и Невада, имеет возраст 16–15 млн лет (рис. 3.25). К северо-востоку более молодые кальдеры имеют возраст от 15-ти до 1,3 млн лет, а последняя – 630 тыс. лет. По краям пониженного рельефа, где группируются все кальдеры, находится горный рельеф с активной сейсмичностью. Этими кальдерами отмечен путь Северо-Американской литосферной плиты над горячей точкой. Во время последнего извержения сформировалась кальдера около 70 км в диаметре, что свидетельствует о поистине грандиозном взрыве, выбросах туфа и пепла, попадание которых в высокие слои атмосферы вызывает глобальное похолодание.

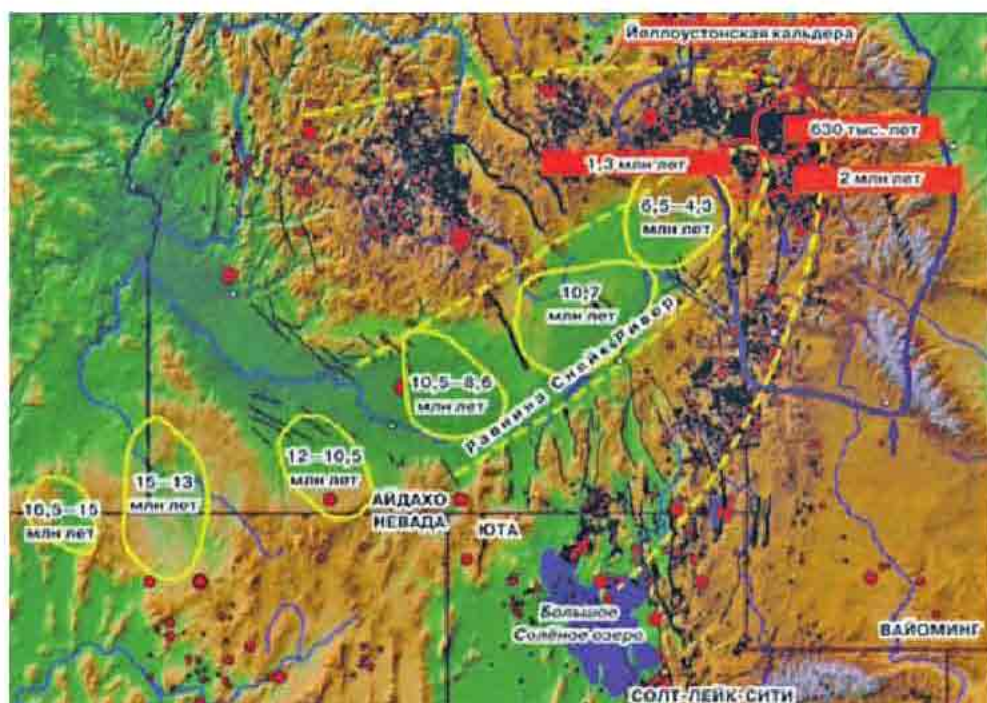


Рис. 3.25. Йеллоустоунские кальдеры
«Наука и жизнь», №5, 2012

В наши дни, по-видимому, отмечается продвижение магмы из очага к поверхности, т.к. поверхность вулкана поднимается на 7,5 см в год и, судя по периодичности формирования кальдер, время нового извержения приближается. И если оно произойдет, то его мощность будет в несколько тысяч раз больше, чем при извержении вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. в Кордильерах.

Предполагаемое мощное взрывное извержение этого супер-вулкана определяется кислым составом магмы, содержащей большое количество летучих веществ.

Извержение вулкана Сент-Хеленс произошло в 1980 году на западе США в Каскадных горах в штате Вашингтон. Оно не было таким грандиозным, но стало широко известным, благодаря тому, что было точно предсказано и тщательно наблюдалось и описывалось вулканологами. Вулкан до этого извержения обладал красивой правильной конусовидной формой, за что его называли



Рис. 3.26а. Вулкан Сент-Хеленс до извержения

американской Фудзиямой (рис. 3.26а). Сент-Хеленс проявлял активность и раньше, по крайней мере, с 1200 года до н.э., но извержения были довольно слабыми и сопровождались выбросами пепла, туфов, пемзы, грязевыми потоками — лахарами. Последнее, перед 1980 годом, небольшое извержение было в 1852 году.

Начиная со второй половины марта 1980 года, сейсмографы, установленные на вулкане, стали регистрировать все нарастающие по силе и частоте землетрясения, и 27 марта произошло первое за 123 года взрывное извержение вулканического пепла и газов из небольшого кратера на вершине. В последующие дни апреля и первой половине мая они усиливались и 18 мая 1980 года сейсмические толчки стали сильнее, превратились в сплошной сейсмический «шум», и из кратера вулкана стали сходить лавины туфов и пеплов (рис. 3.26б). Возникшее поднятие —

«пузырь» на северном склоне — расколелось и стало быстро как бы скользить вниз, что сопровождалось гигантскими выбросами газов и вулканического пепла.

Мощность взрыва была равна нескольким мегатоннам. Пепловое облако покрыло огромную территорию к восто-



Рис. 3.26б. Извержение вулкана Сент-Хеленс

ку и к югу от вулкана более чем на 1500 км. Возникли разрушительные грязекаменные потоки. В июне в огромном кратере вулкана стал расти экструзивный купол вязких дацитовых лав, а сейсмографы все еще регистрировали «дрожание» вокруг затихающего вулкана, который изменил свою прекрасную форму и стал ниже, а в его верхней части образовалась большая кальдера (рис. 3.26в). Весь процесс извержения был тщательно документирован и служит прекрасным примером вулканологических наблюдений.



Рис. 3.26в. Вулкан Сент-Хеленс после извержения

Есть еще два супервулкана, извержения которых, в принципе могут угрожать человечеству. Это, во-первых, знаменитый вулкан Тоба в Индонезии. Считается, что его последнее извержение 74 тыс. лет назад вызвало временное понижение средней температуры на земном

шаре на 6°C. Если вулкан снова взорвется — мало не покажется. Огромное понижение, занятое озером Тоба, длиной около 100 км, шириной в 30 км и глубиной до 500 метров — это ре-

зультат выброса на поверхность колоссального объема кислой магмы из близповерхностного очага. Во-вторых, очень опасный вулкан Таупо на Северном острове в Новой Зеландии. Последнее извержение у него было всего лишь 1800 лет назад. Вулкан образовал большую впадину длиной также около 100 км и шириной в 30 км, представляющую собой сложную кальдеру, сформировавшуюся также за счет обрушения кровли неглубоко залегавшего магматического очага с магмой кислого состава, давшего многочисленные пепловые потоки риолитов. Затем в кальдере Таупо возникли новые вулканические конусы — Тонгарио, Таравера и другие, как это обычно и происходит в случае образования таких кальдер или, правильнее сказать, вулканотектонических впадин. Полагают, что вулкан Таупо лишь «дремлет» и новое мощное извержение может произойти в любой момент.

Нельзя не сказать о еще весьма опасном вулкане Кумбра-Вьеха на острове Пальма, входящем в группу Канарских островов. Этот вулкан за последние пятьсот лет извергался несколько раз, но не очень сильно. Однако в результате извержений на крутом южном склоне возникла система трещин, разрезавших склон на ряд пластин. Все они находятся в неустойчивом состоянии и могут при новой активизации вулкана обрушиться, что вызовет гигантскую волну цунами, высота которой у побережья Северной Америки будет достигать 50 метров, не говоря уже о Западной Африке.

Прогнозу момента начала извержения сейчас уделяется, пожалуй, основное внимание, и в решении этой проблемы можно достичь вполне определенных успехов, если увеличить количество станций наблюдения вокруг потенциально опасных вулканов. Всё, как всегда, упирается в деньги. Но если вулкан располагается в густонаселенной местности, то никакие затраты не будут лишними.

Вторым направлением прогноза возможных извержений вулканов является предсказание характера извержений. Одно дело прогноз извержения вулкана Килауэа на Гавайских островах, когда кальдера периодически заполняется базальтовыми лавами и они, переливаясь через ее край, устремляются к морю. Такие извержения лишь привлекают толпы туристов. И совсем

другое дело — прогноз взрывного извержения, зависящего от многих параметров, которые все учесть невозможно. Очень важно знать глубину располагающегося под вулканом периферического магматического очага и содержание в нем летучих компонентов. В настоящее время создана теоретическая база прогноза извержений на опасных вулканах. Однако работы еще очень много, особенно в теоретическом плане.

Но есть места в густонаселенных районах, где вулкан, вернее, магматический близповерхностный очаг, располагается прямо под ногами. Это, т.н. Флегрейские поля и г. Поццуоли, расположенный к западу от Неаполя, по существу, его пригород. В старой части города находится знаменитый «храм» Сераписа, хотя на самом деле это был рынок. Остатки колонн этого сооружения 79 г. в середине изъедены моллюсками, т.е. эта часть колонн была под уровнем моря (рис. 3.27). Однако нижняя часть колонн не несет таких следов. Она была засыпана вулканическим пеплом. Потом вся площадь древнего рынка



Рис. 3.27. С.Ф. Щедрин. Храм Сераписа в Поццуоли
(Русский музей, С.-Петербург)

поднималась и опускалась, и в заливе сейчас можно видеть ушедшую под воду часть римского Поццуоли.

На Флегрейских полях много вулканических кратеров, выходов сернистых газов. Именно здесь находится знаменитая пещера Сольфатара, которую Данте Алигьери считал входом в ад. Все эти явления связаны с активным неглубоко расположенным магматическим очагом. Вполне возможно, что магма прорвется на поверхность и тогда это станет катастрофой, т.к. район плотно заселен. Вот где необходимы постоянные наблюдения. Кстати, в феврале 1970 г. в окрестности Поццуоли почва внезапно поднялась почти на 1 метр, что вызвало панику, но к счастью ничего не произошло.

В Боливии находится вулкан, о котором даже специалисты мало что знают, но он потенциально опасен, хотя последние извержения были несколько сотен тысяч лет назад. Вулкан называется Утурунку, и в последнее время в радиусе десятков километров вокруг него земная поверхность начала подниматься на несколько сантиметров в год. Это может означать, что магма начинает хоть и медленно, но подниматься, на что указывают и другие данные.

Полагают, что если извержение и произойдет, то главная опасность будет исходить от большого количества газов, особенно сернистых, что чревато негативными последствиями для климата и сельского хозяйства всей планеты.

Сейчас вулканологи Исландии ждут пробуждения знаменитого вулкана Гекла, извергавшегося последний раз в 2000 г. Поставленные вокруг вулкана различные приборы фиксируют вулканотрясения — необычно быстрое продвижение магмы в подводящем канале, что в конце концов может закончиться сильным взрывным извержением с выбросом мощного пеплового облака, намного большего, чем весной 2011 г. выбросил вулкан Гримсвотн, когда снова произошли сбои в полетах самолетов. Следовательно, вулкан находится «под присмотром».

В нашей стране ведется постепенный сбор данных о вулканах России. А ведь кроме сбора информации ее надо обрабатывать, сводить воедино геологические, геофизические и космические данные, выявлять различные аномалии, например, температурные, изменение рельефа и другие.

Необходимо собрать все материалы о «характере» вулкана в прошлом. Но даже все это не дает стопроцентной гарантии точного предсказания времени и, тем более, силы и типа извержений.

Несмотря на то, что вулканы изучаются уже сравнительно давно, остается еще масса нерешенных проблем, которые требуют систематического изучения на современном научном уровне. А для этого нужны специалисты, профессионально понимающие разнообразные вопросы вулканологии, геофизики, геологии, петрологии, физики и др.

