

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТИХИИ

Б.А. Болт  
У.Л. Хорн  
Г.А. Макдоналд  
Р.Ф. Скотт

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТИХИИ

Б.А. Болт  
У.Л. Хорн  
Г.А. Макдоналд  
Р.Ф. Скотт











B. A. Bolt, W. L. Horn,  
G. A. Macdonald,  
R. F. Scott

# **GEOLOGICAL HAZARDS**

Earthquakes • Tsunamis  
Volcanoes • Avalanches  
Landslides • Floods

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York 1977



Б.А.Болт  
У.Л.Хорн  
Г.А.Макдоналд  
Р.Ф.Скотт

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТИХИИ

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ЦУНАМИ,  
ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ,  
ЛАВИНЫ, ОПОЛЗНИ,  
НАВОДНЕНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
МОСКВА 1978

Перевод с английского  
Б. А. БОРИСОВА

Под редакцией  
д-ра физ.-мат. наук  
Н. В. ШЕБАЛИНА

Книга рассказывает о стихийных бедствиях, связанных с происходящими на Земле геологическими процессами: землетрясениях, вулканических извержениях, цунами, наводнениях, лавинах, оползнях и обвалах. Дано общее и вместе с тем строго научное представление о природе каждого из указанных явлений, их особенностях. Описаны и прекрасно иллюстрированы наиболее крупные геологические катастрофы, происшедшие за последние столетия. Отмечается, что хотя опасность возникновения подобных стихийных бедствий сейчас не может быть полностью устранена, систематическое и целенаправленное их изучение, а также разумное планирование, учитывающее возможные разрушительные последствия, могут во многом уменьшить их влияние на жизнь человека.

Книга представляет большой интерес не только для геологов и географов, но и для широкого круга читателей, в частности для специалистов по планированию городов и охране окружающей среды.

*Редакция литературы по вопросам  
геологических наук*

© 1975 by Springer-Verlag Berlin  
Heidelberg

© 1977 revised, second edition, by  
Springer-Verlag, New York Inc. All  
Rights Reserved. Authorized translation  
from English language edition published  
by Springer-Verlag Berlin — Heidelberg—  
New York



## Предисловие к русскому изданию

Человек всегда стремился максимально использовать земные блага и всегда вынужден был бороться с неблагоприятными и опасными явлениями природы. Землетрясения, наводнения, извержения вулканов, ураганы — сколько горя приносят они людям! И как часто люди, стремясь к быстрой выгоде, страдают в результате собственных необдуманных действий...

Стремителен бег науки. Надежный конкретный прогноз землетрясений, вулканических извержений и других опасных геологических явлений, вероятно, скоро станет реальностью. А дальше речь пойдет, очевидно, о предотвращении природных катастроф. Человечество приобретает все более мощные средства воздействия на окружающую среду, в том числе и на земные недра, и те проекты, которые вчера представлялись фантастикой, сегодня уже не кажутся неосуществимыми. Однако при этом сильно возрастает опасность непоправимого вреда, который люди могут причинить природе легкомысленным вмешательством.

Изучение природных катастроф сейчас приобретает особый смысл. Нам нужно не только изучить механизмы зарождения и развития стихийных бедствий — нам нужно также установить «нормальный» уровень природных катастроф на Земле. Ведь, несмотря на глубокие различия в их существе, все природные явления подчиняются по меньшей мере трем общим закономерностям. Во-первых, для каждого вида стихийных бедствий может быть установлена специфическая географическая приуроченность, характеризующаяся среднесуточной их повторяемостью. Во-вторых, чем больше масштаб явления, тем реже оно происходит. Наконец, с большей или меньшей степенью надежности может быть установлена зависимость разрушительного эффекта стихийных бедствий от размаха, продолжительности и интенсивности геолого-геофизических явлений. Поэтому при всей неожиданности каждой отдельной природной катастрофы их

совокупное действие за достаточно долгий период может быть оценено заранее для любой части земного шара. Таким образом, мы приходим к идее рассмотрения всей совокупности стихийных бедствий как постоянно действующего отрицательного фактора в жизни и деятельности человека на Земле.

Вопросы производственной деятельности человека во взаимосвязи с окружающей средой находятся в наше время в центре внимания научных кругов и общественности. Вышедшая в 1975 г. в издательстве «Шпрингер-ферлаг» книга Б. Болта, Г. Макдоналда, Р. Скотта и У. Хорна «Geological Hazards» сразу же привлекла к себе большое внимание, рецензии на нее появились почти во всех западных журналах геолого-геофизического и более широкого профиля. Такой интерес к книге вызван жгучей актуальностью обсуждаемых в ней проблем, связанных с защитой от стихийных бедствий, разумным использованием природных ресурсов, сохранением окружающей среды.

Книга является научной монографией: в ней делается попытка выработать единый комплексный подход к изучению опасных геологических процессов. Большое внимание уделено и важным практическим выводам, в первую очередь касающимся возможных защитных мер против стихийных бедствий. Одновременно книга представляет собой популярное литературное произведение с драматическими описаниями природных катастроф (эти описания занимают в общей сложности около четверти текста), публицистической оценкой человеческой реакции на них и критическим обзором делавшихся в разное время предложений по обузданию геологических стихий. Приведенные факты и оценки весьма поучительны, и книга оказалась очень полезной не только для геологов и геофизиков, но и для строителей, экологов, географов, а также для специалистов, ответственных за планирование экономического развития.

В 1976 г. издательство «Мир» приступило к переводу книги на русский язык, а в мае 1977 г., когда перевод был уже закончен, издательство «Шпрингер-ферлаг» известило, что к печати подготовлено второе, исправленное и дополненное издание книги на английском языке. Все новые материалы, не вошедшие в первое издание, были своевременно переданы переводчику, и предлагаемая книга является фактически переводом издания 1977 г.

Авторы книги — американцы, и хотя они описали примеры стихийных бедствий, происходивших в самых разных точках земного шара, главное внимание они уделяют проблемам своей страны — США. Поэтому в книге недостаточно подробно, на наш взгляд, рассмотрены такие распространенные явления, как карст или вечная мерзлота.

Широкое использование авторами примеров стихийных бедствий, пережитых Соединенными Штатами Америки, привело к



тому, что при переводе книги часто пришлось сталкиваться с «экстралингвистическими» ситуациями, когда смысл отдельных замечаний становится понятен только при условии знакомства с современными американскими реалиями. Переводчик и редактор стремились сделать все возможное — и притом с минимальным количеством комментариев, — чтобы облегчить чтение книги, полностью сохранив ее стиль и содержание.

«Геологические стихии» — не сводка, не каталог тех или иных событий; описания природных катастроф используются в этой книге только как характерные примеры развития геологических процессов, переходящих в катаклизмы, а также как примеры деятельности людей, направленной на борьбу против стихийных бедствий. В отдельных случаях эти описания свидетельствуют о грубых инженерных просчетах, о беспомощности застигнутых врасплох людей. Однако часто мы видим и примеры мужественного и организованного поведения людей, не отступающих перед лицом разбушевавшейся стихии

Можно надеяться, что издание этой интересной и нужной книги на русском языке будет с интересом воспринято советскими читателями.

*Б. Борисов  
Н. Шебалин*

## Предисловие ко второму изданию

Благоприятные в целом отзывы и рецензии на первое издание книги дали нам основание предпринять новое издание этой монографии, придав ей вид учебного пособия. Мы надеемся, что новое издание станет полезным дополнением как к вводным, так и к основным курсам по геологии, строительному делу, географии и проблемам окружающей среды.

В соответствии с полученными замечаниями в текст внесено несколько изменений и дополнений, но мы стремились свести их количество к минимуму, чтобы можно было снизить цену книги. Вставлен новый раздел о размещении вулканов в связи с тектоникой плит. Больше внимания уделено вопросам районирования и планового землепользования с целью уменьшения ущерба от стихийных бедствий. Дополнены списки литературы.

Авторы воспользовались возможностью заново просмотреть текст и исправить замеченные неточности и опечатки. В текст включены данные о некоторых геологических катастрофах, случившихся в течение двух лет после выхода первого издания книги. Некоторые критические замечания касались того, что в монографии не рассматриваются проблемы эрозии горных пород и отложения наносов. Эти геологические явления могут также создавать серьезную опасность, но этот вопрос находится несколько в стороне от специальности авторов. Мы пытались сосредоточить внимание на тех проблемах, с которыми нам пришлось в последнее время непосредственно сталкиваться.

Пользуемся случаем поблагодарить тех наших коллег, которые прислали отзывы на первое издание книги.

Январь 1977 г.

*Брюс А. Болт, редактор*



## Предисловие к первому изданию

Рост населения мира, развитие связей между странами и расширение их общих интересов обострили внимание к проблеме воздействия природных катастроф на человечество. Дело не только в том, что стихийные бедствия и страдания людей становятся широко известны обществу, но и в том, что постепенно возникло представление об открывающихся при тщательном изучении и обоснованном прогнозировании больших возможностях уменьшения опасностей, угрожающих жизни и благосостоянию людей.

В этой книге дан обзор стихийных бедствий, которые в наше время обычно связывают с геологическими процессами. Это землетрясения, разрывы на земной поверхности, цунами, сейши, извержения вулканов, лавины, обвалы, оползни, проседание и разжижение грунта, наводнения. Опасность возникновения таких катастроф названа здесь *геологической опасностью*.

Книга предназначена в первую очередь для широкого круга читателей, интересующихся как историей стихийных бедствий, так и исследованиями, направленными на поиски путей уменьшения опасности, хотя устранить полностью эту опасность невозможно. Авторы надеются, что книга будет полезна и студентам, изучающим вводные курсы по геологии, строительству, географии, проектированию городов и поселков и по проблемам окружающей среды. Авторы стремились привлечь внимание к тем вопросам, которые ждут еще своего решения.

Изложение носит скорее элементарный и описательный, нежели строгий математический характер. Тем не менее подход был аналитическим и критическим: авторы не пытались скрыть противоречий и расхождений в толковании проблем, связанных с обузданием стихийных бедствий и разработкой соответствующих мероприятий. Те из нас, кто хотел бы уменьшить остроту проблем окружающей среды, неизбежно сталкивался со сложностью природных условий и экономической стороны вопроса, а

также с недостатком полных и пригодных для исследования теоретических моделей (несмотря на наличие современной вычислительной техники). Часто бывает, что мы находим, казалось бы, хорошее решение той или иной проблемы, но упускаем из виду какую-то из ее сторон. Например, ограждающая плотина позволяет проводить жилищное строительство в пойме нижнего течения реки, но при этом увеличивается опасность затопления и разрушения в случае, если плотина будет прорвана во время землетрясения или в результате развития тектонического разрыва.