Есть еще один тип вулканов, которые называются грязевыми, так как они извергают раздробленные и разжиженные глинистые породы с обломками других горных пород, воду, газ и нефть (рис. 3.28). После таких извержений, когда вода испа-

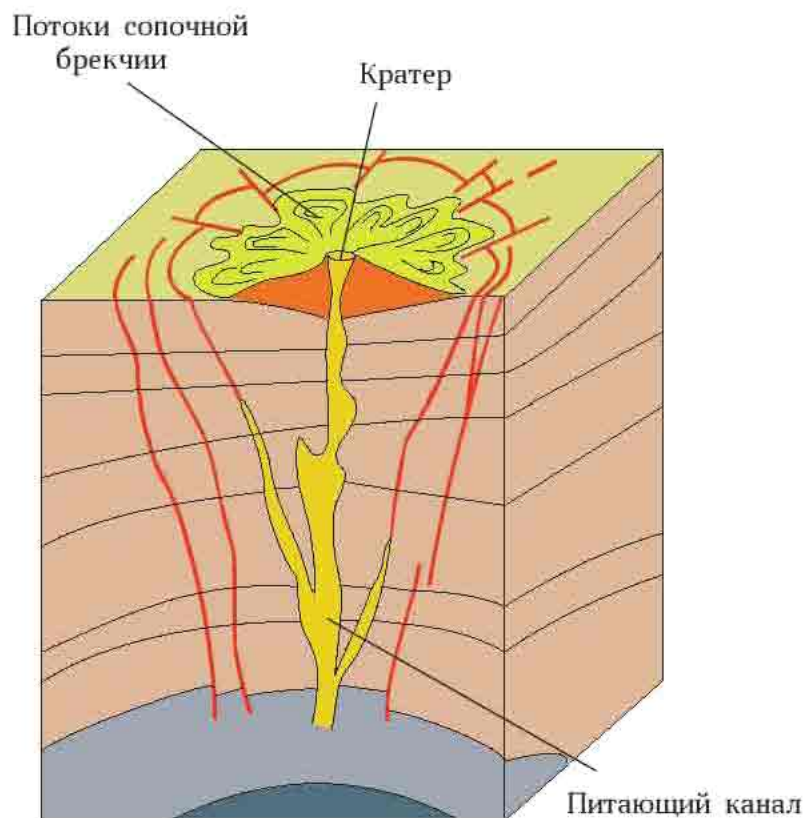


Рис. 3.28. Схема строения грязевого вулкана
(Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

рится, остается конус из так называемой сопочной брекчии — обломков, сцементированных глинистым материалом. Понятно, что этот тип вулканизма совсем иного происхождения, чем изложенный выше, и связан с наличием мощных толщ осадочных, преимущественно глинистых, пород, пластовых вод и углеводородных газов.

Как правило, грязевые вулканы находятся в районах нефтяных месторождений, так как газы и нефть, находящиеся под большим давлением, ищут выход на поверхность. И если в этих местах встречаются разломы, особенно в сводовых частях складок, в которых слои резко выгнуты вверх, то газы устремляются вверх, увлекая с собой воду и дробя и разжижая горные глинистые породы.

Так возникают грязевые вулканы, которые достигают высоты в сотни метров.

Грязевые вулканы известны на Таманском полуострове. О них упоминает Гомер в «Одиссее», когда описывает «печально оголенную местность», в грязевых вулканах которой он предполагал вход в мрачное подземное царство Аида. В этом районе находится около 30 вулканов, наиболее высокий из которых — Карабетова гора около 150 метров, другие поменьше. Такие же вулканы есть и на Керченском полуострове. Славятся грязевыми вулканами и Азербайджан, где в Кобыстане и в других местах насчитывается до 350 вулканов, крупнейший из них — Локбатан, мощнейшее извержение которого произошло в октябре 1977 года, когда массы грязи выбрасывались вверх на 200 метров. Грязевые вулканы есть в Италии, в Новой Зеландии и Америке. Всего в мире зарегистрировано порядка 800 таких вулканов.

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – КАТАСТРОФЫ, ПРИХОДЯЩИЕ ИЗ ГЛУБИН

Землетрясения всегда вызывали ужас своей силой, непредсказуемостью и последствиями. Человек пока не в силах их предсказать. Он может только примерно обозначить районы, в которых землетрясение может быть определенной силы. Мы привыкли думать, что земная твердь неподвижна, а когда она вдруг начинает колебаться, ходить волнами, раскалываться, человеком овладевает страх. По числу жертв, разрушениям, размерам ущерба, по площади, охватываемой землетрясением, эта природная катастрофа не имеет себе равных.

17 октября 1989 года Калифорния содрогнулась так, что этот цветущий край в мгновение ока превратился в хаос, покрытый дымом пожарищ. Это было очень сильное землетрясение с эпицентром недалеко от города Санта Круз на побережье Тихого океана. Один из очевидцев, бывший боевой летчик, говорил, что его небольшой дом ходил ходуном, трясся, вся мебель носилась по комнатам, двери заклинило, и он выбрался лишь через окно. То, что произошло на земле, было ужаснее обстрела самолета, который также трещал и болтался со стороны в сторону. А ведь тряска продолжалась всего 15 секунд! Но этого хватило, чтобы разрушить огромную территорию, подвергавшуюся еще более сильному землетрясению в 1906 году, когда пылали руины Сан-Франциско, крупнейшего города на западе США.

Самые разрушительные землетрясения мира имели магнитуду (о ней речь пойдет ниже) выше 7, а число жертв превышало десятки и сотни тысяч человек. Наиболее памятное землетрясение, произошедшее в Европе, случилось в Лиссабоне 1 ноября 1755 г. В 9 часов утра оно возвестило о своем начале жутким подземным гулом. Было три толчка, первый из которых продолжался около 5 минут и полностью разрушил город. Потом на развалины обрушилась волна цунами высотой в 17 метров, а затем еще две, довершив опустошение. Погибло 70 тыс. человек. Это землетрясение потрясло Европу.

Самые разрушительные землетрясения мира

Дата	Место	Число жертв, тыс.	Магнитуда
22 декабря 856 г.	Дамган, Иран	200	-
23 марта 893 г.	Ардабил, Иран	150	-
9 августа 1138 г.	Алеппо, Сирия	230	-
Сентябрь 1290 г.	Чихли, Китай	100	-
23 января 1556 г.	Шэньси, Китай	830	-
Ноябрь 1667 г.	Шемаха, Кавказ	80	-
18 ноября 1727 г.	Табриз, Иран	77	-
1 ноября 1755 г.	Лиссабон, Португалия	70	8,7
28 декабря 1908 г.	Мессина, Италия	100	7,5
16 декабря 1920 г.	Гансю, Китай	200	8,6
1 сентября 1923 г.	Канто, Япония	143	8,3
25 декабря 1923 г.	Гансю, Китай	70	7,6
22 мая 1927 г.	Кхининг, Китай	200	8,3
31 мая 1970 г.	Перу	66	7,8
27 июля 1976 г.	Таньшань, Китай	255	8,0
7 декабря 1988 г.	Спитак, Армения	25	7,2
26 декабря 2004 г.	Зап. побережье о. Суматра	230	9,1–9,3
8 октября 2005 г.	Пакистан	40	7,7
12 мая 2008 г.	Провинция Сычуань, Китай	87	7,8
12 января 2010 г.	Гаити	50	7,0
11 марта 2011 г.	Тохоку, Япония	20	9,1

7-го июня 1692 г. на Ямайке исчез знаменитый портовый город Порт-Ройал, база английского флота и пристанище пиратов Генри Моргана. В течение нескольких минут город погрузился в бурлящие воды, поглотившие несколько тысяч человек. Это землетрясение ощущалось в радиусе более 2000 км.

Город Мессину на северо-востоке Сицилии в 5 часов 20 минут 28 декабря 1908 г. потряс удар, сопровождавшийся подземным гулом, тряской, волнообразным качанием поверхности земли и полным разрушением. Погибло по разным данным от 60 до 100 тысяч человек. На помощь пришли матросы русской эскадры, стоявшей в это время на рейде.

В китайской провинции Гансю 16 декабря 1920 г. от землетрясения погибло 200 тыс. человек, 1 сентября 1923 г. в Японии жертвами землетрясения, эпицентр которого находился в 80 км к юго-западу от Токио, стали 143 тысячи жителей провинции Канто. Этот список трагических событий, связанный с мощными землетрясениями, можно продолжать и продолжать.

На территории России и СССР сильные землетрясения отмечались не раз, например, Верненское (старое название Алма-Аты) в 1887 году, Андижанское 1902 года, Хаитское 1949 г., Ашхабадское 1929 г., Шемахинское 1902 г., Дагестанское 1970 г. и целый ряд других. Особенно памятно Ашхабадское землетрясение ночью 6 октября 1948 г., во время которого глинобитный город был разрушен почти полностью, уцелело лишь несколько домов. Тогда погибли десятки тысяч жителей. На поверхности земли возникли глубокие и протяженные трещины, пересекающие холмы и долины и никак не связанные с ориентировкой рельефа. На склонах образовались обвалы, оползни и осыпи. Землетрясение произошло ночью, когда печи не топились, поэтому почти не было пожаров. Но катастрофа была ужасная, и вся страна пришла на помощь. Новое строительство велось уже с соблюдением всех норм сейсмичности зданий, т.к. предгорья гор Копетдага — это район высокой сейсмической опасности.

На земном шаре есть районы, где землетрясения происходят постоянно, в других — случаются эпизодически, в третьих — отсутствуют совсем. Почему так происходит? Что представляет

собой землетрясение? Какими процессами оно обусловлено? Можно ли предсказать место и час очередного землетрясения? Всеми этими вопросами интенсивно занимаются геофизики, геологи и строители, озабоченные созданием таких конструкций, которые выдерживали бы самые сильные землетрясения.

Что представляет собой землетрясение и как оно возникает

Землетрясение представляет собой очень быстрое смещение горных пород на разной глубине, как в земной коре, так и в верхней мантии Земли. Но эта «быстрота» все-таки не «мгновенная», а идущая с некоторой конечной скоростью. В определенном объеме пород происходит образование, обновление и слияние множества разномасштабных трещин со вспарыванием каждой из них не только с высвобождением, но и перераспределением энергии. Обычно говорят, что сила внешнего воздействия на горные породы превысила предел их прочности, и они разрываются. Но следует иметь в виду, что в науке геомеханике четко различают прочность материала пород, которая относительно высока, и прочность породного массива, включающего, помимо материала собственно горных пород, еще и ослабленные структурные зоны в этом массиве. Из-за этого прочность породного массива существенно ниже, чем прочность собственно пород.

Скорость распространения разрывов составляет несколько километров в секунду, и этот процесс разрушения охватывает некоторый объем горных пород – очаг землетрясения. Центр очага называется *гипоцентром*, это условно точечный источник короткопериодных колебаний. Во многих случаях, но не всегда, тектонические разрывы имеют сдвиговую природу, и очаг охватывает определенный объем пород вокруг разрыва (рис. 4.1).

От очага землетрясения во все стороны со скоростью 2–5 км/с распространяются упругие объемные волны с частотой 10^2 – 10^3 Гц. Проекция гипоцентра на поверхность земли называется *эпицентром* землетрясения. Это та точка, о которой обычно объявляют по радио и телевидению.

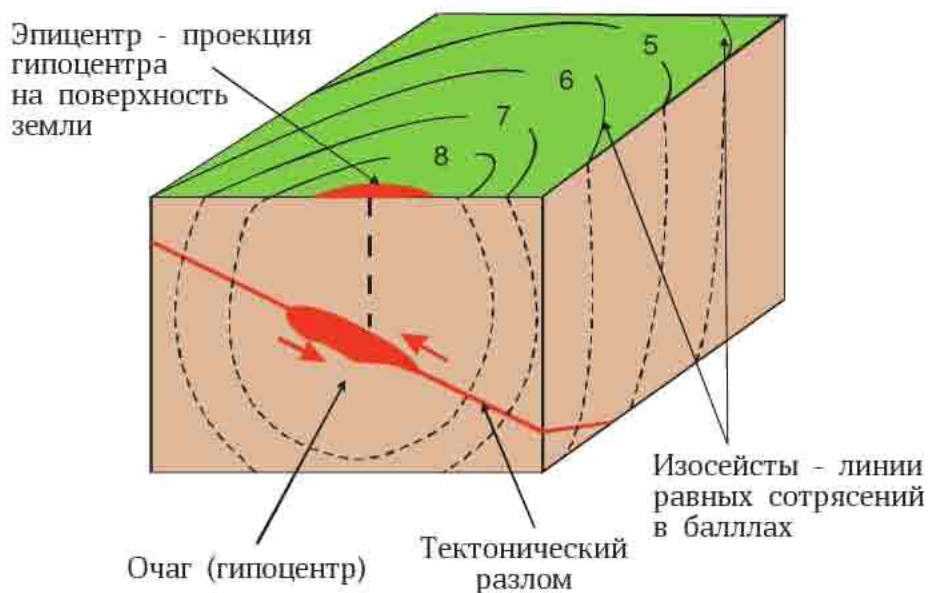


Рис. 4.1. Характеристики землетрясения
(Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева, 2013)

Интенсивность землетрясений изображается линиями равной интенсивности или *изосейстами* в баллах. Область максимальных баллов вокруг эпицентра носит название *плейтосейстической области*.

То, что поверхность Земли испытывает сотрясение от прохождения через нее упругих волн, предположил еще в XVIII веке Джон Митчелл. Он же пытался найти и источник возбуждения этих волн. В очаге землетрясений возникают упругие волны всех типов, о которых мы говорили в первом разделе книги, а именно: продольные, поперечные, Лява и Рэлея. Нас особенно интересуют продольные — волны сжатия и поперечные — волны сдвига.

Как определяют силу землетрясений

Землетрясения возникают, когда земная кора или верхняя мантия испытывает деформации сжатия или растяжения. А это происходит, в основном, в тектонически активных областях. Об этом мы еще поговорим, а сейчас попытаемся понять, как оценивают землетрясения.

Сейчас наиболее распространена шкала землетрясений профессора Калифорнийского университета – сейсмолога Ч.Ф. Рихтера. С 1935 г. шкала оценки высвобожденной в очаге землетрясения энергии носит название шкалы Рихтера и использует понятие *магнитуда* (M), которое определяется формулой:

$$M = \lg L + f,$$

здесь L – максимальная амплитуда сейсмической волны в микрометрах, измеряемая стандартным сейсмографом на расстоянии не более 600 км от эпицентра землетрясения; f – корректирующая функция, зависящая от расстояния до эпицентра, вычисляется по таблицам. Поскольку измеряемая амплитуда зависит не только от расстояния сейсмографа до эпицентра, но и от состава пород, через которые проходит волна, то для разных регионов должны использоваться разные таблицы корректирующей функции.

Примерная связь между энергией, выделившейся при землетрясении, и магнитудой предложена Б. Гуттенбергом, геофизиком, работавшим, как и Ч.Рихтер, в Калифорнийском технологическом институте. Увеличение энергии в 32 раза соответствует возрастанию амплитуды колебаний земной поверхности в 10 раз и увеличению магнитуды на одну единицу.

Магнитуда изменяется от 0 до 8,8 и очень редко может превысить это значение, как было, например, при землетрясении в Тохоку (Япония) весной 2011 г., когда магнитуду оценили в 9,0 и даже 9,1, а в Лиссабоне в 1755 г. было 8,9.

Если сравнивать энергию и магнитуду, то взрыв первой атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму в Японии эквивалентен магнитуде 6,0–6,2, а взрыв водородной бомбы – уже 8,8.

В российской сейсмологии для оценки энергии землетрясений используется понятие энергетический класс K , с которым сейсмическая энергия E связана простой формулой:

$$E = 10^K \text{ джоулей.}$$

В среднем по миру для пересчета магнитуды M в энергетический класс K принята формула:

$$K = 4 + 1,8 M.$$

Другая характеристика интенсивности землетрясений – мера сейсмических сотрясений в пункте наблюдения. В России распространена шкала MSK-64, предложенная С.В. Медведевым, В. Шпонхойером и В. Карником (см. аббревиатуру). По этой шкале принята 12-бальная оценка интенсивности.

Балл. Сила землетрясения	Краткая характеристика
I. Не ощущается	Не ощущается. Отмечается только сейсмическими приборами.
II. Очень слабые толчки	Отмечается сейсмическими приборами. Ощущается только отдельными людьми и очень чуткими домашними животными
III. Слабое	Ощущается только внутри некоторых зданий, как сотрясение от грузовика.
IV. Интенсивное	Распознается по легкому дребезжанию и колебанию предметов, посуды и оконных стёкол, скрипу дверей и стен.
V. Довольно сильное	Общее сотрясение здания, колебание мебели. Трещины в оконных стеклах и штукатурке. Пробуждение спящих. Ощущается людьми и вне зданий, качаются тонкие ветки деревьев.
VI. Сильное	Ощущается всеми. Картины падают со стен. Отдельные куски штукатурки откалываются.
VII. Очень сильное	Повреждения (трещины) в стенах каменных домов. Антисейсмические, а также деревянные и плетневые постройки остаются невредимыми.
VIII. Разрушительное	Трещины на крутых склонах и на сырой почве. Дома сильно повреждаются. Падают фабричные трубы.
IX. Опустошительное	Сильное повреждение и разрушение каменных домов. Старые деревянные дома кривятся.
X. Уничтожающее	Трещины в почве. Оползни и обвалы со склонов. Разрушение каменных построек.
XI. Катастрофа	Широкие трещины в земле. Каменные дома почти полностью разрушаются.
XII. Сильная катастрофа	Изменяется рельеф. Ни одно сооружение не выдерживает.

В нашей стране всё сейсмотектоническое районирование основано на этой шкале, по ней же составлены карты и ведется все строительство.

Повторим еще раз.

Магнитуда — количественный безразмерный параметр, который приближенно характеризует энергию, выделившуюся в виде сейсмических волн в очаге (гипоцентре) землетрясения.

Баллы по шкале MSK-64 или какой-либо иной — качественная характеристика сейсмических сотрясений в месте наблюдения. Интенсивность землетрясения можно оценивать только в целых значениях баллов в рамках шкалы.

Землетрясения происходят на разной глубине, а их интенсивность тем выше, чем ближе к поверхности находится очаг. Но колебания в последнем случае быстро затухают при удалении от эпицентра. Так, при землетрясении в Карпатских горах в Румынии в декабре 1978 г., несмотря на то, что магнитуда была 5, колебания ощущались даже в Москве, т.к. глубина гипоцентра была 100 км. При очень сильных землетрясениях с $M = 8$ сейсмоколебания земной поверхности охватывают огромную площадь с радиусом более 1000 км. Так, при глубине очага в 40 километров и $M = 5$ площадь разрушений составляет около 100 км², а при $M = 8$ уже 20 000 км².

Большая часть землетрясений возникает в верхней части относительно более хрупкой земной коры на глубинах 7–30 км. Во всех случаях землетрясения происходят в результате смещения по разломам в горных породах. Очаг землетрясения недоступен для непосредственного наблюдения, но существует много дистанционных методов исследования, основанных на законах механики, моделирование и т.п. Теоретическими расчетами определяют положение плоскости разрыва в очаге, его динамические параметры и механизм разрушения. Для формирования полной картины процесса важно установить: были это сжатия или растяжения, имел ли место сдвиг и как он был ориентирован.

Если очаг землетрясения располагается неглубоко, то сейсмический разрыв вообще может выйти на поверхность, как это случилось, например, при Спитакском землетрясении в Арме-

нии, где разрыв в виде уступа высотой в 0,5 м прослеживался на склоне горы на несколько километров. Но в любом случае очаг представляет собой не плоскость, а некоторый объемный блок горных пород, в пределах которого подвижки могут происходить по целому ряду небольших разломов, впоследствии сливающихся в один крупный.

Землетрясение в Армении с эпицентром в небольшом городе Спитак, произошедшее 7 декабря 1988 г., было исключительным событием в новейшей истории Кавказа. Магнитуда землетрясения составила 7,1, а интенсивность по шкале MSK-64 — 10 баллов, т.е. оно было уничтожающим. Погибло более 25 тыс. человек и 250 000 пострадали. Десятибалльная зона длиной примерно в 50 км и шириной в 18–20 км вытянута в северо-западном направлении. Вышедший на поверхность сейсмогенный разрыв, т.н. взбросо-сдвиг — разрыв с косым смещением, имел стенку примерно 0,5 м, что является свидетельством очень сильного смещения.

Сильные разрушения в городе Гюмри, бывшем Ленинакане, произошли из-за нарушения правил сейсмостойкого строительства многоэтажных зданий, хотя в 1927 г. этот город уже был разрушен землетрясением.

Можно привести еще пример. 27 мая 1995 года ночью, на севере о-ва Сахалин произошло мощное землетрясение с $M = 7,7$, т.е. по нашей шкале это было 9 баллов (опустошительное), хотя на карте сейсмического районирования это место относилось к 7-балльным землетрясениям. Поселок Нефтегорск оказался полностью разрушенным, погибло более 2-х тысяч жителей. Очаг землетрясения располагался вблизи поверхности и вышел на нее в виде серии разрывов общей протяженностью в 40 км. Главный разрыв имел вертикальное смещение 2 метра, а горизонтальное — до 8 метров и состоял из целого ряда более мелких разрывов, образующих сложную динамическую систему, прослеживающуюся до глубины в 15 км. После детального исследования этого района выяснилось, что в пределах главного разлома имели место еще более сильные землетрясения 1000, 1400 и 1800 лет назад.

В Курило-Камчатской активной зоне, где землетрясения имеют $M = 7,9–8,3$, очаги имеют размеры уже в несколько сотен

километров, а подвижки по разломам превышают 10 метров, и очаг охватывает большие объемы пород в погружающейся океанической литосферной плите.

Почему во время землетрясения качаются и разрушаются дома, дороги, да и вообще любые сооружения? Мы уже говорили о типах сейсмических волн, расходящихся во все стороны от очага землетрясения, или его гипоцентра, т.е. центральной части очага. Продольные волны похожи на звуковые, если вышедшая на поверхность волна имеет частоту более 15 герц. Поперечная волна более медленная и приходит на поверхность позже. Эти упругие волны, прежде чем достигнуть поверхности земли, проходят через слой горных пород, обладающих разной плотностью и разными упругими свойствами, поэтому волны преломляются в них и, достигнув поверхности, отражаются, что приводит к увеличению амплитуды колебаний поверхности. Иными словами, на поверхности будет смесь, своеобразный «коктейль» из сейсмических волн. Пришедшими первыми продольные волны вызывают иногда гул, здания трещат, а пришедшие вслед за ними поперечные волны уже начинают раскачивать эти треснувшие здания во все стороны, в результате чего они и разрушаются.

Все это может продолжаться десятки секунд или минуты. Вспомните телевизионные кадры землетрясения 2011 года в Фукусиме в Японии. Объектив показывает большую комнату какого-то учреждения, и вдруг все внезапно поднимают головы, хватаются за столы, спинки стульев, и тут же начинают раскачиваться люстры, шкафы, столы с компьютерами падают, бумаги летят во все стороны. Вот это и есть почти одновременный приход продольной и поперечной волн, т.к. очаг располагался на глубине всего лишь в 30 км.

Степень разрушения зданий зависит от типа сейсмических волн. Если здание высокие, то для них наибольшую опасность представляют волны с длинным периодом, а если дома небольшие, то для них разрушительны короткие, резкие колебания. В настоящее время предпочтение в строительстве отдается гибкости высотных сооружений, а не их жесткости. Даже водопроводные и газовые трубы делаются с применением эластичных соединений, которые не разрываются при колебаниях, фунда-

менты конструируют «плавающими», создают системы амортизаторов и т.д. Все это делается для того, чтобы здания, качаясь, не разрушались. И это сыграло свою роль в США и Японии.

Землетрясения подготавливаются длительное время, когда по каким-либо причинам растет напряжение в горных породах. Наконец, оно подходит к пределу прочности пород и последние начинают «потрескивать», что выражается в землетрясениях относительно небольшой силы. Это так называемые «форшоки», предваряющие землетрясения главного удара — «шока». Если бы можно было точно знать, что за ними будет главное землетрясение! Тогда можно было бы подготовиться, но, как правило, предсказать главный удар не удастся, т.к. не всегда слабое землетрясение — это именно «форшоки». А после основного землетрясения обычно происходят еще несколько, обозначающих как бы окончательное рассасывание напряжений. Эти землетрясения называются «афтершоками».

Геологическая позиция землетрясений

Расположение эпицентров землетрясений на земном шаре носит крайне неравномерный, но вполне закономерный характер. Одни места характеризуются высокой сейсмичностью, а в других — землетрясений нет совсем. Если посмотреть на распределение эпицентров за последние 30 лет, то можно увидеть, что в значительной степени они концентрируются вокруг Тихого океана, в так называемых активных континентальных окраинах, где тяжелые океанические литосферные плиты погружаются под более легкие континентальные (см. «субдукция» на рис. 1.13), и везде прослеживается наклонная зона концентрации гипоцентров под континент или островную дугу.

Погружающаяся плита, место перегиба которой отмечено глубоководными желобами, испытывая сопротивление мантии, подвергается воздействию напряжений, разрядка которых и приводит к землетрясениям. Впервые наклонную зону гипоцентров или сейсмофокальную зону выделил в 1935 г. японский сейсмолог К. Вадати, потом русский геолог А.Н. Заварицкий. В 1955 г. американский геофизик Х. Бенъоф из Калифорнийского технологического института свел воедино всю информацию

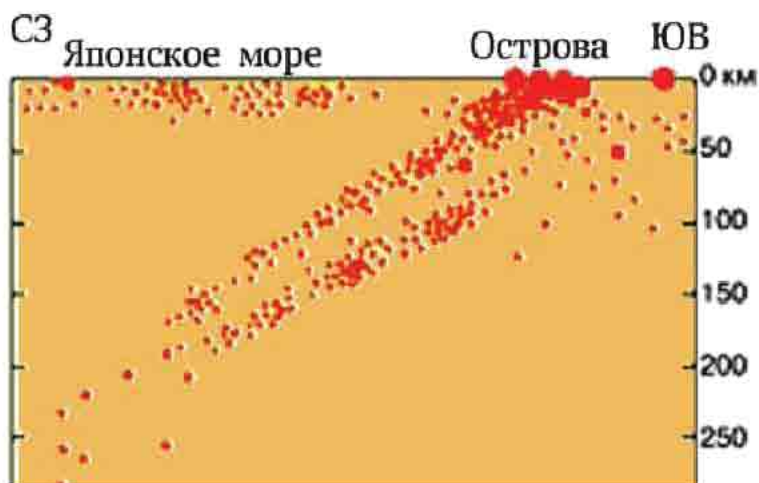


Рис. 4.3. Сейсмофокальная зона Бенъофа в Японском море
(Н. В. Короновский, Г. В. Брянцева)

и тем самым вошел в историю, т.к. с тех пор наклонные, уходящие под континенты зоны скопления очагов землетрясений, называют зонами Бенъофа (рис. 4.3).