В разных странах мира в настоящее время проводятся обширные исследования геологической опасности. В последние годы проведено множество специальных совещаний, как национальных, так и международных, по разным аспектам этой проблемы. В частности, ЮНЕСКО организовала научные конференции почти по всем затронутым здесь вопросам: от искусственного возбуждения землетрясений при наполнении водохранилищ до систем раннего предупреждения о цунами. Авторы постарались включить в эту книгу главные итоги этих конференций и надеются, что книга будет полезной для читателей во многих странах как сводка современных знаний по затронутым темам.

В одном важном направлении мы продвинулись не столь далеко, как нам бы хотелось. Традиционный стиль представления публике концепции риска и изложение процедуры принятия решения, направленного на уменьшение риска, совершенно не отвечают возросшим требованиям. Опираясь такими неопределенными категориями, как «наиболее возможное», «вероятное», «допустимое» и т. п., исследователь ставит себя под удар критики. Пренебрежение при оценке риска реальной статистикой либо из-за недоверия к ней, либо исходя из того, что публике-де будет неинтересен рациональный учет различных шансов, теперь определенно нельзя считать оправданным. Более эффективные и более практичные методы оценки риска и принятия решения могут быть найдены только тогда, когда исследователи этого предмета решат вопрос о том, какую величину риска можно считать экономически приемлемой. Серьезный исследователь геологической опасности должен быть знаком с методами статистического анализа.

Необходимо сказать несколько слов о разделении компетенции и ответственности между четырьмя авторами этой книги. Б. А. Болт, профессор сейсмологии Калифорнийского университета в Беркли, подготовивший гл. 1 и 3, читает курс сейсмологии, включающий раздел, посвященный опасности землетрясений и цунами. Примеры оценки риска, приведенные в книге, — это результат его специальных исследований, выполненных им

в роли консультанта или непосредственно в процессе полевых изысканий. Посвященная опасности вулканических извержений гл. 2 написана Г. А. Макдоналдом, который в течение многих лет, будучи сотрудником вулканологической обсерватории на Гавайских островах и профессором геологии в Гавайском университете, работал в этой области. Главы об опасности, связанной с подвижками грунта, составлены Р. Ф. Скоттом, профессором Калифорнийского технологического института, специалистом по механике грунтов, и включают данные как теоретического, так и полевого изучения оползней, проседания и разжижения грунтов при землетрясениях. Опасности наводнений посвящена гл. 7, написанная У. Л. Хорном, который более десяти лет был главным инженером Калифорнийского ведомства водных ресурсов и отвечал за прогнозирование наводнений и связанные с ними работы. Гл. 8 составлена в основном Б. А. Болтом, участвовавшим в роли консультанта в разработке некоторых вопросов программы исследования «геологии городов» в Калифорнии.

Трудности при оценке геологической опасности возникают тогда, когда специалист не решается, так сказать, «лезть не в свое дело», т. е. не желает взяться за более общие задачи, нежели те, которыми занят в данное время. Но прогресс зависит именно от смелости исследователей, и авторы не считают нужным извиняться за то, что они попытались до некоторой степени обобщить выводы, сделанные разными специалистами. Однако авторы подчеркивают, что читатель должен быть осторожным и избегать предубежденности при суждении о риске в отраслях знания, далеких от его собственной специальности.

Авторы выражают признательность коллегам, сделавшим очень ценные критические замечания по различным частям рукописи. В подготовке обзоров и других материалов отдельных глав участвовали д-р Р. Адамс, Р. Вигель, Л. Джеймс, У. Клауд, Дж. Лефтер, д-р С. Омоте, д-р Дж. Оукшотт, д-р Х. Уильямс, д-р Дж. П. Шер, д-р Дж. Шульц и д-р А. Юарт. Авторы благодарят также д-ра Беверли Болт за многообразную помощь. Р. Ф. Скотт признателен за гостеприимство, оказанное ему в Черчилл-Колледже (Кембридж), где была подготовлена часть его раздела.

Март 1975 г.

*Авторы*





# ГЛАВА I

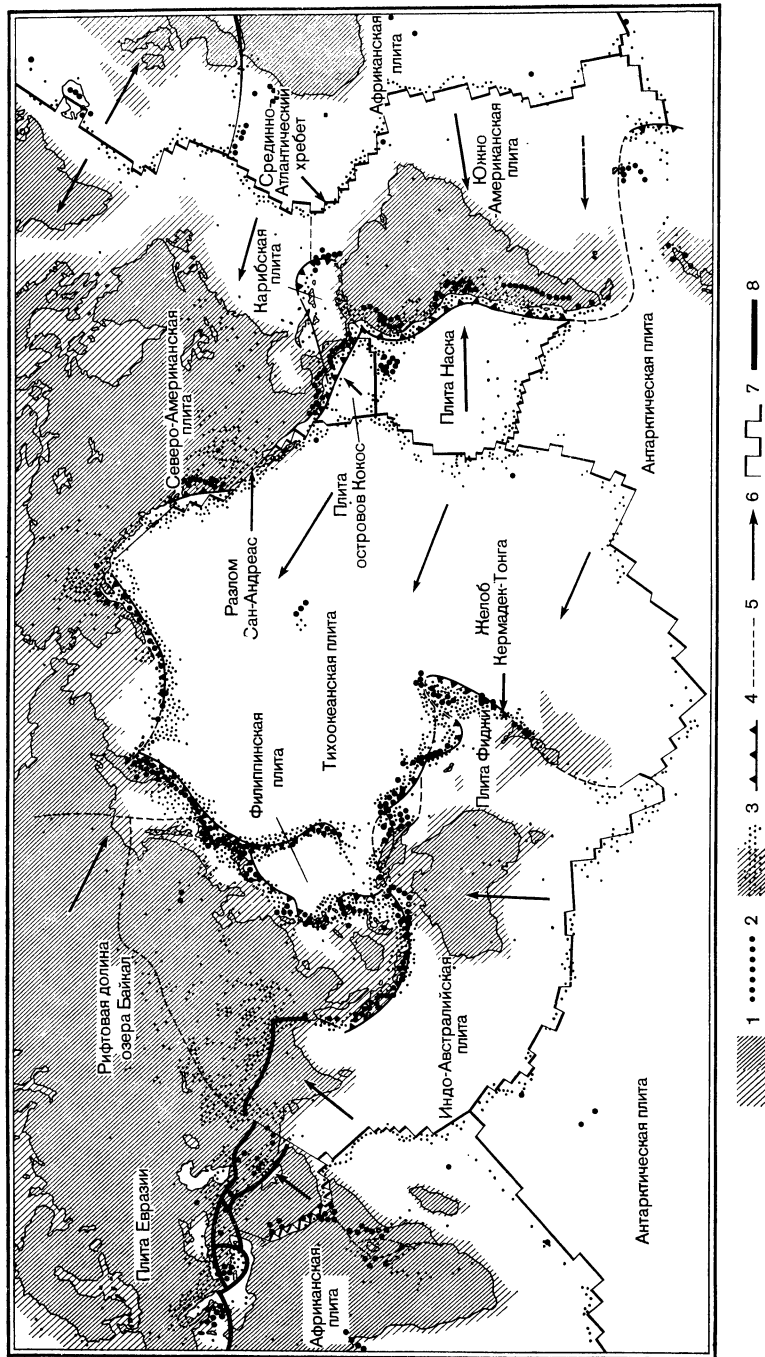
## ОПАСНОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### 1.1. Аляскинское землетрясение и цунами 27 марта 1964 г.

**Свидетельства очевидцев.** На исходе дня в страстную пятницу, 27 марта 1964 г., в 17 часов 36 минут по местному времени, в редко населенном гористом районе, окружающем северную часть залива Принс-Вильям (в середине побережья южной Аляски — см. фиг. 1.1), разразилось сильное землетрясение. Сейсмические волны, распространившиеся из очага землетрясения, вызвали серьезные разрушения на площади более 20 тыс. км<sup>2</sup>. В зоне значительных разрушений (т. е. в *мейзосейсмической*, или *плейстосейстовой*, области) крупнейшим пострадавшим городом был Анкоридж, расположенный примерно в 130 км от центра землетрясения (см. фиг. 1.2).

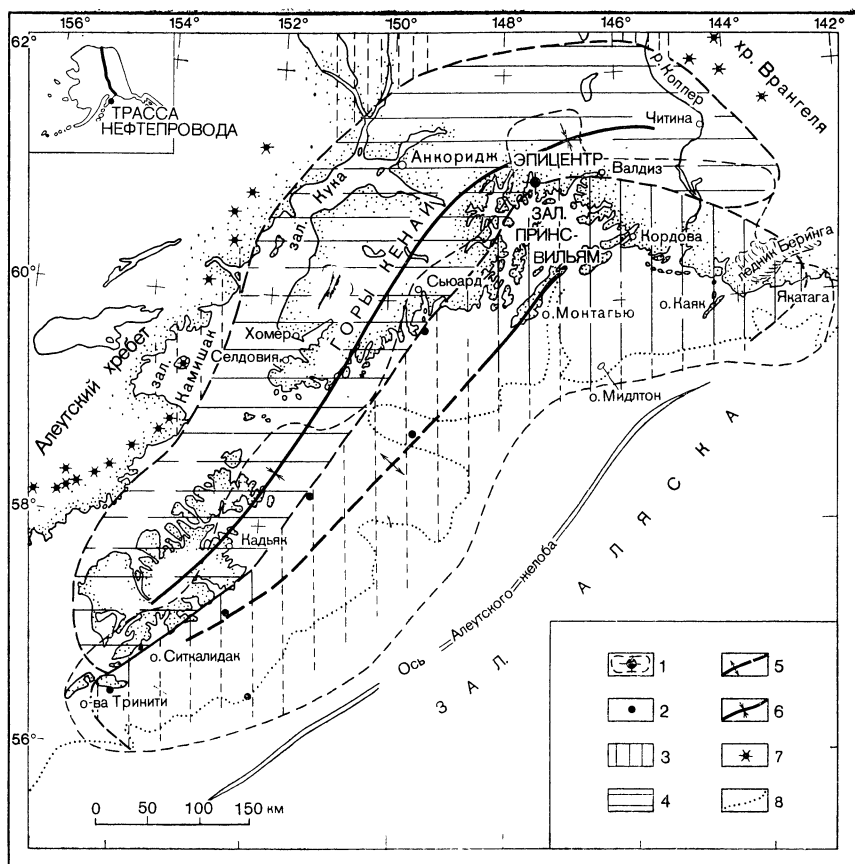
В благоустроенном пригороде Анкориджа, в районе Тернагейн-Хайтс, на высоком обрыве, с которого открывался вид на залив Кука, находился дом редактора газеты «Анкоридж дейли таймс» Роберта Б. Эгвуда, описавшего впоследствии свои ощущения.