Глубина зон Бенъофа сильно различается в разных местах. Например, под островами Тонга она заканчивается на глубине почти 700 км, а под Западной Мексикой глубина очагов землетрясений не превышает 120–140 км. Зона Бенъофа это не просто скопление беспорядочно размещенных очагов. Часто прослеживается их двойная система в верхней и нижней части погружающейся океанической плиты, тогда как в средней ее части очагов практически нет. Под западной активной континентальной окраиной Южной Америки зона Бенъофа имеет извилистые очертания, она то выполаживается (выравнивается), то погружается более круто. Это позволяет реконструировать конфигурацию погружающейся океанической плиты.

До возникновения тектоники литосферных плит зоны Бенъофа связывались просто с наклонными разломами, и только с ее появлением стало понятно, что они в действительности отражают. Изучение конфигураций зон Бенъофа и выяснение механизмов разрушения пород в очагах землетрясений дает очень много для понимания глобальных процессов перемещения литосферных плит, учитывая, что с этим процессом связан и активный вулканизм.

Кроме активных окраин в Тихом океане и в восточной части Индийского океана, узкие сейсмические пояса слабых и крайне неглубоких, до 10 км, землетрясений, совпадают с осевой, рифтовой зоной срединно-океанических хребтов. Такое положение очагов в этой зоне понятно, т.к. в ней происходят процессы растяжения, что характерно для дивергентных, т.е. расходящихся границ литосферных плит, где океаническая кора наращается в зоне растяжения (рис 4.4).

На земном шаре есть еще одна зона сильной сейсмичности, простирающаяся в широтном направлении от Гибралтарского пролива до Гималаев и фиксирующая собой зону столкновения двух крупных литосферных плит — Африкано-Аравийской и Евразийской.

Почему эти плиты начали сближаться и, в конце концов, столкнулись? Около 200 млн лет назад начал распадаться суперматерик Пангея. Постепенно стал образовываться Атлантический океан. Он «раскрывался» в широтном направлении и обе Америки и Европа с Африкой расходились. При этом Африка и Аравийский полуостров, соединенные в одну огромную плиту, двигались к северу, а океан Тетис уменьшался (рис. 4.5) Наконец, этот океан исчез и на его месте возник протяженный горно-складчатый комплекс.

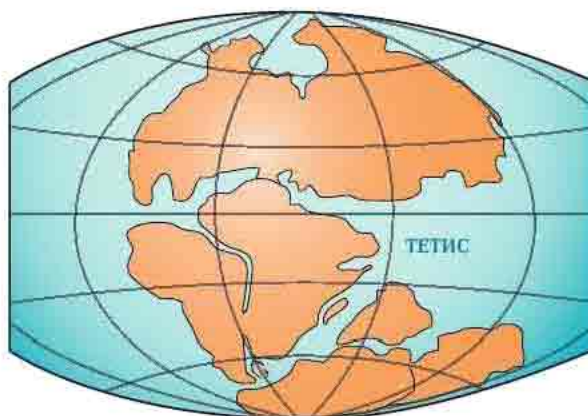


Рис. 4.5. Океан (море) Тетис
200 млн лет назад

Эпицентры землетрясений прихотливо расположены в этом регионе, подчиняясь сложному молодому неоген-четвертичному (25–0 млн лет) структурному рисунку Альпийско-Гималайского горно-складчатого пояса. Гипоцентры большинства землетрясений мелкофокусные, т.е. неглубокие, и концентрируются в верхней, хрупкой земной коре, а более глубокие, в 100–200 км, развиты лишь спорадически. Местами существуют остаточные, небольшие сейсмофокальные наклонные зоны, например, в го-

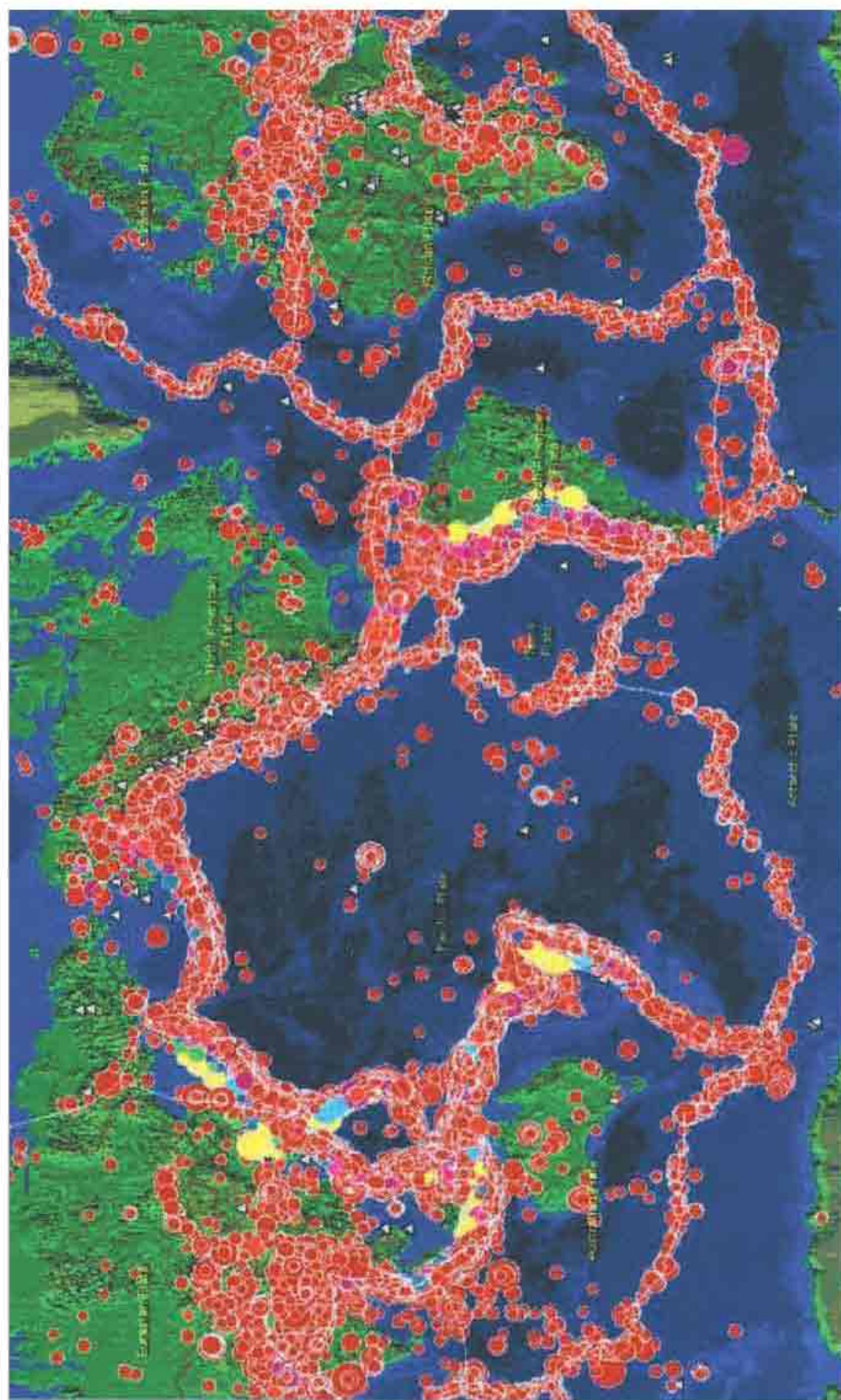


Рис. 4.4. Схема эпицентров землетрясений

рах Загрос в Иране, где гипоцентрами отмечены реликты погруженной океанической плиты.

Вся сейсмичность этого пояса отражает обстановку сжатия, которая накладывается на сложную мозаику разнородных структурных элементов — жестких хрупких массивов и более пластичных и деформированных складчатых областей.

Хороший пример такой жесткой плиты, перемещающейся к северу со скоростью 2 см в год с вдавливанием в складчатые области Кавказского перешейка, представляет собой Аравийская плита. В результате этого процесса складчатые цепи Восточного Тавра изогнуты к северу, а Анатолия отжимается к западу, из-за чего сформировался прекрасно выраженный широтный разлом — Северо-Анатолийский сдвиг, с которым связаны многочисленные разрушительные землетрясения, фиксирующие собой периодическую разрядку постоянно растущих напряжений.

23-го октября 2011 г. в 13 час. 41 мин по местному времени в Турции произошло сильное землетрясение с $M = 7,2$. Эпицентр находился в районе оз. Ван, севернее горно-складчатой цепи Восточного Тавра. Гипоцентр был на глубине около 10 км, но по уточненным данным мог быть и глубже, до 20 км. На 1-е ноября погибших было более 600 человек и более 1500 раненых. Землетрясение ощущалось в Иране, Армении и даже в Грузии. После главного толчка сразу же начались последующие, но более слабые землетрясения — афтершоки, которых на 30 октября насчитывалось уже более 300. А первый из них произошел спустя 7 минут после главного толчка. Разрушено почти 1000 домов, включая десятки многоэтажных, в городах Эркисе и в Ване (рис. 4.6).

И, как обычно, его никто не ждал именно в этом месте, в этот день и час. Предсказать подобную природную катастрофу пока не представляется возможным.

А 23 декабря 2012 года в районе Сочи произошло сильнейшее за последние 20 лет землетрясение с $M = 6$, эпицентр которого находился в море, примерно в 30 км от берега. В самом Сочи здания раскачивались, что вызвало панику среди жителей,



Рис. 4.6. Разрушение жилых зданий в Турции
во время землетрясения 2011 г.
(<http://fototelegraf.ru>)

но жертв и разрушений не было. Сейсмические толчки ощущались по всему побережью, начиная от Анапы.

Если взять только один месяц, например, октябрь 2010 года, то по земному шару произошло около 20 сильных землетрясений с магнитудами выше 5 – в Китае, Индонезии, Мексике, Новой Зеландии, на западе США, Греции, Израиле, Азербайджане, Италии, на Камчатке и Курильских островах, Грузии и на Кубани. Список можно продолжать, и он говорит о том, что земная кора находится в непрерывном движении, она «дышит».

В Восточной Африке полоса землетрясений связана с молодой рифтовой зоной, испытывающей растяжения, так же как и в Европе, в Рейнском грабене или в Байкальском рифте. В остальных регионах землетрясений нет совсем либо они очень редки.

Наведенная сейсмичность

Существует еще один тип сейсмичности — землетрясения, связанные с техногенным воздействием на геологическую среду. Такая сейсмичность называется наведенной или возбужденной. Ее причиной может быть, в частности, крупное водохранилище. Чем оно больше, тем выше вероятность возбужденного землетрясения, т.к. кроме массы воды, как избыточной нагрузки, важную роль играет снижение прочностных свойств горных пород из-за проникновения в них воды по трещинам.

Добыча нефти и газа и откачка воды из земных недр приводят к изменению пластового давления воды, что влияет на перераспределение напряжений, оживление подвижек по разломам, образование новых трещин.

В районе крупного месторождения газа Газли в Узбекистане в 1976 и 1984 гг. произошли сильные землетрясения с $M = 7,0$ и $7,3$, хотя раньше здесь отмечались лишь слабые сейсмические подвижки. Сильные землетрясения были обусловлены откачкой газа в объеме 300 млрд м³. Сейсмические события такого же происхождения имели место на севере Сахалина и в Туркменистане в 1983 г. — Кумдагское землетрясение с $M = 6$. Если закачивать внутрь пластов какие-либо жидкие промышленные отходы, то также могут возникнуть землетрясения, как это было, например, в США в Денвере в 1962 г., когда на глубине в 5 км резко возросло пластовое давление и произошло землетрясение с $M \sim 5$.

Под возбужденной сейсмичностью понимается некоторое действие на ограниченный участок земной коры, которое способно вывести этот участок из установившегося равновесия. Это может быть избыточное давление, либо, наоборот, его недостаток. Первое зарегистрированное возбужденное землетрясение с $M = 5,0$ произошло в США в 1939 г. в районе плотины Гувер и водохранилища Лейк-Мид, где раньше землетрясения никогда не отмечались. Причиной стало избыточное давление на горные породы, оказанное массой воды в водохранилище, образованное этой высокой плотинной. В 1975 г. сильное землетрясение произошло в Калифорнии около города Орвилл, где в асейсмичной зоне также была построена плотина высотой 235

метров. Плотиной Койна создано огромное водохранилище недалеко от Бомбея. Через 4 года после его заполнения произошло разрушительное землетрясение с $M = 6,3$. В середине 60-х годов XX века землетрясение с $M = 6,2$ имело место в Греции, вблизи плотины Кремаста. В Татарстане, в районе Камского водохранилища, после его заполнения зарегистрированы землетрясения силой в 4 балла по шкале MSK-64.

Такие же, вызванные нагрузкой водной массы на толщину горных пород, землетрясения происходили в Китае (плотина Синьфын), в Зимбабве (плотина Кариба), в Египте (Асуанская плотина), во Франции (плотина Монтэнар) и в других местах. Следует заметить, что и быстрое осушение водохранилищ также способствует возникновению землетрясений, так как поровое давление в породах не успевает отреагировать на новые условия.

Сейсмический отклик находят и подземные ядерные взрывы, производившиеся не так уж давно рядом стран. Очень интересные исследования были проведены Е.В. Архиповой из университета «Дубна», показавшей связь возрастания сейсмичности на Среднем Востоке с боевыми действиями в недавнем прошлом. По-видимому, взрывы мощных бомб и снарядов могут служить спусковым механизмом для разрядки накопившихся напряжений в земной коре.

Надо сказать, что проблема наведенной или возбужденной сейсмичности в наши дни весьма актуальна и ей уделяется много внимания, как в прикладной, так и в фундаментальной сейсмологии. Колоссальный рост городских агломераций, отбор нефти, газа и воды из крупных месторождений, строительство высоких плотин и огромных водохранилищ — все это приводит к возрастанию сейсмического риска.

Цунами — смертоносные волны

Что такое цунами и как оно возникает? В переводе с японского «цу нами» буквально означает «волна в заливе». В нашей стране о цунами заговорили после того, как в ночь с 4 на 5 ноября 1952 г. огромной 12-метровой волной был почти полностью разрушен город Северо-Курильск на о-ве Парамушир —

самом северном острове Курильской островной дуги, и смыты поселки по берегам 2-го Курильского пролива. Это было одно из самых разрушительных цунами XX века. Сначала произошло несколько сейсмических толчков, но люди, привыкшие здесь к землетрясениям, особого внимания на них не обратили. Однако после этих сотрясений море начало отступать и «ушло» почти на полкилометра от обычной береговой линии.

Вслед за этим через 40 минут из океана пришла волна высотой в 10–15 метров, которая обрушилась на город, расположенный в низине. Огромная стена воды толкала перед собой и сжатый воздух, также участвовавший в разрушении города, в котором погибло 2336 человек из 6 тыс. жителей. Через 10–15 минут обрушилась вторая волна такой же высоты. И после этого на остров выходило несколько волн, но меньшей высоты, всего в 2–3 метра.

Вспомним о цунами, возникшем в восточной части Индийского океана 26 декабря 2004 г. После сильнейшего землетрясения с магнитудой 9,3 на курортном острове Пхукет волна на побережье острова Суматра была высотой в 35 метров, погибли десятки тысяч человек, а всего жертвами этого цунами стали почти 400 тысяч. Образованная землетрясением волна пошла и в противоположную сторону, вызвав цунами на острове Шри-Ланка и даже в Сомали, в Африке.

22 мая 1960 г. произошло сильное землетрясение у побережья Чили ($M = 9,4$), как раз в зоне глубоководного желоба, обрамляющего всю Южную Америку со стороны Тихого океана. Было несколько толчков, магнитуда самого сильного равнялась 8,3. Волны цунами стали распространяться от эпицентра во все стороны и раньше всего оказались на Чилийском побережье, где высота волны была 25 метров, а дальше цунами достигло Гавайских и других островов Тихого океана. А потом, примерно через 8–9 часов, и Японии.

На Гавайях погиб 61 человек, в Японии — 205, волна там была высотой более 6,5 метров. В прибрежных поселках было разрушено много зданий, потоплены сотни небольших судов. И все это только от одного возникшего цунами!

Восточное побережье Японии особенно часто подвергается нашествию волн цунами. Так, в 1771 г. жертвами волны стали

8400 человек, в 1792 г. — 10 500, в 1986 г. — более чем 23 тысячи. Высота волн при этом может достигать 30 м.

Волны, вызванные землетрясениями, распространяются от его эпицентра на очень большие расстояния. После сильного землетрясения с $M = 8$ на острове Шикотан в Курильской островной дуге, волны цунами достигли побережья Южной Америки через 20–21 час. Чаще всего скорость волн цунами не превышает 200 км/час, хотя бывает и больше, но так как скорость распространения сейсмических волн километры в секунду, то зарегистрировав землетрясения можно подать сигнал о возможности цунами и предупредить людей.

В Тихоокеанском сейсмическом поясе в год происходит около 200 сильных землетрясений с магнитудой больше 6, но только часть из них сопровождается цунами.

Как возникают цунами

Цунами обычно возникают в том случае, когда в результате землетрясения на дне океана происходит резкое смещение слагающих его пород. Допустим, что один из блоков по разлому оказался вздернутым вверх. Но ведь вода несжимаемая жидкость, и на поверхности океана над разломом возникает купол, высотой 5–8 метров, который потом, распадаясь, образует волны, идущие во все стороны. Длина волны при этом очень велика и корабль, плывущий в океане, может вообще ее не заметить. Но когда такая волна подходит к мелководью, она начинает подниматься, скорость волн у дна из-за трения становится меньше, а в верхней части волны она выше и волна как бы «вырастает». А потом ее гребень забурунивается, обрушивается на фронт волны. Перед приходом волны к берегу море отступает, что отмечается во всех случаях. Далее вал воды устремляется на низкий берег и проносится по нему на несколько километров, сметая все на своем пути. Это хорошо было видно по телевизионным съемкам. Затем нахлынувшая волна начинает отступать, унося с собой все, что она разрушила. Так было и в Пхукете, и в Фукусиме. После ухода волны на берегу ничего не остается, кроме обломков домов.

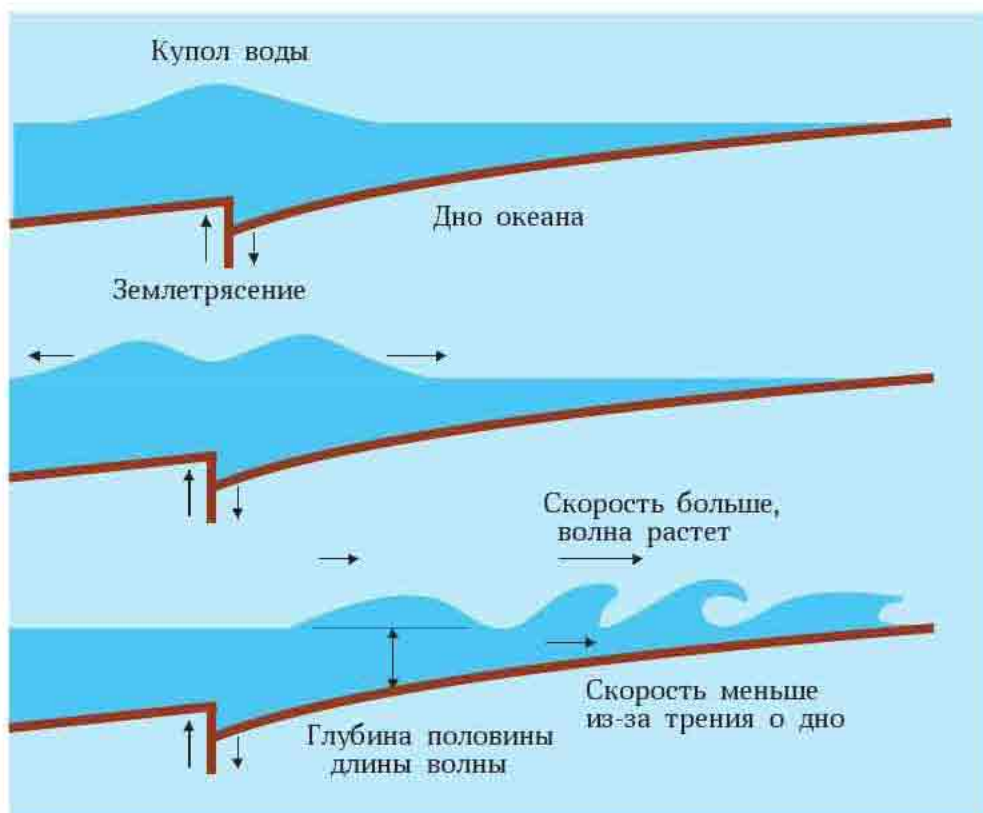


Рис. 4.7. Образование цунами (Н. В. Короновский)

При возникновении цунами обычно выделяется несколько стадий (рис. 4.7): 1 — образование волны (купола воды); 2 — ее распространение в открытом океане; 3 — набегание волны на берег. Все эти стадии современная наука описывает моделями, но создать общую модель для конкретного цунами, как считают Б.В. Левин и М.А. Носов, знатоки этой проблемы, пока не удается.

Как для землетрясений, так и для цунами существуют шкалы интенсивности. Первая из них была составлена в 1927 г. А. Зиббергом, а сейчас используется шкала Пападопулуса–Имамуры 2001 г., которая включает 112 градаций, от очень слабых до полностью опустошительных.

У всех на слуху Фукусима. Это слово, обозначающее место, где расположена японская атомная станция, которая приняла на себя удар небывалого по силе землетрясения Тохоку, произошедшего 11 марта 2011 года.



Рис. 4.8. Цунами во время землетрясения Тохоку в Японии в апреле 2011 г.

После землетрясения все многочисленные станции GPS, размещенные в Японии, зарегистрировали в районе главного толчка сильнейшие горизонтальные перемещения: на суше — до 4 м, в океане на материковом склоне — до 15 м. Наблюдались и вертикальные перемещения — снижения с амплитудой до 0,7 м, а в районе эпицентра — до 7 м. Все эти перемещения охватили огромный блок литосферы длиной в 600 и шириной более 100 км.

Через 2 часа возникло цунами высотой в 14 метров, связанное с резким поднятием дна над очагом землетрясения (рис. 4.8).

На Тихоокеанском побережье России за последние 300 лет цунами наблюдались 70 раз, а самое сильное, как уже говорилось, было в 1952 г.

Цунами возникают не только в результате смещений океанского дна при землетрясениях.

На Аляске 9 июля 1958 г., в небольшую (11 на 3 километра) бухту Литуя со склонов горы Фейруэзер, высотой до 1800 м, сошел огромный оползень, по существу, каменно-ледовый обвал,

объемом в 80 млн м³, вызвавший немыслимую по высоте волну в 524 м (!), почти такую же, как высота Останкинской телебашни. Высота была установлена по следам на склонах гор, где находились стволы деревьев. Побережье бухты, к счастью, было необитаемым, но два рыболовецких суденышка из трех, бывших в бухте, чудом спаслись.

Цунами могут образоваться и при вулканических извержениях, вызывающих кальдеры обрушения или взрыва. Возможно, описанная выше гибель Минойской цивилизации на Крите связана с цунами, возникшим при извержении вулкана на о. Стронгили, и образования огромной кальдеры обрушения. Цунами при гигантском взрыве вулкана Кракатау в Зондском проливе 26 августа 1883 г. привело к гибели почти 40 тыс. человек, а волна достигла Африки и даже обогнула ее, вызвав подъем воды на побережье Англии на 15 см.

Существует специальная служба оповещения о возможном приближающемся цунами. Но ее эффективность не очень высока, т.к. не каждое землетрясение в океане вызывает цунами.

Сейсмические колебания океанического дна вызывают такое интересное явление, как моретрясение, во время которого море как бы мгновенно «вскипает» и образуются т.н. стоячие волны высотой до 5–6 м и водяные бугры, остающиеся на одном месте. Нередко все это сопровождается сильным гулом. Такое неожиданное явление зафиксировано экипажами кораблей, которые в него попали. При этом корабли подвергаются сильной тряске, вибрации, ударами воды по корпусу, что может вызвать его разрушение.