«Я только что взял трубу, чтобы приступить к своим музыкальным упражнениям, как началось землетрясение. Сразу же стало ясно, что это землетрясение нешуточное: слишком уж сильно раскачалась люстра, сделанная из корабельного штурвала. Начали падать предметы, которые раньше никогда не падали. Я бросился к дверям. На дорожке перед домом я



Фиг. 1.1. Карта мира, схематически показывающая расположение вулканов и зон землетрясений в системе крупных тектонических плит.

1 — континентальная кора, 2 — вулканы; 3 — зоны субдукции; 4 — зоны субдукции; 5 — границы плит, проводимые условно; 6 — напр.-вление движения плит, 7 — разрастающиеся срединно-океанические хребты, смещенные по трансформным разломам; 8 — зоны столкновения плит



Фиг. 1.2. Деформация земной коры при Аляскинском землетрясении 1964 г. Показана область афтершоков, последовавших за главным толчком (обозначен крупным кружком). 1—эпицентр главного толчка, прерывистой линией показана граница зоны крупных афтершоков ( $M \geq 4,4$ ); 2—эпицентры крупных афтершоков ( $M \geq 6,0$ ), 3—область поднятия или вероятного поднятия (прерывистая штриховка), 4—область опускания; 5—ось поднятия, прерывистая линия—ось предполагаемого поднятия; 6—ось опускания; 7—вулканы; 8—внешний край шельфа (изобата 200 м). По данным Национальной океанографической службы США.

обернулся: мой дом корчился и стонал. Во дворе падали высокие деревья. Я устремился к тому месту, где, как мне казалось, я буду в безопасности, но когда я оказался там, то увидел, что по земле поползли трещины. Куски земли непонятной формы, с рваными краями, двигались вверх-вниз, наклоняясь под всевозможными углами. Я попытался перебраться на другое место, но всюду появлялись все новые и новые трещины. Вдруг мой дом отодвинулся от меня, причем очень быстро. Я начал было



Фото 1.1. Дома, разрушенные в результате крупного оползня в Тернагейне при Аляскинском землетрясении 1964 г.

Под действием сейсмических колебаний обрушился 22-метровый береговой уступ, сложенный мягкими глинами. Оползень захватил полосу побережья длиной 2800 м и распространился в сторону суши на расстояние 300 м.

перелезая через изгородь в соседний двор, как вдруг эта изгородь провалилась в землю. Деревья падали в разные стороны, образуя беспорядочные завалы. Появились глубокие расщелины. Плоские глыбы земли поднялись на большую высоту и казались уродливыми грибами с огромными шляпками. Некоторые из них наклонились под сумасшедшими углами. Подо мной вдруг открылась новая трещина, я рухнул в нее и сразу же чуть было не оказался похороненным заживо. Я едва успевал уклоняться от падавших на меня кусков дерева, жердей из изгородей, почтовых ящиков и всяких других обломков. Потом обрушился дом моего соседа и тоже сполз в эту расщелину. Когда движение земли прекратилось, я выбрался наверх и увидел странный угловатый ландшафт, окружавший меня со всех сторон».

Характер ландшафта, возникшего после землетрясения, столь ярко описанного Этвудом, показан на фото 1.1. Сильнейшие разрушения на поверхности были прямым результатом того, что глинистый грунт не выдержал сейсмических колебаний. Это привело к образованию большого оползня в направлении морского побережья (см. гл. 4).



В центральных районах Анкориджа разрушения были разными в зависимости от прочности материала основания и от типа зданий. В жилом доме квартала Хилсайд-Мэнор, построенном из бетонных блоков, находилась квартира геолога Дж. Уильямса. Он сидел на диване в своей гостиной. Позднее он вспоминал: «Сначала мы заметили, что дом стал как-то громко трещать. Первые колебания продолжались, наверное, пять-десять секунд, а потом, без сколько-нибудь заметного затишья, начались сильные боковые толчки, как мне показалось, с востока на запад.

Прошло несколько секунд, сильная боковая качка продолжалась, я подхватил своего сына и бросился к двери, ведущей в холл, оставил ее открытой, чтобы не заклинилась, и встал в проходе. Взглянул на стену со стороны холла и снова со стороны квартиры. Было видно, как бетонные блоки внутренних стен трутся друг о друга, и я заметил, что некоторые блоки уже вывалились на улицу и внутрь квартиры и холла. Я взял сына и выбежал к стоящему автомобилю. Посмотрел на здание: оно раскачивалось с востока на запад. Падали бетонные блоки, вспучивалась земля; деревья и столбы сильно качались. Разрушения были во всем доме. Наша квартира оказалась в числе наименее пострадавших. Легкие кушетки не сдвинулись; портативный телевизор не упал со своей подставки на колесиках; отпечаток руки ребенка, сделанный в штукатурке на стене, остался цел. Плита на кухне не сдвинулась со своего места, однако холодильник отошел от стены».

От поведения зданий такого типа резко отличалось поведение каркасного дома (с бетонным фундаментом) на Эйт-Стрит 1555. Хотя его обитатели испытали жестокую тряску и при этом упали лампы и раскрылись дверцы буфетов, единственным заметным повреждением оказалась трещина в южной стене!

**Гигантская морская волна.** При внезапном вертикальном смещении океанского дна резко всколыхнулись воды залива Принс-Вильям и всего залива Аляска, и на центральные районы южного побережья Аляски обрушилась гигантская морская волна, или *цунами*, которая распространилась потом по всему Тихому океану (см. гл. 3).

В городе Валдиз, примерно в 70 км от центра землетрясения, волны опустошили гавань и приморские районы. В первые же секунды, когда начались сотрясения, очевидцы поняли, что у пирса происходит что-то ужасное. Сначала внимание всех было приковано к пароходу «Чина» длиной около 120 м. Как пробка, он подпрыгнул на 6—9 м, затем упал, ударился днищем, рванулся вперед, глубоко погрузился и снова целиком поднялся из воды. Только каким-то чудом пароход уцелел. Находившиеся на

нем люди утверждают, что крен достигал 50°, а потом волны выравнивали судно прямо. Нос парохода поднимался так, что его хорошо было видно над надстройками плавучего дока. Два человека на пароходе были убиты упавшим грузом и еще один умер от сердечного приступа.

Почти в это же время валдизский плавучий док резко дернулся и раскололся пополам, а находившиеся на нем склады и другие палубные надстройки были одним толчком сброшены в море. Мужчины, женщины и дети беспомощно барахтались вокруг дока, пытаясь ухватиться за что-нибудь. Через короткое время на это место накатилась огромная волна, ломая все на своем пути: строения были разбиты в щепки, тяжелые трейлеры оказались разбросанными по всему берегу, а легковые машины и грузовики превратились в исковерканные груды металла. Некоторые очевидцы утверждают, что высота волны, обрушившейся на берег, была около 9 м. Все это произошло в считанные минуты. Примерно через десять минут после того, как схлынула эта первая волна, накатилась другая, принесшая еще большие разрушения. Затем было пяти- или шестичасовое затишье, когда спасательные команды смогли выйти на поиски оставшихся в живых. Найти, однако, не удалось никого.

**Деформация земной коры.** Отчеты очевидцев этого крупнейшего Землетрясения страстной пятницы — это волнующие документы, имеющие как общественное, так и научное значение. Они показывают, как реагируют люди на внезапное стихийное бедствие, а также содержат данные, необходимые для научной оценки причин, характера и последствий этого природного явления. После Аляскинского землетрясения были приложены многолетние усилия геологов, геодезистов, геофизиков, инженеров-строителей и других специалистов, направленные на то, чтобы собрать максимум полезных сведений о таких катастрофах. Однако из-за того, что свидетельства очевидцев часто противоречивы, так как окрашены напряжением пережитого момента, главное внимание уделяется систематическому изучению повреждений в зданиях после землетрясений, измерениям величины сдвигов по разрывам (если такие сдвиги обнаружены) и вертикальных смещений земной поверхности, особенно вдоль морского побережья, где можно получить абсолютные значения поднятия или опускания от уровня моря. Если удастся собрать соответствующие материалы, то анализу подвергаются записи сейсмических колебаний, зарегистрированных сейсмографами (как вблизи, так и на удалении от очага землетрясения), записи атмосферных волн, сделанные микробарографами, и записи цунами, выполненные с помощью мареографов и футштоков.

Сейсмические волны сильнейшего Аляскинского землетрясения были записаны сейсмическими станциями всего мира, часто с такой амплитудой, что наиболее чувствительные сейсмографы были зашкалены, и по их записям мало что можно было измерить. По времени прихода волн к разным станциям было определено место начала вспарывания (гипоцентр, или фокус, землетрясения) в точке с координатами  $61,1^{\circ}$  с. ш.,  $147,4^{\circ}$  з. д., на глубине от 20 до 50 км под заливом Принс-Вильям. Измерения амплитуды волны показали значение магнитуды землетрясения между 8,0 и 8,6, что ставит его в ряд сильнейших из когда-либо отмеченных землетрясений (см. приложение А). К сожалению, в это время на Аляске не было приборов, которые могли записать полную картину сильного смещения грунта в мейзосейсмической зоне. Поэтому точные сведения о смещениях грунта в Анкоридже и других городах, пораженных этим землетрясением, сведения, которые позволили бы провести инженерно-строительную оценку, никогда уже не удастся получить.

Деформация земной коры проявилась на большей площади, чем когда-либо раньше при одном землетрясении (см. фиг. 1.2). Вертикальное смещение континентального склона в пределах всего залива Принс-Вильям на полосе длиной почти 1000 км, вплоть до юго-западного окончания острова Кадьяк, оценено по данным нескольких сотен измерений положения верхнего предела области обитания организмов приливно-отливной береговой зоны относительно нормального уровня моря. Например, многие ракообразные создают на скалистых берегах крупные колонии с четкой, легко различимой верхней границей, положение которой зависит в основном от способности этих животных длительное время обходиться без воды.

На Аляске выделяются следующие крупные области, в которых произошло изменение высоты земной поверхности: 1) широкая зона *опускания* с амплитудой около 2 м вдоль горной цепи Кадьяк — Кенай — Чугач; 2) крупная зона *поднятия*, граничащая с первой зоной со стороны моря и включающая весь шельф; 3) зона небольшого *поднятия*, которая примыкает к первой зоне со стороны континента и распространяется на север, в область Аляскинского и Алеутского хребтов. Максимальное вертикальное поднятие во второй зоне достигает местами 11 м. На фиг. 1.2 видно, что эти деформации коры согласуются с крупным разрывом, идущим вдоль побережья, от залива Принс-Вильям на юго-запад к южной стороне острова Кадьяк.

После главного землетрясения в зоне этого разрыва произошло много тысяч повторных толчков — афтершоков, причем 1260 из них было записано в течение первых четырех месяцев после главного толчка. Распределение афтершоков указывает

на большие размеры области дробления земной коры при землетрясении 1964 г.