Моретрясение связано с особым типом колебания океанического дна. Если колебания происходят со скоростью 1 м/с, то на фронте волны давление достигает 15 атмосфер, что воспринимается корпусом корабля как удар.

Можно ли предсказать землетрясение

Несмотря на все усилия исследователей разных специальностей, пока предсказать год, месяц, день, час, место и магнитуду очередного землетрясения не удастся. Сейсмический удар происходит внезапно и, как правило, застигает всех врасплох.

В нашей стране уже давно составлены карты сейсмического районирования, на которых выделены районы, оконтуренные изолиниями с указанием максимально возможной балльности землетрясений. Они уточняются по мере поступления новых данных. Особняком стоит проблема прогнозирования землетрясений по предвестникам.

В настоящее время 20% площади России подвержено землетрясениям силой до 7 баллов, что требует специальных антисейсмических мер в строительстве. А более 15% территории находится в зоне разрушительных землетрясений силой 8–10 баллов по шкале MSK-64. Это Камчатка, Курильские острова, Сахалин, по существу, весь Дальний Восток, а также Байкальский регион, Алтай и Северный Кавказ.

Обычно сначала производится общее сейсмическое районирование. Потом детальное. А затем микрорайонирование уже для отдельных населенных пунктов, крупных промышленных предприятий. Все эти карты используются в экономических целях, для строительства, землепользования. Первая карта общего сейсмического районирования была составлена для всего СССР еще в 1937 г. под руководством профессора Г.П. Горшкова, долгое время возглавлявшего кафедру динамической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Потом она неоднократно уточнялась и совсем недавно вышло ее новое издание.

Эти карты играют большую роль при строительстве в сейсмоопасных районах, поскольку оно осуществляется по специальным требованиям, направленным на повышение прочности зданий, создание специальных фундаментов, способов укрепления стен, обвязки домов специальными металлическими обручами, которые опоясывают дом и предотвращают развал стен при сейсмических толчках, амортизаторов и т.д.

Колебания сооружений во время землетрясения зависят от многих факторов. По мнению профессора Е.А. Вознесенского особую опасность представляют маятниковые колебания таких сооружений как трубы, высокие опоры мостов, высотные здания и др., центр тяжести которых расположен далеко от их фундамента. Тогда возникшие колебания приводят к их разрушению. Нередко происходит разжижение грунта, т.к. при

сейсмоколебаниях и вибрации его механические свойства резко меняются, снижается прочность, он превращается в зыбучий полужидкий песок.

Разжижение грунтов в результате землетрясения особенно ярко проявилось при сильнейшей, не имеющей аналогов в истории, катастрофе в Китае 23 января 1556 г., в провинции Шанси, когда погибло 850 тысяч человек. Эпицентр землетрясения располагался в долине р. Хуанхэ, которая сложена рыхлыми лёссовыми породами. Так вот этот лёсс¹ при сотрясении мгновенно становился как бы «жидкостью», в которую проваливались сотни домов. Огромное количество жертв, возможно, связано и с тем, что землетрясение произошло в 5 утра, когда многие еще спали.

27 марта 1964 года на Аляске в районе города Анкоридж произошло сильнейшее землетрясение. Почва там песчаная, а рельеф гористый, и после толчка песчаный склон поплыл вниз, увлекая за собой десятки домов. Попадали деревья, образовались уступы в 10–15 метров. Разжижение песчаного грунта было в этом районе повсеместным.

В этом же году в июне в Японии около города Ниигата землетрясение с магнитудой 7,5 и разжижение песчаного грунта также вызвало повсеместные разрушения, а четырехэтажные дома, не разрушаясь, наклонялись и просто «ложились» на бок.

Землетрясения в горных областях вызывают обвалы и большие оползни. Так при Хаитском землетрясении с $M = 8$ в Таджикистане в 1949 г. оползни-обвалы с горных склонов стали причиной гибели 25 тыс. человек.

Проблема прогнозирования землетрясений, возникнув как чисто прикладная, в последние десятилетия стала частью фундаментальной проблемы: что вообще можно прогнозировать и реконструировать в науках о Земле. Здесь есть две точки зрения. Одни исследователи уверены, что успехи в современной технологии дают им неограниченный потенциал, который, в конечном результате, и приводит к успеху. Другие с недоверием относятся к возможностям будущего успеха, т.к. видят неудачи прошлого опыта.

¹ Лёсс — осадочная однородная горная порода. По составу относится обычно к суглинкам.

Известно много случаев, когда природная катастрофа, в частности землетрясение, каким-то образом предугадывается, предчувствуется живыми существами. Но все дело в том, что эти случаи не повторяются регулярно и могут даже совсем не проявляться при сильных землетрясениях. Поэтому прогнозирование сейсмических процессов на основе аномального поведения животных невозможно, хотя этому посвящено много работ. Животные по неясным причинам каким-то образом чувствуют приближающуюся катастрофу, причем разные животные за разное время. Интересно поведение собак в различных регионах перед землетрясениями, описанное очевидцами. Хорошо известен случай в Ашхабаде, ныне столице Туркменистана. В ночь на 5 октября 1948 г. в городе было очень тихо, все как бы замерло. И вдруг в одном доме собака начала стаскивать с хозяина одеяло и выскочила на улицу; в другом доме собака схватила за рубашку маленькую девочку, спавшую в коляске, и также рванула во двор. И сразу же раздался сильнейший толчок и город, в котором было около 100 тыс. жителей, перестал существовать, большая часть населения погибла. Что почувствовали собаки за десяток секунд до толчка? Неизвестно. В других случаях животные до землетрясения начинают явно нервничать, особенно лошади, ослы, свиньи, козы, да и другие. Все дело в том, что неясно, через какое время после того, как животные стали вести себя необычно, произойдет землетрясение. Через несколько секунд или дней?

Землетрясения последнего десятилетия унесли многие сотни тысяч человеческих жизней. Огромные волны цунами смывали все на огромных территориях. Но, как ни странно, животные, успевали уйти. Погибших животных было очень мало. Так, во время землетрясения в Индийском океане в 2004 году возникли большие волны цунами, накрывшие не только побережье Суматры в Индонезии, но и остров Шри-Ланка, где находится огромный национальный парк, волны даже добрались до Африканского побережья.

Так вот, интересно, что в парке после цунами все было переломано, снесено, деревья вырваны с корнем. Но все животные убежали, каким-то образом они почувствовали приближение опасности. Есть свидетели, утверждающие, что видели, как ухо-

дили слоны, стада антилоп, другие звери, улетали птицы, примерно за час до цунами змеи и вараны залезали на деревья.

Животные каким-то образом чувствовали приближающуюся опасность. Точно так же вели себя буйволы и слоны в Индонезии и в Таиланде, да и в Индии. Все стремились убежать подальше от моря. По-видимому, животные воспринимают какие-то сигналы — вибрацию, акустические очень слабые сигналы, может быть изменения магнитного и электрического полей. Известно, что дельфины перед землетрясением выпрыгивают из воды, глубоководные рыбы поднимаются к поверхности. Пресноводные рыбы, такие как сомы, начинают беспорядочно носиться по водоему, подпрыгивать, всячески показывая беспокойство. Недаром в Японии издревле считали, что землетрясения вызываются шевелением гигантского сома — Намадзу.

Таким образом, предвестники катастроф — землетрясений и цунами имеются. Это необычное поведение животных, птиц, рыб. Узнать бы, как они заранее чувствуют приближающуюся беду!

Нередко в качестве предвестника землетрясений используют изменение уровня грунтовых вод. Считается, что если в скважинах уровень воды повышается, то это свидетельствует о начавшемся сжатии земных недр, что может привести к землетрясению. Действительно, были случаи, когда такое предположение подтверждалось, но в других случаях уровень воды повышался, а землетрясения не было.

Нельзя не сказать, что в большинстве случаев заявления о том, что кто-то где-то предсказал землетрясение, появляются после того, как оно произошло. Перед землетрясением в Тохoku в Японии спутники США зафиксировали инфракрасное излучение, т.е. необычно высокий и быстрый нагрев ионосферы прямо над тем местом, где был эпицентр землетрясения. Это было за 3 дня до катастрофического толчка. Но как можно было интерпретировать это явление? Никто не знал. И только когда произошло землетрясение с $M = 9,0$, поняли, что, по существу, это был предвестник катастрофы. Вот так обычно и получается с прогнозированием.

К началу 80-х годов XX века уже стало ясно, что как бы ни сгущать сеть наблюдений, сколько бы сейсмографов и других приборов ни ставить, чтобы попытаться выявить аномалии — предвестники сейсмических событий, успеха достигнуть не удастся, т.к. не получается четко установить локализацию каких-то предвестников землетрясений во времени и пространстве.

Но иногда аномалии, выражающиеся как предвестники землетрясений, работают. Так, например, случилось в случае предсказания в 1975 г. Хайченского землетрясения с $M = 7,4$, когда людей даже успели вывести из домов на улицы.

Город Хайчен, расположенный на северо-востоке Китая, был под наблюдением сейсмологов, которые ожидали землетрясение, на что указывал ряд признаков, например, усиление наклонов поверхности, изменение электропроводности грунтов и уровня воды в колодцах. Все эти наблюдения позволили предположить, что землетрясение приближается.

Утром 3 февраля произошел первый толчок с магнитудой 4,7. Это был форшок. А через 5 часов последовал главный удар с магнитудой уже 7,3. В городе Хайчен, населения которого было 100 000, погибло очень мало людей, несмотря на огромные разрушения. Люди были на улицах и это их спасло.

Но в этом же районе в 1976 г. случилось новое катастрофическое землетрясение с $M = 7,8$; погибли сотни тысяч и никакие предсказания не сработали. То же самое произошло и в США, где в Калифорнии, в Паркфилде, с вероятностью 90% на период в 30 лет прогнозировалось землетрясение с $M = 6$. Но произошло оно почти на 200 км северо-западнее с $M = 7,1$, где его вероятность оценивалась всего в 20–30%. Место, время и интенсивность разрушительных землетрясений даже в хорошо изученных районах до сих пор всякий раз оказывались и оказываются неожиданными.

Все это порождает сомнения в сейсмопрогнозировании, и стали появляться высказывания, что землетрясения непредсказуемы, хотя некоторые сейсмологи ставили вопрос о том, что сигналы-предвестники в ряде случаев все-таки достоверно наблюдались.

Когда мы говорим о прогнозе землетрясений, то большинство сейсмологов считает, что прогноз — это определение: 1) места, 2) времени и 3) интенсивности (энергии) события. Однако весь вопрос заключается в надежности такого прогноза. Если и возможен вполне достоверный прогноз, то его точность будет исчезающе мала. Отсюда ясно, что абсолютно прогнозируемых явлений не существует, и все оценки здесь относительны. Всегда должно быть ясно, о чем идет речь: что конкретно, с какой точностью и надежностью прогнозируется. Именно необходимость достижения заранее задаваемых определенных уровней этих двух характеристик, а вовсе не любое указание места, силы и времени будущего события — главная трудность в проблеме прогнозируемости. Пока не существует ни теоретических, ни эмпирических оснований, чтобы надеяться на реальную возможность прогноза сильных землетрясений с необходимой точностью и надежностью.

Сложности в прогнозировании связаны с нелинейным характером сейсмического процесса, с его хаотичностью. Как хорошо сказал наш известный математик академик В. Арнольд: «малые шевеления» в нелинейных уравнениях приводят к бифуркации (т.е. к катастрофе). Что значит «малые шевеления» применительно к возникновению землетрясений? А это означает, что хаотичность сейсмического процесса может привести к развитию любой, даже самой маленькой трещины, в крупный сейсмогенный разрыв, происходящий от многих случайных воздействий. Иными словами, мы не знаем, где и как горные породы разорвутся, на этот процесс влияет так много факторов, что учесть их все невозможно.

Нелинейные геологические системы чрезвычайно чувствительны к «малым шевелениям», то есть изменениям начальных и текущих условий, что порождает крайнюю неустойчивость прогноза еще и в зависимости от площади и длительности наблюдений и, как следствие, к неприемлемо большому проценту ложных предсказаний. Унаследованное от классической науки убеждение в том, что совершенствование инструментов и методов познания в конце концов приведет к точным и надежным прогнозам, оказалось иллюзорным. Точный прогноз оказывается крайне ненадежным, надежный прогноз — неточным.

Но это, разумеется, вовсе не означает ни «краха науки», ни утраты ею предсказательного потенциала. Современная наука не только приняла вызов науки классической. Она вполне адекватно, но в высшей степени нетривиально ответила на него, открыв и продемонстрировав парадоксальную способность: обоснованно предсказывать... непредсказуемость траекторий обширного класса систем, о возможности и даже неизбежности хаотического поведения которых мы ранее даже не подозревали.

После работ И. Пригожина и И. Стенгерс «Порядок из хаоса» стала понятна роль самоорганизации геологической среды, ее фрактальность, дискретность и т.д., и поэтому одна обособленная аномалия–предвестник не может дать ответ о неизбежности сейсмического толчка, т.к. на возникновение землетрясения влияют множество, казалось бы, ничтожных причин. Например, приливы, изменение атмосферного давления, наземные взрывы и другие.

Приливы в твердом теле Земли, вызванные Луной и Солнцем, могут быть спусковым механизмом для возникновения землетрясения, когда оно уже «созрело», но не хватает какого-то физического процесса, который может вызвать разрушение в уже готовой к этому среде.

Все, сказанное выше, безусловно не означает прекращения работ в области попыток прогнозирования катастрофических землетрясений. Исследования по их долгосрочному прогнозу проводятся в Азербайджане профессором Э.Н.Халиловым на созданном им специальном приборе ATROPATENA, фиксирующем за 2–7 дней необычные вариации гравитационного поля перед сильными удаленными землетрясениями. Эти вариации, по мнению автора, могут регистрировать тектонические волны, возникающие в области подготовки, т.е. в области генерирования очагов землетрясений. Но пока это только мнение автора.

Известен ряд успешных прогнозов для восточного полушария Земли. Так было предсказано землетрясение с $M=6,7$ в южной части о-ва Хонсю в Японии 12 августа 2009 г. Также сбился прогноз для Восточной Турции 8 марта 2010 г. землетрясения с $M=6,1$, но тогда погибло 60 человек. Это интересное направление и его надо продолжать.

Но совсем недавно, 25 августа 2011 года, совершенно неожиданно произошло землетрясение с $M = 6$ на востоке США, в штате Вирджиния. Эпицентр находился всего в 130 километрах от Вашингтона, в котором толчки ощущались довольно сильно, и даже были повреждены некоторые здания. Это землетрясение никто не предсказывал и даже не предполагал, что оно может быть в этом районе. Вот вам и прогноз.

Говоря о природных катастрофах в целом по миру за последние 100 лет, с учетом разных данных, нельзя не заметить, что их общее число увеличивается. Идет ли речь о землетрясениях, вулканической активности, наводнениях, засухах, торнадо. Почему наблюдается увеличение частоты природных катастроф? Это непростая задача, решить которую должны современные науки о земле — геология и география, а также астрономия. Луна и Солнце, метеориты, астероиды, кометы, да и другие планеты влияют на Землю. На широте Москвы мы все и всё вместе дважды в день поднимается и опускается примерно на 37 см под влиянием приливной силы со стороны Луны. Эта же сила может служить «спусковым крючком» для уже подготовленного землетрясения, главным образом, мелкофокусного.

ЕЩЕ НЕМНОГО О КАТАСТРОФАХ

Обсуждая природные катастрофы – падение метеоритов, извержения вулканов, землетрясения – мы имели дело с быстрыми катастрофами, которые, особенно падение метеоритов и землетрясения, происходят почти мгновенно, а нам остается лишь обозревать ужасающие последствия. Но есть природные геологические процессы, которые происходят медленно, однако, в конце концов, также приводят к катастрофам местного, а иногда и регионального характера.

Восточно-Европейская платформа и ее часть – Русская плита, на которой располагается Европейская часть России, обладает слабо расчлененным равнинным рельефом с перепадами высот в 50–200 метров. Под плитой в геологии подразумевается двухъярусная структура, нижний ярус которой сложен древними докембрийскими кристаллическими породами, смятыми в сложные складки, прорванные различными гранитными телами. Это фундамент, или основание. А верхний ярус плиты, т.н. чехол, образован осадочными толщами известняков, глин, песчаников и других подобных пород.

Отложения чехла на протяжении своего существования, а это около 500 млн лет, испытывали очень медленные подвижки, т.к. фундамент все это время как бы «дышал». По древним разломам фундамента один блок приподнимался, а другой опускался. И эти движения отражались в отложениях чехла – горизонтально залегающих слоях. Для выявления таких подвижек составляются специальные карты амплитуд движений. В некоторых местах структуры растут со скоростью 1–2 см/год, в других амплитуда больше. Встречаются места, где над древним

разломом один блок поднимается, а другой опускается. И пусть размах движений будет всего 2–3 сантиметра в год, но если этот процесс продолжается десятки и сотни лет и больше? А теперь представим себе, что через такой участок идут трубы нефте- и газопроводов, и через 15–20 лет изгиб труб уже составит почти полметра. В этом месте начинается усиленная коррозия или труба разрывается, что и происходило.

Но это древние, равнинные, относительно спокойные в тектоническом отношении области. Если же речь идет о горных областях, то там контраст движений намного больше. Для выявления медленных вертикальных движений используют высокоточное повторное нивелирование вдоль определенных профилей. Такие измерения, например, проводились через Большой Кавказ. Профили измеряли с интервалом 10–15 лет, что позволило получить весьма любопытные данные о скорости и направленности современных тектонических движений. Так, выяснилось, что главный хребет Большого Кавказа с 1931 по 1959 г. поднимался со скоростью 1,2 см/год, а с 1959 по 1975 г. Большой Кавказ как бы «провалился» и не только не поднимался, но даже опускался со скоростью 2 мм/год. С 1975 по 1990 г. поднятие вновь усилилось до 6 мм/год. Все это демонстрирует прерывисто-непрерывный рост гор. Однако ясно, что Кавказского хребта не было бы, если бы скорость его роста не опережала скорость эрозионных процессов, т.е. разрушения.

Тектонические движения бывают не только вертикальными, но и горизонтальными, которые в наше время точно измеряются разными методами, в том числе GPS, т.е. «системой глобального позиционирования». С помощью этого метода и еще нескольких, родственных GPS, сейчас установлены современные горизонтальные перемещения земной коры во многих геологических регионах земного шара.

Данные GPS помогли точно определить характер современных тектонических горизонтальных движений блоков земной коры в центральной части Альпийско-Гималайского молодого складчатого пояса. Так, Аравийская плита движется к северу со скоростью 2 см/год, вызывая изгиб горно-складчатых слоев в Кавказском перешейке. Одновременно Анатолия отжимается к западу, ограничиваясь с севера протяженным Северо-

Анатолийским разломом — сдвигом, вдоль которого местами происходят сильные землетрясения. Скорость перемещения Анатолии возрастает к западу и достигает максимума в Эгейском море, где векторы движений отклоняются к юго-западу. С юга перемещения ограничены Кикладской островной вулканической дугой и Геленским глубоководным желобом. Такая картина современных тектонических движений хорошо объясняет высокую сейсмичность региона.

Медленные тектонические движения приводят к быстрым катастрофам, когда накопившиеся напряжения в горных породах, превышают предел их прочности. Для этого достаточно совсем незначительный «повод», которым может быть даже высокое атмосферное давление, что было доказано в Южной Америке в пустыне Атакама, или приливы.

Все мы знаем, что такое оползень. Какой-нибудь блок горной породы, часть склона горы и т.п., но обязательно на относительно крутом склоне, начинает вдруг двигаться вниз. Иногда это происходит медленно, но временами и очень быстро. Чтобы произошел оползень необходимо наличие какого-нибудь пластичного слоя пород, например, глины, которая и будет служить «смазкой» для сползающего блока. И еще важную роль играют водоносные горизонты, которые обычно располагаются выше глинистых пластов, служащих упором для воды. Все это создает благоприятные условия для возникновения оползней, особенно весной, когда много воды из-за тающего снега, или во время сильных ливней в водообильные годы. Оползни широко развиты в долинах Москвы-реки, Волги, на побережьях Черного моря в Крыму и на Кавказе, на берегах крупных водохранилищ, в горных районах. В горах Таджикистана весной крупные оползни мгновенно погребают под собой целые кишлаки.

Ночью 6 февраля 1911 г. в результате 7-бального землетрясения на Памире произошел гигантский оползень, похоронивший кишлак Усой. Перегородив реку Мургаб, масса пород объемом более 2 км^3 образовала озеро длиной почти в 56 км, глубиной до 500 м и объемом воды в 17 км^3 . По затопленному кишлаку Сарез озеро получило название Сарезского (рис. 5.1). Если эта гигантская плотина разрушится, а она совсем не стабильна, то ка-



Рис. 5.1. Обвал на Памире, перегородив реку Мургаб, образовал Сарезское озеро

тастрофическое наводнение будет по всем рекам ниже устья Мургаба. Это уже будет бедствие на территории Таджикистана, Узбекистана, Киргизии и Казахстана. Вот почему в 2000 г. создан и работает международный проект по снижению риска от прорыва плотины.

Еще один тип катастроф, которые нельзя отнести к «медленным», но приводят они часто к огромным разрушениям — это сели или мурсы, представляющие собой гигантские потоки воды с валунами, камнями, грязью и нередко глыбами льда. Подобных катастроф по всему миру известно множество, часто они связаны с обвалами горных пород или ледников, которые, в свою очередь могут быть обусловлены землетрясениями. Прорывные паводки на западе США в начале XX века достигали огромных объемов, до 900 млн м³. Сели неоднократно разрушали город Верный (сейчас Алматы), пока не была воздвигнута большая плотина в долине р. Большая Алматинка. В 1963 г. селевым потоком было уничтожено озеро Иссык в Иссыкском ущелье Заилийского Алатау. Вулканогенные сели или лахары отмечены на Камчатке, в Индонезии и в других местах. Это перечисление можно продолжать долго.

Что же можно сделать, чтобы предсказать сели или, по крайней мере, снизить ущерб от них? Во всех опасных районах обычно создается специальная служба, наблюдающая за участками возможного рождения селей и, в частности, угрожающего скопления воды в ледниковых озерах или в моренных отложениях в горных областях. Нужно хотя бы предупредить население в городах и поселках, находящихся в местах, которые сели могут затронуть.

Такие работы проводятся в верховьях долины реки Гирхожан на Северном Кавказе. Селевые потоки, стремительно спускающиеся по этой долине, неоднократно разрушали город Тырныауз на реке Баксан, в котором находится крупный молибдено-вольфрамовый рудник (рис. 5.2). Чтобы уменьшить гигантскую разрушительную силу грязекаменных потоков-селей поперек долин ставят разнообразные преграды, и когда их много, то мощь селей, конечно, снижается, т.к. преграды задерживают хотя бы каменную часть потока. (спровоцированная ледником)

20 сентября 2002 г. в Северной Осетии в долине реки Геналдон произошел обвал висячего ледника Колка, находившегося



Рис. 5.2. Селевой поток в г. Тырныауз
(фото М. Ю. Никитина)



Рис. 5.3. Обвал ледника Колка в Северной Осетии
(фото М. Ю. Никитина)

на крутых склонах горы Джимарай-хох высотой около 4-х км (рис. 5.3). Каменный и ледовый обвал гигантской массой со скоростью 200 км/час (56 м/с) ринулся вниз по долине реки. Ледово-каменная масса мчалась на «воздушной» подушке из захватываемого головной частью потока воздуха. И вся эта масса остановилась перед входом в узкое Кармадонское ущелье, пропустив ниже только грязе-водную смесь. Всё длилось не более 4 минут, но при этом погибло около 125 человек, включая съемочную группу известного артиста и режиссера Бодрова-младшего, возвращающуюся со съемок фильма в верховьях долины. Эта гляциальная (спровоцированная ледником) катастрофа относится к крупнейшей в XXI веке.

Что спровоцировало каменно-ледовый обвал? Может быть, слабое землетрясение или что-то другое. Мнения ученых разделились. Сейчас в этих и в других горных местах Северного Кавказа организован мониторинг, призванный предупредить о нарастающей опасности. Удастся ли. Покажет время.

Когда мы ведем речь о катастрофах на поверхности Земли, связанных с геологическими процессами, происходящими внутри нашей вполне еще «живой» планеты, мы не забываем и о внешней угрозе, о чем уже говорилось, т.е. о столкновении с астероидами, падении метеоритов. Землю сейчас не рассматривают как изолированную от других внешних воздействий, в частности, Луны и Солнца. Влияние притяжения Луны и Солнца мы ощущаем особенно хорошо в океанах, где дважды в сутки происходят приливы и отливы, которые местами достигают высоты в 17 метров. В твердой Земле тоже ощущается приливная волна, которая движется с востока на запад, против вращения Земли. Когда Луна, Солнце и Земля оказываются на одной прямой линии (сизигия) — приливы больше, когда под прямым углом (квадратура) — то меньше. Уже говорилось о том, что именно эти приливы в твердом теле Земли могут служить теми «малыми шевелениями», которые приводят к разрядке накопившихся в земной коре и верхней мантии напряжений. Все готово к землетрясению, не хватает самой малости — «спускового крючка». И вот он появляется в виде приливной волны, тогда и происходит землетрясение.