Разрывы на поверхности, связанные с очагом этого землетрясения, были найдены только на юго-западе острова Монтэгью (в заливе Принс-Вильям) и на подводном продолжении одного разрыва к юго-западу от этого острова. На более длинном из этих двух разрывов был ясно виден уступ с максимальной вертикальной составляющей смещения 6 м. Другие случаи предполагавшихся разрывов, тщательно обследованные в поле геологами Геологической службы США, оказались оползнями или поверхностными трещинами в неустойчивых грунтах.

Землетрясение произошло в сейсмически активной зоне, идущей на запад вдоль побережья Аляски, в том же направлении, что и Алеутский глубоководный желоб, который проходит южнее Алеутской островной дуги (см. фиг. 1.1), образованной цепочкой позднекайнозойских вулканов. Детальные датировки (радиоуглеродным методом) горных пород, образцы которых были взяты с поднятых морских террас вдоль береговой линии этой дуги (см. фото 5.1), показали, что эпизоды резкого поднятия имели тот же характер, как при землетрясении 1964 г. и повторялись здесь, вероятно, один раз в тысячелетие. Это землетрясение было только одним из таких импульсов — самым близким к нам в длительном процессе деформации, который начался 10 млн. лет назад в позднем плиоцене, продолжается в настоящее время и будет развиваться в дальнейшем.

В 1912 и 1934 гг. вблизи центра землетрясения 1964 г. произошли два землетрясения с магнитудой около 7,2; другие весьма крупные землетрясения произошли в центральной части Аляски в 1937, 1943, 1947 и 1958 годах. Однако в период, предшествовавший Землетрясению страстной пятницы в 1964 г., в районе острова Кадьяк не отмечалось, согласно имеющимся сейсмологическим записям, сколь-нибудь заметного повышения или понижения сейсмической активности.

Геологические и сейсмологические исследования, выполненные после землетрясения, привели к созданию модели, объясняющей большинство наблюдавшихся вертикальных и горизонтальных смещений и картину распространения сотрясений. По этой модели должно происходить надвигание Аляски в южном направлении по пологому разрыву (возможно, под углом около  $20^\circ$ ), проходящему вдоль подводного желоба (обобщенная схема приведена на фиг. 1.4).

Процесс развития крупного разрыва начался вблизи центра главного толчка, в северной части залива Принс-Вильям, а затем разрыв распространился вверх (в направлении Алеутского желоба) и по горизонтали (на юго-запад и на восток) в районы,



границы которых были позднее определены по афтершокам (см. фиг. 1.2). По мере развития разрыва резкие импульсы выделявшейся энергии порождали сейсмические волны, которые распространялись в Земле во всех направлениях.

**Размеры бедствия.** Жертвами землетрясения стали триста человек: одни были убиты непосредственно в результате сотрясений, другие утонули при цунами. Сильные сотрясения послужили спусковым механизмом для многочисленных горных обвалов, снежных лавин и оползания грунта во всей центральной части южной Аляски. В неустойчивых отложениях широко проявились такие процессы, как дробление, обрушение склонов, искривление и проседание поверхности, а на льду озер и рек появились трещины и «валы давления» — торосы. В общем, по оценке 1968 г., материальный ущерб составил на Аляске 310 млн. долл. В связи с разрушением гаваней, доков, железнодорожных линий, мостов, автомобильных дорог, электростанций и всевозможных построек произошли большие нарушения в работе промышленности и в жизни населения штата.

Аляска дает нам хорошие примеры геологической опасности, связанной с крупными землетрясениями, цунами, оползнями (см. гл. 3) и вулканическими извержениями (см. гл. 2), хотя степень риска на этой огромной территории далеко не одинакова. В самом деле, в некоторых частях Аляски вероятность геологических катастроф невелика (см. о трассе нефтепровода в разделе 1.5), но цена таких катастроф — будь то потерянные человеческие жизни или разрушенное имущество — всегда одинаково велика.

Самые ранние постоянные поселения были основаны русскими на острове Кадьяк в 1783 г., а первое сообщение о землетрясении связано с извержением вулкана Павлова в 1786 г. Первые русские поселенцы и местные жители Аляски ограничивали свою деятельность теми местами, где можно было легко ловить рыбу и добывать пушнину, но после золотой лихорадки на Клондайке (в 90-х годах прошлого века) размещение поселков изменилось, и необжитые места в южной Аляске стали заселяться. Когда стали заселяться внутренние районы страны, количество сообщений о землетрясениях резко увеличилось. Даже сегодня, если бы не было инструментальных данных, получаемых от сейсмических станций, сообщения об ощущаемых землетрясениях дали бы очень искаженную картину сейсмичности огромных ненаселенных областей северной Аляски и Алеутских островов. Такое искажение, обусловленное неравномерной заселенностью, отмечено во многих местах — например, при сборе сведений о ранних землетрясениях в Новой Зеландии.

## 1.2. Сейсмичность мира

**Исторические сведения и интенсивность землетрясений.** В среднем каждый год от землетрясений погибает около 10 тысяч человек. По данным ЮНЕСКО, с 1926 по 1950 г. от землетрясений погибло 350 тысяч человек, а ущерб измеряется суммой порядка 10 млрд. долл. В Средней Азии за этот период было разрушено два города и двести деревень. С того времени еще несколько городов, в том числе Ашхабад (1948 г.), Агадир (1959 г.), Скопье (Скопле) (1963 г.), Манагуа (1972), Джемона (1976), Таншань (1976), Бухарест (1977), и сотни деревень были стерты с лица Земли полностью или частично (см. фото 1.2). Исторические документы свидетельствуют, что человечество издавна было озабочено опасностью землетрясений.

Самый длинный каталог землетрясений дошел до нас из Древнего Китая со времен династии Шань (более 3000 лет назад). Списки, составленные китайскими учеными, насчитывают более 1000 разрушительных землетрясений за период 2750 лет: от 780 года до н. э. до настоящего времени. Обширный каталог японских землетрясений составлен в эпоху сёгуната Токугава, около 1600-х годов нашей эры. Средиземноморские памятники западной цивилизации — древнееврейские и арабские тексты — содержат упоминания о землетрясениях очень ранних времен. Библейский рассказ о разрушении Содома и Гоморры и о падении стен Иерихона (около 1100 лет до н. э.), возможно, подразумевает два древнейших (из упомянутых в Библии) землетрясения. Первый случай с геологической точки зрения можно объяснить следующим образом: сильное землетрясение, которое произошло вдоль разрыва, ограничивающего рифтовую долину Мертвого моря, разрушило постройки и привело к высвобождению природного газа и битумов, которые вспыхнули от огня кухонных очагов, что и привело к описанному в Библии пожару, уничтожившему Содом и Гоморру.

Обычно употребляемая характеристика «силы» землетрясения — это *интенсивность* («балльность») землетрясений. Интенсивность — это мера повреждений, причиненных созданным людьми сооружениям, нарушений на поверхности грунта, а также человеческой реакции на сотрясения. Ввиду того что оценка интенсивности землетрясения базируется не на показаниях приборов, а на наблюдениях реальных явлений в мейзосейсмической зоне, можно указать интенсивность даже для исторических (т. е. древних) землетрясений. Таким образом, исторические записи приобретают важнейшее значение для современных расчетов сейсмического риска.

Первую шкалу интенсивности разработали в 80-х годах прошлого века итальянец де Росси и швейцарец Форель. Эта деся-



Фото 1.2. Пример резкого различия в степени повреждений при землетрясении 1972 г. в Манагуа.

Жилые дома с «набивными» стенами (пространство между вертикальными деревянными стойками набивается камнем и глиной) рухнули, из чего можно сделать вывод о высокой интенсивности землетрясения, а современное здание Банко-де-Америка (на заднем плане) не испытало никаких существенных повреждений, что можно было бы считать свидетельством низкой интенсивности землетрясения.

тибалльная шкала использовалась, например, в сообщениях об интенсивности землетрясений 1906 г. в Сан-Франциско. Более совершенная шкала была предложена в 1902 г. итальянским вулканологом и сейсмологом Меркалли. Эта шкала была уже 12-балльной. Один из вариантов ее, модифицированный Вудом и Ф. Нейманом для условий Калифорнии, приведен в табл. 1.1. Описания, приведенные в табл. 1.1, позволяют численно оценить степень разрушений в местах, испытавших землетрясение. Районы, в которых оценена интенсивность землетрясений, могут быть оконтурены на карте изолиниями, которые и образуют *карту изосейст* (см. фиг. 1.3). Такая карта дает грубые, но ценные сведения о распределении сотрясений на поверхности Земли, о влиянии почвенного слоя и подстилающих геологических образований, о размерах очага и о других фактах, важных для решения задач страхования и строительства (см. гл. 8).

Ввиду того что шкалы интенсивности землетрясений основаны на субъективных ощущениях и приспособлены к социаль-

Таблица 1.1

**Шкала интенсивности землетрясений ММ (модифицированная шкала Меркалли), 1931 г.**

- I Ощущается только очень немногими людьми при особо благоприятных обстоятельствах.
- II Ощущается только немногими людьми, находящимися в покое, особенно на верхних этажах зданий. Свободно подвешенные предметы иногда начинают покачиваться.
- III Вполне отчетливо ощущается в помещении, особенно на верхних этажах зданий, но многие люди не распознают еще землетрясения. Стоящие машины иногда слегка дрожат. Ощущается вибрация, как от проходящего мимо грузовика. Можно оценить длительность колебаний.
- IV Днем ощущается в помещении многими, а вне помещения — немногими людьми. Ночью некоторые просыпаются. Сдвигается с места посуда, открываются и закрываются окна и двери; стены трещат. Впечатление, как будто тяжелый грузовик ударился в стену дома. Стоящие машины заметно дергаются и подсакивают.
- V Ощущается почти всеми, многие из спящих просыпаются. Иногда трескаются посуда, стекла окон и т. д. Образуются отдельные трещины в штукатурке; неустойчивые предметы опрокидываются. Иногда отмечается сотрясение деревьев, столбов и других высоких предметов. Могут остановиться маятниковые часы.
- VI Ощущается всеми; многие в испуге выбегают из домов. Иногда сдвигается тяжелая мебель, отмечаются случаи выпадения штукатурки и повреждения труб. Разрушения небольшие.
- VII Все выбегают из домов. В зданиях прочной конструкции и хорошей постройки разрушения незначительные, в хорошо построенных обычных домах — небольшие или умеренные, в плохо построенных или неудачно сконструированных домах и сооружениях — значительные; некоторые дымовые трубы разрушаются. Замечается людьми, ведущими машины.
- VIII В специальных антисейсмических зданиях повреждения небольшие; в обычных домах из дерева или камня — значительные, с частичным обрушением; плохо построенные здания и сооружения разрушаются сильно. Панельные стены отделяются от каркаса. Падают дымовые трубы в домах, фабричные трубы, колонны, памятники, стены. Опрокидывается тяжелая мебель. Небольшие выбросы песка и грязи. Изменяется уровень воды в колодцах. Люди, ведущие машину, испытывают сотрясение.
- IX Наблюдаются значительные повреждения в специально сконструированных постройках; каркасные постройки хорошей конструкции перекашиваются, наклоняются. Сильно повреждаются здания из обычных материалов и частично обрушаются. Дома сдвигаются со своих фундаментов. Хорошо видны трещины в грунте. Появляются разрывы подземных трубопроводов.
- X Разрушаются деревянные сооружения хорошей постройки; большинство каменных и каркасных строений разрушается вместе с фундаментом; грунт изоборужен трещинами. Искривляются железнодорожные рельсы. Происходят значительные оползни с бортов речных долин и крутых склонов. Текут песчаные и глинистые грунты. На наклонных бортах долин прорываются водяные фонтаны.
- XI Не обрушиваются только единичные строения (каменной кладки). Мосты разрушаются. В грунте образуются широкие расщелины. Под-



- земные трубопроводы полностью выходят из строя. Происходят обвалы и крупные оползни в мягких грунтах. Сильно искривляются рельсы.
- XII Полное разрушение. Практически все части построек очень сильно повреждены или разрушены. Наблюдаются волны на поверхности Земли. Обнаруживаются видимые изменения в ландшафте. Предметы подбрасываются в воздух.

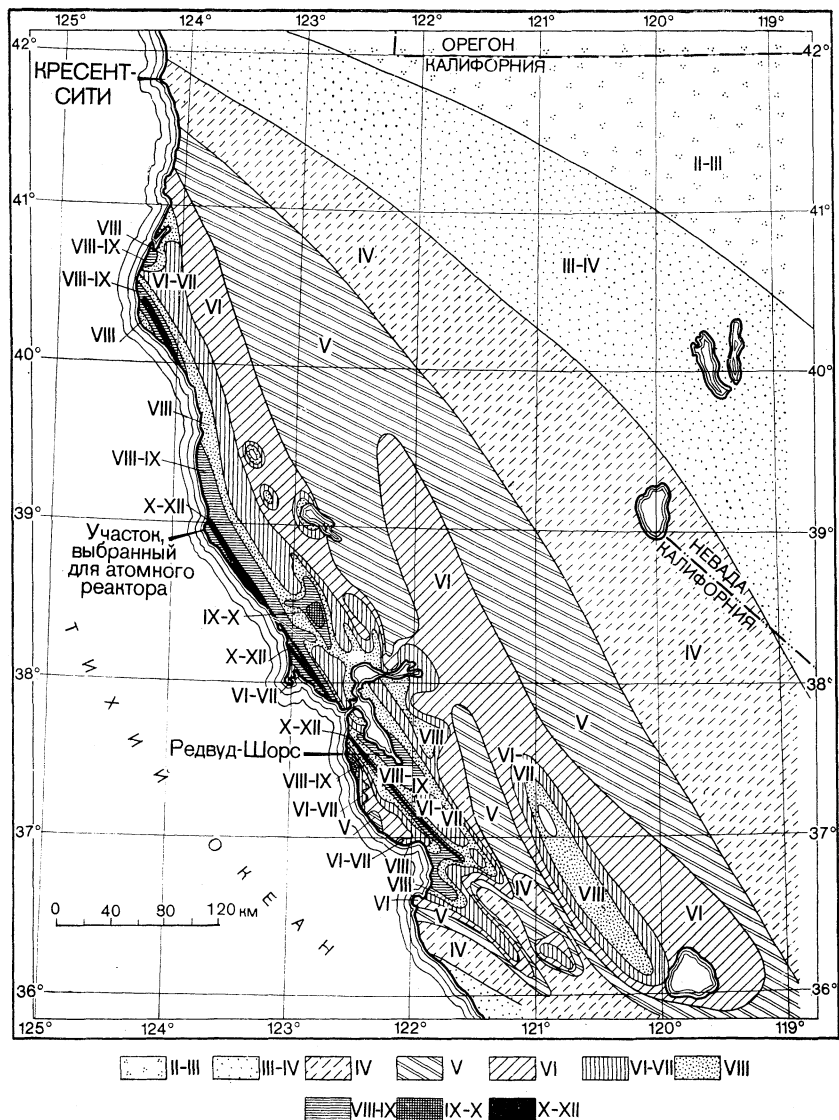
ным и техническим условиям той или иной страны, их необходимо время от времени пересматривать. Надо учитывать местные особенности, и в этой связи интересно сопоставить с модифицированной шкалой Меркалли японскую семибалльную шкалу, сокращенное описание которой дано в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

## Японская шкала интенсивности землетрясений

- 0 Не ощущается: слишком слабое, чтобы люди могли его заметить, регистрируется только сейсмографами.
- I Незначительное: очень слабо ощущается людьми, находящимися в полном покое, и теми, кто особенно чувствителен к землетрясениям.
- II Слабое: ощущается большинством людей, вызывает легкое дрожание окон и японских решетчатых раздвигающихся дверей («седзи»).
- III Довольно сильное: сотрясение хижин и крупных зданий; сильный треск, издаваемый окнами и решетчатыми дверьми; раскачивание подвешенных предметов; иногда — остановка маятниковых часов; колебание жидкостей в сосудах. Некоторые люди от испуга выбегают из домов.
- IV Сильное: сильное сотрясение хижин и крупных зданий, опрокидывание неустойчивых предметов, расплескивание жидкости из сосудов.
- V Очень сильное. трещины в кирпичных и оштукатуренных стенах, опрокидывание каменных светильников, могильных камней и т. п., повреждение дымовых труб, строений из глины и штукатурки. Наблюдаются оползни на крутых склонах гор.
- VI Разрушительное: приводит к уничтожению более 1% японских дощатых домов; оползни, крупные трещины на плоской поверхности грунта, иногда сопровождающиеся интенсивным стеканием грязи и воды в низменные участки земли.
- VII Опустошительное: приводит к уничтожению почти всех домов; наблюдаются крупные трещины и разрывы на поверхности грунта.

**Определение мест очагов землетрясений.** Положение очагов землетрясений, происходивших в прошлые века, устанавливается по оценкам интенсивности сотрясений; центры этих землетрясений помещают у середины карты изосейст. Начиная примерно с 1900-х годов наши знания о распределении землетрясений уже, к счастью, основываются не только на сообщениях очевидцев (результат обобщения таких сведений сильно зависит от размещения населения), а получаются путем объективной



Фиг. 1.3. Изосейсты сильнейшего Калифорнийского землетрясения 1906 г. Изолинии оконтуривают области равной интенсивности сотрясений, оцененной в баллах шкалы ММ (модифицированная шкала Меркалли). Из доклада Комиссии по землетрясениям штата Калифорния, 1908.

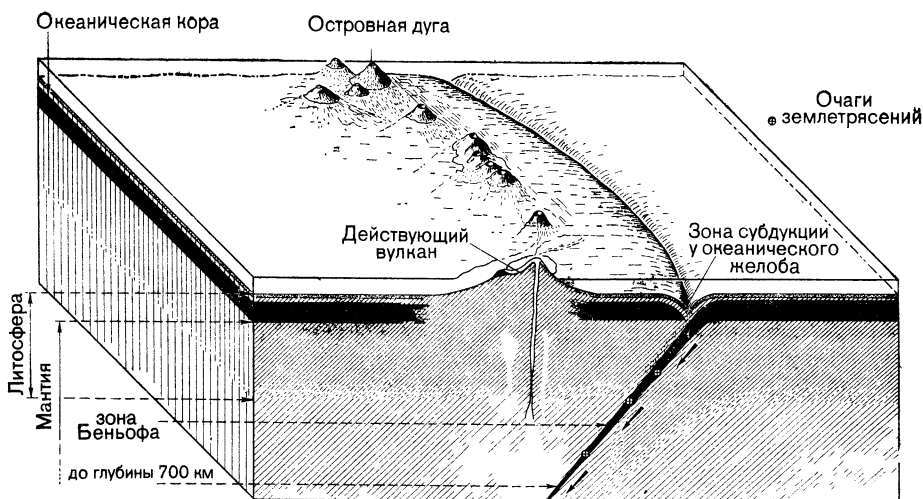
регистрации землетрясений сейсмографами, раскиданными по всему миру. В настоящее время имеется около тысячи непрерывно действующих сейсмических станций, и даже в самых маленьких странах, где есть опасность землетрясений, работает по меньшей мере одна обсерватория. Обычный сейсмограф состоит из подвешенной массы (вроде маятника) с демпфирующим и усилительным устройствами.

Современные сейсмографы могут усиливать сейсмические колебания грунта с периодом около 1 с более чем в миллион раз. По времени прибытия этих усиленных волн можно рассчитать положение очага землетрясения и его размер независимо от того, в какой точке земного шара оно возникло.

Распределение землетрясений показано в общих чертах на фиг. 1.1. Можно видеть, что землетрясения, как и вулканы и высокогорные хребты, не рассеяны по Земле как попало, а сконцентрированы в своем большинстве в узких поясах. Многие землетрясения происходят вдоль срединно-океанических хребтов и не представляют опасности для человечества. Наибольшая сейсмическая активность приурочена к краям *тектонических плит* (фиг. 1.1), например к краям Тихоокеанской плиты, внутренние области которой почти асейсмичны. Наиболее «тихие» края имеет Антарктическая плита, почти со всех сторон окруженная разрастающимися хребтами; во внутренних районах этой плиты почти не бывает землетрясений.

Внешнюю оболочку Земли в ее современном виде изображают состоящей из более чем 15 сравнительно не нарушенных плит литосферы (коры и верхней мантии) толщиной около 60 км, движущихся относительно друг друга. Они расходятся (разрастаются) от срединно-океанических хребтов (фиг. 1.1), где постоянно добавляется в результате подъема магмы новый литосферный материал. На противоположных краях плит обычно располагаются глубоководные желоба, например вдоль систем островных дуг Тихоокеанской плиты и плиты Наска. У этих желобов сходятся плиты, движущиеся по встречным направлениям (например, вдоль Анд — плиты Наска и Южно-Американская), и одна из них поддвигается (испытывает *субдукцию*) под другую, опускаясь в более глубокие части Земли. Обобщенная схематическая модель этого воображаемого процесса показана на фиг. 1.4. В погружающейся плите на многих глубинах располагаются очаги землетрясений. В других местах, например вдоль Кавказско-Гималайского пояса, сталкиваются лежащие на плитах континенты, и сейсмическая активность здесь также высока.

Фокусы землетрясений, положение которых устанавливается по характеристикам сейсмических волн, возникают на различных глубинах: от близких к поверхности до примерно 700 км;



Фиг. 1.4. Модель литосферной плиты и зоны Бенъофа, погружающихся под островную дугу.

Менее плотная магма поднимается к поверхности и изливается в виде лавы на дно океана, создавая там островную дугу.