Есть опасность, которая всячески муссируется в средствах массовой информации — это якобы ожидаемая смена полярности нашего магнитного поля. Уже говорилось о периодически повторяющихся инверсиях, т.е. смены в магнитном поле северного полюса на южный. Последняя инверсия был около 700 тыс. лет назад. Стали говорить о приближающейся новой инверсии и предсказывать исчезновение магнитного поля, которое защищает нас от многих вредных космических излучений. Однако пока это досужие вымыслы. Никто не знает, во-первых, как происходит инверсия магнитного поля, а во-вторых, когда она наступит.

Другие дискуссии касаются Солнца. Дело в том, что на Солнце периодически происходят взрывы, выбрасывающие в межпланетное пространство т.н. солнечный ветер — ионизованные частицы, которые с огромной скоростью, более 1000 км/с, обрушиваются на магнитное поле Земли, и тогда могут случиться техногенные катастрофы, как было в 1859 г., т.н. «Событие Кэррингтона»; в 1921 г. солнечный «шторм» вывел из строя

транспортную систему Нью-Йорка, а в 1989 г. оставил без света и тепла провинцию Квебек в Канаде.

Сейчас Солнце находится в состоянии затянувшегося покоя, который обычно продолжается около 11 лет, затем наступает период активности. Так вот, в наши дни установлено, что мы приближаемся к началу нового цикла активности Солнца, которое «проснется от предыдущей спячки», и вызванные его активностью магнитные бури могут привести к катастрофам на Земле.

Есть работы, например, В.Е. Хаина и Э.Н. Халилова, в которых периоды солнечной активности пытаются связать с интенсивностью вулканической деятельности и количеством землетрясений. Какое-то сходство с циклами активности вулканов и землетрясениями намечается, правда, не всегда и не везде. Но если оно существует, то как его можно объяснить? Авторы высказывают предположение, что в период повышения солнечной активности, усиливающийся поток ионизованных частиц (солнечный ветер) может вызвать кольцевые токи в литосфере и верхней мантии, что усилит ее нагрев и ускорение движения конвективных потоков.

Иными словами, во время усиления солнечной активности, может быть, ускоряется процесс субдукции (погружения одних блоков земной коры под другие), что вызывает землетрясения в активных континентальных окраинах. Процесс спрединга (раздвигания блоков литосферы океанической коры) активизируется во время спада солнечной активности. Но все эти события запаздывают на половину 11-летнего солнечного цикла. Такое объяснение, конечно, не бесспорно, но имеет право на существование, хотя и вызывает много вопросов.

Больше половины территории России занимает криолитозона, т.н. зона «вечной мерзлоты». А вообще криолитозона широким кольцом охватывает около 25% всей суши вокруг Северного Ледовитого океана. Кроме того, она есть во всех высокогорных регионах. В пределах распространения криолитозоны, мощность которой достигает 1000–1500 метров в северных районах, многолетнемерзлые породы всегда залегают на некоторой глубине, выше которой находится т.н. деятельный слой, оттаивающий летом, а зимой вновь замерзающий.



Рис. 5.4. Зона «вечной мерзлоты».
Деформация железной дороги в Сибири
(фото С. Ю. Пармузина)

Многолетнемерзлые породы очень чутко реагируют на любые природные или техногенные вмешательства. Достаточно построить дом, провести железную дорогу, соорудить промышленные предприятия без соблюдения определенных правил, как сразу же начинается «медленная катастрофа».

Оттаявший грунт вызывает наклон зданий, стены покрываются трещинами, и оно просто может разрушиться. Железная дорога начинает изгибаться, местами образуются бугры. Столбы, врытые только в деятельный слой, выпучиваются из него и падают (рис. 5.4).

Все это — настоящие катастрофы, но подготавливаемые медленно, год за годом. Поэтому существуют строгие правила, регламентирующие строительство в областях развития криолитозоны. Все фундаменты под здания должны быть на сваях, заглубленных обязательно в многолетнемерзлый слой, а не в деятельный оттаивающий, иначе строение ждет разрушение. Такие катастрофы предсказать можно, геокриология сейчас разработана достаточно хорошо.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Много еще неизвестного таит в себе Земля, и ученые постепенно, шаг за шагом пытаются проникнуть в ее недра, используя все доступные им методы науки и технологии. Мы еще много не знаем и уровень нашего незнания очень велик. Но если сравнить сегодняшний уровень с тем, который был всего лишь сто лет назад, то виден колоссальный прогресс, темп получения новых знаний увеличивается, хотя и идет скачками.

В этом абзаце не стоит писать «выводы» или делать «заключение». Единственное, на что я хотел бы обратить внимание читателей — на большое число еще нерешенных проблем и вопросов. И чем больше мы углубляемся в познание мира, тем больше перед нами встает нерешенных задач. Нынешнее поколение уже интуитивно чувствует, что все в природе связано, все влияет друг на друга. Надо попытаться раскрыть эту взаимную связь, и тогда, может быть, мы будем предсказывать землетрясения и цунами, извержения вулканов, катастрофические оползни и обвалы, научимся разрушать приближающиеся к нам опасные астероиды или изменять их траекторию. Только наука способна разгадать все загадки, которые нам задала Вселенная, наша Галактика, Солнечная система и Земля — пока единственная известная планета, на которой есть жизнь.

Словарь

Астеносфера — слой пород верхней мантии, обладающий пониженной вязкостью.

Астероид — малое космическое тело, размером от сотен метров до 1000 км.

Астроблема (звездная рана, греч.) — крупный ударный метеоритный кратер.

Афтершок — повторный сейсмический толчок меньшей интенсивности, происходящий после главного толчка.

Базальт — горная порода темного цвета, образовавшаяся в результате излияния магмы.

Брекчия — горная порода, состоящая из сцементированных остроугольных обломков горных пород одного или разного составов.

Вулканический пепел — мельчайшие обломки вулканического стекла — распыленной взрывом магмы.

Вулканический туф — мелкие обломки различных пород, выбрасываемых из вулкана.

Геосферы — концентрические оболочки Земли — гидросфера, литосфера, земная кора, мантия, внешнее ядро (жидкое) и внутреннее ядро (твердое).

Гнейс — метаморфическая горная порода, наиболее распространенная в земной коре.

Гипоцентр — центральная точка очага землетрясения, обычно на некоторой, но иногда и на большой глубине.

Граница Мохоровичича — граница между земной корой и верхней мантией, на которой происходит резкое увеличение скоростей сейсмических волн.

Изосейсты — линии равных сотрясений на поверхности Земли.

Импактиты (*impact* — удар) — горные породы, образовавшиеся в результате ударно-взрывного воздействия, как правило, падения метеорита.

Кальдера — большая циркообразная впадина, образующаяся при взрыве или обрушении вулкана.

Лава — раскаленный расплав горных пород, изливающийся при извержениях вулкана.

Лахар — холодный или горячий грязекаменный поток, образующийся во время извержения вулкана.

Лёсс — однородная известковистая осадочная горная порода светло-желтого или палевого цвета.

Литосферная плита — крупный стабильный участок земной коры и части верхней мантии до астеносферы.

Магма — расплав горных пород, возникающий в земной коре или в мантии, на больших глубинах. В зависимости от состава магма может быть базальтовая, гранитная, дацитовая.

Магнитуда — мера энергии, выделенной при землетрясении в виде сейсмических волн.

Метаморфические породы — горные породы, подвергшиеся сильным воздействиям давления и температуры.

Метеорит — тело космического происхождения, упавшее на поверхность Земли.

Палеомагнитология — наука о древнем магнитном поле Земли

Пангея — древний суперконтинент, объединявший практически всю сушу Земли. Название предложил Альфред Вегенер, создатель теории дрейфа материков.

Планетезималь — небесное тело на орбите вокруг протозвезды, образующееся в результате постепенного объединения мелких частиц и пыли протопланетного диска.

Плюм — горячий поток магмы,двигающийся независимо от конвективных течений в мантии.

Рифт — глубокое ущелье, образующееся в месте разрыва коры.

Сейсмические волны — волны деформации в горных породах, возникающие при землетрясениях или любых взрывах.

Сейсмограф — прибор для регистрации сейсмических волн.

Сель или мур — грязекаменный поток.

Спрединг — процесс разрастания океанического дна вследствие раздвигания блоков литосферы и заполнения свободного пространства магмой из мантии.

Субдукция — погружение тяжелой океанической коры под более легкую континентальную кору.

Тефра (пепел, греч.) — собирательный термин для отложений вулканического пепла.

Форшок — землетрясения, происходящие перед главным толчком.

Цунами — волна или волны высотой до десятков метров, возникающие в океане при землетрясении и обрушивающиеся на низменные берега.

Эпицентр — проекция гипоцентра на земную поверхность.

Литература

Вишневский С. А. Астроблемы. Новосибирск: ООО «Нонпарель». 2007. 288 с.

Гир Дж., Шах Х. Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. М.: Мир. 1988. 220 с.

Задонина Н. В., Леви К. Г., Язев С. А. Космические опасности геологического и исторического прошлого Земли. Анализ временных рядов. Иркутск: изд-во Иркутского ун-та. 2007. 77 с.

Катастрофические воздействия космических тел. /Под ред. *В. В. Адушкина и И. В. Немчинова.* М.: ИКИЦ «АКАДЕМКНИГА». 2005. 310 с.

Катастрофы в истории Земли. М.: Мир. 1986. 471 с.

Короновский Н. В. Последний день Помпеи // Природа, №2. 1999, с. 29–41

Короновский Н. В. Наша планета Земля. М.: изд-во Весь Мир, 2002. 221 с.

Короновский Н. В. Общая геология. М.: изд-во КДУ. 2006. 525 с.

Короновский Н. В., Брянцева Г. В. Общая геология в рисунках и фотографиях. М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС. 2011 398 с.

Макдоналд Г. Вулканы. М.: изд-во Мир. 1975. 430 с.

Посухова Т. В., Гаранин В. К., Гаранин К. В. Минералогия месторождений алмазов. М.: изд-во МАКС-ПРЕСС. 2012. 329 с.

Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Изд. центр URSS. 2000. 312 с.

Пуцаровский Ю. М., Пуцаровский Д. Ю. Геология мантии Земли. М.: изд-во ГЕОС. 2011. 135 с.

Рогожин Е. А. Землетрясение Тохоку 11.03.2011 ($M = 9,0$) в Японии: тектоническая позиция очага, макросейсмические и геодинамические проявления // Геотектоника. 2011. №5, с. 3–16.

Саган К. Космос. Эволюция Вселенной, жизни и цивилизации. С.-Петербург: изд-во «Амфора». 2008. 369 с.

Хэллем Э. Великие геологические споры. М.: изд-во Мир. 1985. 215 с.

Цирулев Р. М. Япония. Вся правда. Первая полная антология катастрофы. М.: изд-во «Эксмо». 2011. 192 с.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ	7
Сейсмология	7
Магнитное поле Земли.....	19
Тектоника литосферных плит	24
На дне океана.....	34
Глава 2. КАТАСТРОФА, ПРИШЕДШАЯ С НЕБЕС	42
Метеориты	42
Кометы	48
Астроблемы – звездные раны Земли	50
Глава 3. ГОРЯЧЕЕ ДЫХАНИЕ ЗЕМЛИ	65
Что представляет собой вулкан	69
Расположение вулканов на земном шаре	75
Извержение, погубившее цивилизацию.....	80
Гибель Помпеи, Геркуланума и Стабии	94
Другие вулканы.....	101
Следим за вулканами	116
Глава 4. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ.....	128
Что представляет собой землетрясение и как оно возникает.....	131
Как определяют силу землетрясений.....	132
Геологическая позиция землетрясений.....	138

Наведенная сейсмичность.....	144
Цунами — смертоносные волны	145
Как возникают цунами.....	147
Можно ли предсказать землетрясение.....	150
Глава 5. ЕЩЕ НЕМНОГО О КАТАСТРОФАХ.....	159
ПОСЛЕСЛОВИЕ.....	168
Словарь	169
Литература	172

Научно-популярное издание

Короновский Николай Владимирович

Земля.

Метеориты, вулканы, землетрясения

Подп. в печ. 20.04.2014. Формат 60×90/16.
Усл. п.л. 11,0. Тираж 3000 экз. Заказ № .

ООО «Век 2», E-mail: mail@vek2.ru; www.vek2.ru
Тел. (496) 567-82-35
Изд. Лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

Отпечатано в соответствии
с предоставленными материалами
в ООО «ИПК Парето-Принт», г. Тверь,
www.pareto-print.ru