землетрясения с более глубокими очагами не отмечались. Однако более 75% сейсмической энергии выделяется ежегодно при землетрясениях с очагами глубиной меньше 60 км. Именно эти землетрясения — они называются *мелкофокусными*, или *нормальными*, — представляют значительную опасность.

**Магнитуда землетрясения и сейсмический момент.** Сейсмические волны, возникающие в очаге землетрясения, относятся к трем главным типам. Самые быстрые — это *продольные* волны, или волны *P*, которые проходят как через твердые, так и через жидкие части Земли. Движение материальных частиц в этих волнах такое же, как и при звуковых волнах; при этом происходит сжатие и разрежение передающего вещества. В твердых горных породах Земли распространяются также вторичные, *поперечные* волны, или волны *S*; при этом частицы движутся в направлении, поперечном к пути волны, образуя сдвиговые деформации горных пород. Скорость этих волн всегда меньше, чем скорость волн *P*.

За волнами *P* и *S*, проходящими через тело Земли, следует длинная вереница волн, передаваемых по свободной поверхности Земли. Эти *поверхностные* волны бывают двух видов: волны *Лява* и волны *Рэлея*. Горизонтальные колебания происходят в обоих видах волн, а вертикальные — только в волнах *Рэлея*.

При своем распространении они, испытывая дисперсию, создают весьма длинные пути волн, и с ними связана большая часть сотрясений, ощущаемых на удалении в несколько километров от очага. Первыми в любую точку на поверхности Земли приходят волны *P*, так как они имеют наибольшую скорость. Первый всплеск волны *P* возникает, конечно, в том месте, где зарождается землетрясение, в точке, называемой *фокусом*, или *гипоцентром*, землетрясения. Фокус всегда располагается на некоторой глубине, поэтому на карте показано положение не самого очага землетрясения, а обозначена точка, находящаяся на земной поверхности прямо над гипоцентром. Эта точка на поверхности Земли называется *эпицентром* землетрясения.

Относительная мощь землетрясений, классифицируемая субъективно как интенсивность, может быть измерена с помощью сейсмографов, путем сравнения определенных особенностей сейсмограмм. Эти характеристики, или *параметры землетрясения*, включают в себя продолжительность записанных колебаний, амплитуду некоторых пиков волн и т. д. Обычно используемая инструментальная шкала, разработанная Чарлзом Ф. Рихтером, основана на измерении наибольших амплитуд волн, записанных сейсмографом при землетрясении.

Ввиду того что сила землетрясения варьирует в огромном диапазоне, удобно при измерении амплитуд волн использовать логарифмы. Вот точное определение *магнитуды* землетрясения, данное Рихтером: магнитуда — это «логарифм (десятичный) амплитуды наибольшей сейсмической волны (в микронах), записанной стандартным сейсмографом — сейсмографом Вуда — Андерсона — на расстоянии 100 км от эпицентра землетрясения».

Это определение было в дальнейшем расширено таким образом, что для установления магнитуды стало возможно использовать любой калиброванный сейсмограф и на любом расстоянии. Шкала магнитуд не имеет ограничений ни сверху, ни снизу, а увеличение магнитуды на единицу соответствует десятикратному увеличению амплитуды волны, записанной сейсмографом.

Сейсмическая *энергия*, выделяющаяся в очаге землетрясения, — это совсем не то, что энергия сотрясений на поверхности, но знание величины сейсмической энергии также важно для суждения о разрушительной силе и об опасности землетрясений. Возрастание магнитуды на единицу соответствует увеличению энергии, выделяющейся в виде сейсмических волн, в 30 раз. Таким образом, энергия землетрясения с магнитудой 8,6, например Аляскинского землетрясения 1964 г., превышает энергию землетрясения, имеющего магнитуду 4,3, не вдвое, а почти в миллион раз! [Очевидно, здесь неточность: надо было сказать не «почти в миллион раз», а «более чем в 2 миллиона раз». — *Перев.*].

Сильнейшие из инструментально записанных землетрясений (в Колумбии и Эквадоре 31 января 1906 г. и в Японии 2 марта 1933 г.) имели магнитуду около 8,9. Ввиду того что горные породы могут испытывать такую сильную деформацию только перед самым разрушением, такая магнитуда близка к тому пределу, который может быть достигнут при развитии тектонических процессов в недрах Земли. Что касается нижней части шкалы магнитуд, то наиболее чувствительные современные сейсмографы могут записывать землетрясения с магнитудой ниже нуля. Самые слабые землетрясения, которые может ощутить человек, имеют магнитуду около 2.

Между магнитудой землетрясения и его интенсивностью существует только грубая корреляция<sup>1</sup>. Оказывается, например, что землетрясение с магнитудой 5 грубо соответствует землетрясению, имеющему вблизи очага интенсивность VI—VII баллов по шкале ММ (табл. 1.1.), тогда как мелкофокусное землетрясение с большой магнитудой проявляется с максимальной интенсивностью *на большой площади*, как это было в 1906 г. в Калифорнии и в 1964 г. на Аляске (фиг. 1.2).

Наиболее современные каталоги землетрясений земного шара показывают, что каждый год происходит от 18 тыс. до 22 тыс. нормальных (мелкофокусных) землетрясений с магнитудой 2,5 и выше. К счастью, только небольшая часть из этого удивительно большого числа землетрясений создает ту или иную геологическую опасность (см. приложение А).

В последнее время вошел в моду другой теоретический параметр, используемый для измерения силы землетрясения. Если считать, что землетрясение возникает в результате мгновенной релаксации пары сил в упругих породах верхних оболочек Земли (допустим, посредством смещения по разрыву), то, как и в механике, полный момент этих сил — это величина, измеряемая в единицах площади. *Сейсмический момент* определяется как площадь поверхности разрыва, по которому произошло смещение, умноженная на величину этого смещения и на жесткость пород. Сейсмический момент сильнейшего землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. был равен примерно  $10^{28}$  дин·см, а сейсмический момент землетрясения Сан-Фернандо (1971 г.) составил почти  $10^{26}$  дин·см.

**Землетрясения на краях и внутри плит.** Движение плит, образующих поверхность Земли (фиг. 1.1), дает объяснение многому из того, что связано с сейсмичностью Земли. Столкновение

---

<sup>1</sup> Советскими сейсмологами установлено, что интенсивность землетрясения зависит от расстояния до очага следующим образом: при увеличении глубины очага или расстояния в 2 раза интенсивность уменьшается примерно на 1 балл. — *Прим. ред.*

соседних литосферных плит, разрушение плоскопараллельной плиты при ее погружении в *зону субдукции* под островными дугами (фиг. 1.4) и раздвижение вдоль срединно-океанических хребтов — все эти процессы, происходящие на краях плит, связаны, вероятно, со значительными упругими деформациями и дроблением пород земной коры. Поэтому землетрясения, возникающие в этих тектонически активных пограничных районах, мы называем *краевыми землетрясениями*. Чрезвычайно разрушительные мелкофокусные землетрясения Чили, Перу, восточной части Карибского региона, Центральной Америки, южной Мексики, Калифорнии, южной Аляски, Алеутских и Курильских островов, Японии, Тайваня, Филиппин, Индонезии, Новой Зеландии, Альпийско-Кавказско-Гималайского пояса — все они относятся к этому типу.

Когда удастся лучше понять механику движения литосферных плит, можно будет давать долгосрочные прогнозы возникновения краевых землетрясений. Например, многие плиты движутся к зонам субдукции со скоростью 2—5 см/год. Следовательно, в активных дугах, таких, как Алеутские или Японские острова, изучение истории возникновения сильных землетрясений может указать площади, где надо ожидать усиления сейсмической активности.

Концепция тектоники плит важна для общего понимания землетрясений и вулканов, но она не дает полной картины, потому что сильнейшие, опустошительные землетрясения иногда происходят и внутри континентальных областей, вдали от краев плит. Эти *внутриплитовые*, или *внутренние*, землетрясения отмечаются почти на всех континентах. В частности, в США наибольшую известность получила крупная серия землетрясений, происходивших в 1811—1812 гг. в районе Нью-Мадрида (штат Миссури) в долине реки Миссисипи. Другая важная группа очагов, едва ли связанных с краями современных плит, располагается в северном Китае (см. ниже в этом же разделе).

Австралийская плита (фиг. 1.1) часто считается в целом почти асейсмичной, но землетрясения происходят и на ней, особенно в зоне, идущей от залива Спенсер (на юге) на север, к точке с координатами 25,5° ю. ш., 137,0° в. д. Между 1938 и 1941 гг. на краю докембрийского щита Западной Австралии отмечены четыре землетрясения умеренной силы, причем крупнейшее из них, 27 июня 1941 г., имело магнитуду 6,75. К счастью, район был слабо населен. Другой пример землетрясения на краю Австралийского щита — разрушительный толчок 14 октября 1968 г. в Мекеринге, на крайнем юго-западе континента, недалеко от Перта. Магнитуда землетрясения 6,8. Это единственное из австралийских землетрясений, при котором определенно образовались разрывы на поверхности. Возникший разрыв



имел дугообразную форму и был связан со сжатием; вогнутая сторона была обращена на восток. Длина разрыва составила около 32 км, величина поднятия в восточной части 1,5 м.

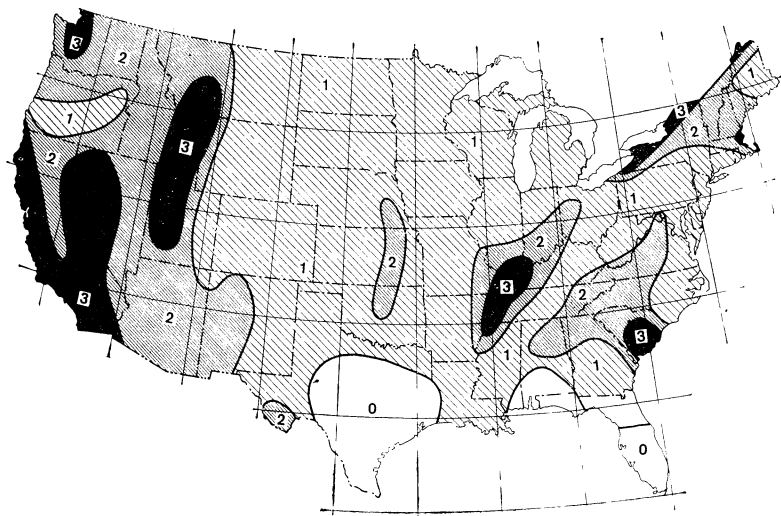
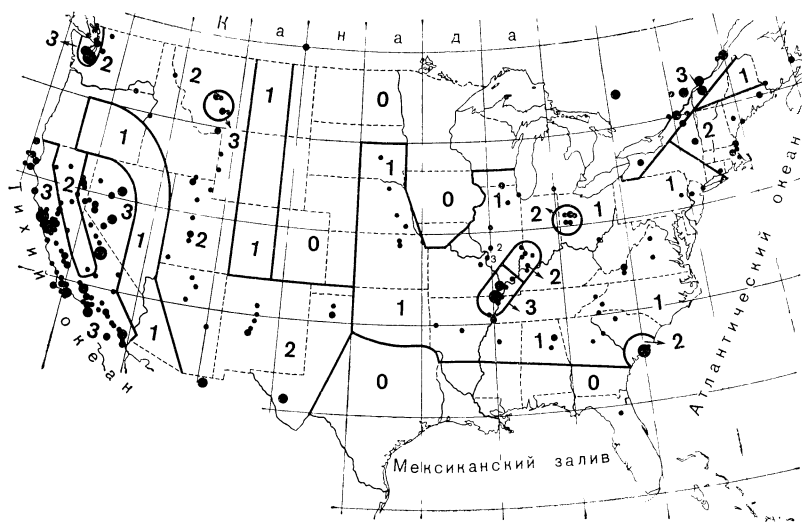
Такие крупные проявления сейсмичности во внутренних областях литосферных плит указывают на то, что плиты нельзя считать жесткими и что в них развиваются внутренние нарушения. Предсказание внутренних землетрясений и объяснение причин их возникновения представляет собой самостоятельную и более трудную задачу, чем в случае краевых землетрясений.

**Землетрясения в США.** Землетрясения в США возникают очень неравномерно как во времени, так и в пространстве (фиг. 1.5); исторические сведения имеются с 1638 г. Перечень некоторых значительных землетрясений дан в приложении Б.

Одно из самых ранних важных землетрясений произошло в районе Три-Риверс (севернее Квебека) в низовьях реки Святого Лаврентия 5 февраля 1663 г. Некоторые сейсмологи, на основе сообщений того времени, оценивают его максимальную интенсивность в X баллов (по шкале ММ). Современники наблюдали крупные горные обвалы и изменения водопадов. Печные трубы развалились на очень большой площади, вплоть до залива Массачусетс.

Это землетрясение, происшедшее более 300 лет назад, и сейчас имеет важное значение для оценки сейсмического риска в северо-восточных районах США и в соседних провинциях Канады. Предполагается, что источником энергии деформации в этой области является реакция земной коры на снятие нагрузки после оледенения, закончившегося около 10 тыс. лет назад. Мы уже привыкли рисовать, главным образом на основе землетрясения 1663 г., зону высокого сейсмического риска, проходящую от Великих озер вдоль реки Святого Лаврентия (зона 3 на фиг. 1.5, *внизу*, ср. с фиг. 1.11). Результаты проведенных здесь сейсмологических исследований заставят, возможно, изменить эти контуры. В настоящее время к юго-западу от Квебека обнаружен асейсмичный участок, ограниченный инструментально установленными скоплениями эпицентров, образующими зону, которая идет *под прямым углом* к реке Святого Лаврентия между Оттавой и Монреалем и протягивается от района, находящегося северо-западнее Оттавы, к Бостону. Северо-западное простирание этой зоны согласуется с канадской картой сейсмического районирования (фиг. 1.11), но не согласуется с фиг. 1.5.

Для западной части США характерна самая большая во всей стране, за исключением Аляски, сейсмическая активность. Вдоль краевой зоны Тихого океана, по разлому Сан-Андреас и сопровождающим его нарушениям, проводят северо-восточную границу Тихоокеанской плиты и линию соединения разрастаю-



Фиг. 1.5. Два вида карт сейсмического риска для территории США.

*Вверху* — карта, составленная Береговой и Геодезической службой США (вариант 1949 г.). Точками показаны эпицентры некоторых крупнейших исторических землетрясений. *Внизу* — измененный, усовершенствованный вариант, составленный С. Т. Алгермиссеном (Национальная океанографическая служба США) в 1969 г.

щейся литосферы Калифорнийского залива с литосферой, разрастающейся от хребта Горда, который расположен в океане у берегов северной Калифорнии (фиг. 1.1).

Исторические сведения имеются примерно с 1800 г., причем первые записи сделаны францисканскими миссионерами. В 1812 году, который называли «годом землетрясений», два отдельных толчка разрушили церкви в Сан-Хуан-Капистрано и в Пурисиме. В 1836 и 1838 гг. крупные землетрясения произошли вблизи Сан-Франциско, а при сильном землетрясении 9 января 1857 г. у Форт-Техона (центральная Калифорния) отмечена подвижка по разлому Сан-Андреас. 21 октября 1868 г. произошло сильное землетрясение, сопровождавшееся подвижкой по разлому Хейвард, отходящему к северу от разлома Сан-Андреас в окрестностях Холлистера.

Калифорнийское землетрясение 18 апреля 1906 г. упоминается в этой книге много раз. В штате Калифорния была учреждена специальная Комиссия по землетрясениям под председательством Эндрю Лоусона; доклад этой комиссии представляет собой классический пример изучения конкретного землетрясения. К сожалению, материалы инженерных исследований не были включены в этот доклад, а были опубликованы отдельно. Эпицентр землетрясения располагался на разломе Сан-Андреас, чуть западнее пролива Золотые Ворота. Магнитуда равнялась 8,25; площадь, на которой ощущалось землетрясение, составила 780 тыс. км<sup>2</sup> — не так уж много для землетрясения такой магнитуды. К счастью, погибло немного людей, всего около 500 человек. Наибольший ущерб был нанесен сильнейшим пожаром, возникшим в Сан-Франциско после землетрясения. Огромное значение имела разработка Ридом теории происхождения землетрясения, получившей название *теории упругой отдачи*.

В докладе комиссии Лоусона сказано, что причиной землетрясения был «внезапный разрыв земной коры вдоль линии (или линий), протягивающейся почти по прямой от окрестностей Пойнт-Делгада до некоторой точки в графстве Сан-Бенито, недалеко от Сан-Хуана, приблизительно на 430 км. На участке длиной 300 км, от Пойнт-Арена до Сан-Хуана, трещина, образовавшаяся в результате этого разрыва, оказалась практически непрерывной. Дальше Пойнт-Арена эта трещина уходит в море, так что вопрос о том, соединяется ли она с таким же нарушением у Пойнт-Делгада, остается открытым».

Что касается этого последнего замечания, то полученные недавно океанографические данные показывают, что разлом Сан-Андреас продолжается как подбодная структура от Пойнт-Арена до Пойнт-Делгада, следовательно, можно заключить, что от Сан-Хуан-Баутиста до точки у мыса Мендосино разрыв был непрерывным (см. фиг. 1.3).

Хотя в пределах Центральной долины (долины Сакраменто) и Сьерра-Невады не было, согласно историческим данным, очагов значительных землетрясений, все постройки этого района испытывают заметные колебания при крупных землетрясениях, возникающих в системе разлома Сан-Андреас, а также восточнее, в долине Оуэнс и вдоль уступа Хони-Лейк и долины Мохок в Провинции бассейнов и хребтов. Более ста лет прошло уже после землетрясения 26 марта 1872 г. в долине Оуэнс, возможно сильнейшего из исторических землетрясений Калифорнии. Тогда в этой долине на участке длиной 150 км возникли многочисленные разрывные трещины. Ширина нарушенной зоны колебалась от менее 1 км до 15 км. В геологическом понимании сто лет — это всего лишь короткое мгновение, и даже сегодня любознательные путешественники могут хорошо рассмотреть крупнейший разрыв, идущий от Хейви к Биг-Пайну. Ощутимые колебания распространились на восток вплоть до Солт-Лейк-Сити; по меньшей мере 25 человек было убито, главным образом в результате разрушения домов из необожженного кирпича в Лон-Пайне.

Штат Орегон в целом асейсмичен, однако в соседнем штате Вашингтон, в районе залива Пьюджет-Саунд, землетрясения с умеренно глубокими очагами причиняли материальный ущерб и уносили человеческие жизни. В штатах Невада, Юта и Монтана отмечались землетрясения умеренной силы, с которыми, по историческим данным, были связаны разрывы на поверхности.

В центральной части США в отличие от западных районов зоны активных разломов выражены плохо. Нет определенных данных и об образовании разрывов на поверхности при каком-либо землетрясении в центральных или восточных районах США.

Один из наиболее сейсмоактивных районов на востоке США — это верхняя (северная) часть прогиба Миссисипи, включая юго-западные районы штата Кентукки, юг Иллинойса и юго-восток штата Миссури. Прогибание (возможно, вызванное сжатием) развивалось здесь уже с мелового периода. Сложные системы разрывов обнаружены у северного замыкания прогиба, вблизи Нью-Мадрида, в районе землетрясений 1811—1812 гг. (XII баллов по шкале ММ). Интересно, что если бы заселение Северной Америки выходцами из Европы началось после 1812 г., то даже район Нью-Мадрида считался бы слабо сейсмичным. Трудно было бы не прийти к выводу, что нечастые землетрясения в центре и на востоке США указывают на меньший по сравнению с Калифорнией сейсмический риск. Как показывает фиг. 1.5, специалисты делают сейчас другой вывод.

Помимо зоны Нью-Мадрида и северо-восточного района обычно указывают еще на одну область высокого сейсмического риска — на восточном побережье (см. фиг. 1.5). 31 августа

1886 г. вблизи Чарлстона (штат Южная Каролина) произошло землетрясение с интенсивностью IX—X баллов по шкале ММ, которое вызвало значительные разрушения (большая часть города построена на насыпных грунтах) и привело к гибели примерно 60 человек. Оно ощущалось вплоть до Нью-Йорка и Бостона, а также на Кубе и Бермудских островах. Разрывов на поверхности, которые были бы связаны с этим землетрясением, не найдено.

Недавно удалось найти объяснение того, почему землетрясения, возникающие в центральных и восточных районах США, ощущаются на таком большом расстоянии от очага. Сейсмограммы современных землетрясений Иллинойса показывают, что сейсмические волны, распространяющиеся в земной коре восточной части США, затухают не так резко, как в Калифорнии. Таким образом, землетрясение той же магнитуды должно здесь ощущаться на большем расстоянии, чем в Калифорнии. Это открытие позволяет заодно предположить, что магнитуда некоторых исторических восточных землетрясений преувеличена и, возможно, что сильнейшее из Нью-Мадридских землетрясений имело магнитуду только около 7,6.

**Землетрясения в Китае.** Разыскивая сведения о землетрясениях в Древнем Китае, Академия наук КНР провела изучение древних хроник и литературных произведений, храмовых летописей и других источников, относящихся к периодам разных династий. Самое древнее из упоминаемых землетрясений произошло в 1100 г. до н. э., однако достаточно полными можно считать сведения только примерно с 780 г. до н. э. (период северокитайской династии Чжоу).

Из сохранившихся источников можно извлечь материал для оценки распределения интенсивности многих древних землетрясений. Например, землетрясение Саньхэ (сильнейшее из известных в районе Пекина)<sup>1</sup>, происшедшее 2 сентября 1679 г., упомянуто в хрониках 121 города, причем записаны сведения о повреждении зданий, о трещинах в почве и о других явлениях в зоне очага, а также сведения о сотрясениях, полученные из отдаленных мест. По таким данным можно составить карту изосейст и, сравнив ее с картами изосейст более поздних землетрясений, грубо оценить магнитуду землетрясения 1679 г. — ее можно считать равной приблизительно 8.

Землетрясение, самое губительное в мире по числу человеческих жертв, произошло 23 января 1556 г. в провинции Шэньси,

<sup>1</sup> В настоящее время Саньхэ — город в провинции Хэбэй, в 30 км к востоку от Пекина и примерно в 100 км к западу от Таншаня, наиболее сильно пострадавшего при катастрофических землетрясениях 27—28 июля 1976 г. Вероятно, очаги землетрясений 1679 и 1976 гг. располагаются достаточно близко друг к другу. — *Прим. перев.*

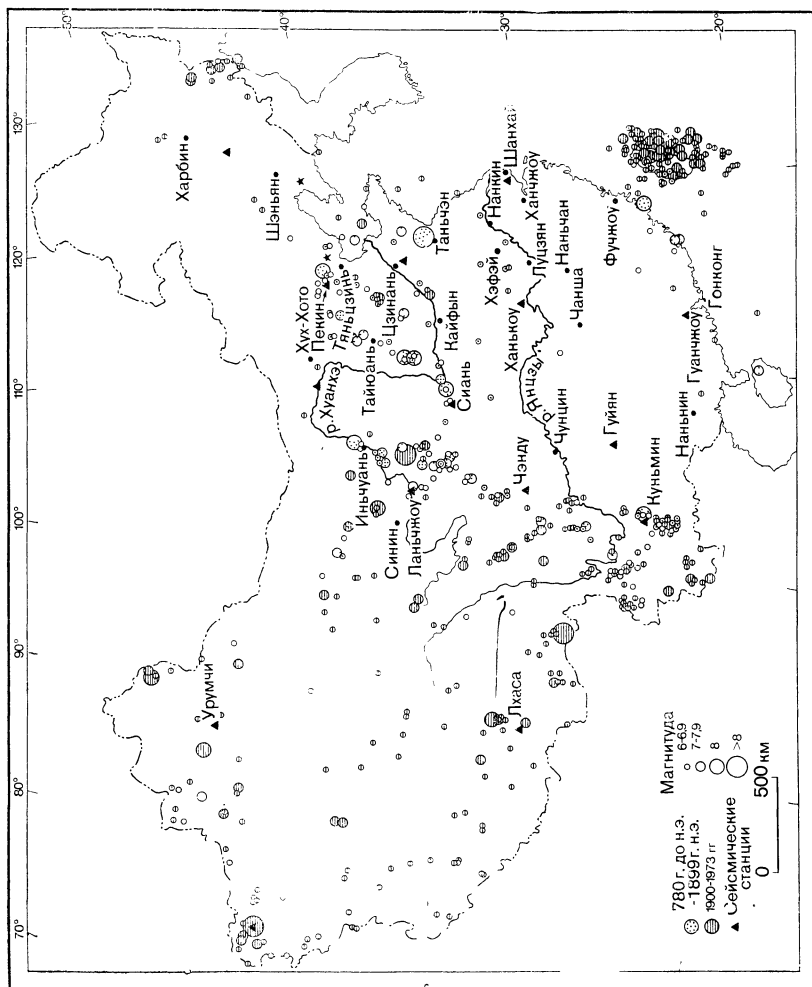
у города Сиань. Сохранились хроники, согласно которым при этом землетрясении от разных причин погибло около 830 тыс. человек. Такая дань смерти настолько велика, что невольно напрашивается сомнение в достоверности этой оценки<sup>1</sup>. Объяснение состоит в том, что землетрясение разразилось в густонаселенном районе, где крестьяне жили главным образом в пещерах на склонах лёссовых холмов (*лёсс* — горная порода, образующая мощные пласты, которые возникают при уплотнении принесенной ветром пыли; см. раздел 4.6).

Землетрясение 1556 г. произошло в 5 часов утра, когда все спали в своих жилищах, которые и обрушились на них. Кроме того, отчаяние, голод и болезни, неизбежные после такой катастрофы, несомненно, привели к гибели большого числа людей.

Сейсмичность Китая (начиная с 780 г. до н. э.) показана на фиг. 1.6, которая построена по цветной карте, любезно предоставленной автору Геофизическим институтом Академии наук КНР, Пекин. Выделяются три особенности этой карты: 1) высокосейсмичная провинция Тайвань ассоциируется с зоной субдукции (см. фиг. 1.1); 2) юго-восточная часть страны: провинции Гуандун, Фуцзянь, Хунань и Цзянси — сравнительно малосейсмична, и опасность землетрясений здесь невелика; 3) крупные, разрушительные землетрясения (внутриплитовые) происходят вдоль подножия Западных гор, протягивающихся от Гималаев, вдоль края Тибетского плато, вплоть до окрестностей Пекина. Зона дробления проходит почти в меридиональном направлении по долготе  $103^\circ$  от Куньмина в район восточнее Ланьчжоу, а затем, на широте  $35^\circ$ , отходит на восток — вдоль северного края хребта Циньлин, мимо Сианя. Затем зона землетрясений разделяется на две ветви северного простиранья. Одна из них идет вдоль «*геосинклинали*» Шаньси (под «геосинклиналью» здесь понимается прогиб длиной в сотни километров, в котором накопился осадочный материал мощностью в несколько тысяч метров), восточнее хребта Хошань, через Тайюань и затем на северо-восток в район западнее Пекина. Другая ветвь проходит вдоль восточного склона хребта Тайханшань, по западному краю Великой Китайской равнины и достигает по меньшей мере  $40^\circ$  с. ш. В 1966 г. в этой зоне, вблизи Синтая (около 200 км к северо-западу от Цзинаня; см. фиг. 1.6), была отмечена необычная цепь умеренных по силе землетрясений, крупнейшее из которых, с магнитудой 7,2, произошло 22 марта. Отличительной чертой этого землетрясения было широко развитое разжижение почвы, повреждение дамб и каналов.

---

<sup>1</sup> Согласно сообщениям иностранных информационных агентств, в результате землетрясений 27—28 июля 1976 г. в провинции Хэбэй погибло 650 тыс. и ранено более 800 тыс. человек. — *Прим. ред.*



На основе исторических сведений о сейсмичности Китая были построены карты сейсмического риска и разработаны нормы сейсмостойкого строительства. К 1973 г. в разных сейсмичных областях Китая было установлено около 60 акселерометров для записи сильных землетрясений (для сравнения: в США — около 1000, в Японии — 700, в Новой Зеландии — 90), так что в течение будущих десятилетий с помощью этих приборов можно будет получить важные сведения о сильных колебаниях грунта.

### 1.3. Причины землетрясений

**Тектонические землетрясения.** Древние греки считали вполне естественным связывать извержения эгейских вулканов с землетрясениями Средиземноморья. Со временем выяснилось, что большинство разрушительных землетрясений на самом деле вызвано не вулканической деятельностью, а связано с деформацией самой внешней оболочки Земли, особенно земной коры, имеющей в континентальных областях толщину около 35 км. Такие землетрясения называются *тектоническими*. Они возникают при быстром высвобождении энергии деформации, накопленной в упругих горных породах.

Тектонические землетрясения часто происходят в районах с большими перепадами высот: например, вдоль разлома Боконо в Венесуэльских Андах, в Гиндукуше, в Гималаях и точно так же вдоль высоких подводных хребтов в океанах (фиг. 1.1). Кроме того, как указано в разделе 1.2, землетрясения происходят вдоль глубоководных океанических желобов, ограничивающих тектонические плиты.

Для полноты картины заметим, что многие тектонические землетрясения происходят и там, где нет высоких гор и больших перепадов рельефа. Примеры этого — внутриплитовые Нью-Мадридские землетрясения 1811—1812 гг. в центральной части США и землетрясение Дашти-Баяз (на северо-востоке Ирана) 31 августа 1968 г.

**Теория упругой отдачи.** Полевые наблюдения, проведенные после Калифорнийского землетрясения 1906 г., ясно показали, что деформированные массивы пород, располагающиеся по западную сторону разлома Сан-Андреас, сдвинулись относительно пород восточного блока на северо-запад. Смещение соседних точек по разлому достигло максимальной величины 6 м вблизи Олима (район Пойнт-Рейс).

Рид изучил результаты триангуляционных съемок, выполненных Береговой и Геодезической службой США в районе, который был пересечен разрывом, возникшим в 1906 г. Эти съемки, сделанные в 1851—1865, 1874—1892 гг. и сразу же после



землетрясения, показали, что 1) изменение *высот* вдоль разлома Сан-Андреас было небольшим и несистематическим; 2) возникли значительные *горизонтальные* смещения, параллельные линии разлома; 3) отдаленные точки по разные стороны разлома испытали за 50-летний период относительное смещение на 3,2 м, причем западный блок сместился к северу.

Основываясь на геологических и геодезических данных, а также на результатах своих собственных лабораторных экспериментов, Рид выдвинул для объяснения механизма землетрясений *теорию упругой отдачи*. Она предполагает, что земная кора во многих местах медленно смещается под действием глубинных сил. Дифференцированные движения вызывают упругие деформации, которые достигают таких величин, что породы уже не могут выдержать. Тогда возникает разрыв (скол), и деформированный блок породы мгновенно возвращается по нему под действием упругих напряжений в положение, при котором деформация частично или полностью снимается. Эта теория механизма землетрясений была проверена при разных обстоятельствах и потребовала только небольших дополнений.

Деформация, медленно накапливающаяся в коре, создает запас упругой энергии (как, например, в сжатой пружине), и в каком-то участке деформированной области (в *фокальной точке* землетрясения) происходит внезапная подвижка по образовавшемуся разрыву, которая распространяется затем во все стороны по поверхности разрыва в виде ряда беспорядочных дислокаций, обусловленных неодинаковой прочностью пород на пути их распространения. Это неравномерное продвижение дислокаций приводит к возникновению высокочастотных волн, проходящих через Землю и вызывающих сейсмические колебания, которые и производят разрушения на поверхности. Характерная скорость распространения разрыва равна 2—3 км/с, а нерегулярные скачки этого процесса происходят в течение долей секунды. Сотрясения грунта вдали от разрыва включают в себя все виды волновых колебаний (продольные, поперечные и поверхностные волны) с разными частотами и амплитудами.

**Типы разрывов.** Смещение по разрыву может при землетрясении быть полностью горизонтальным, как вдоль разлома Сан-Андреас при Сан-Францисском землетрясении 1906 г.; но часто происходят и крупные вертикальные подвижки, например такие, как при землетрясении Дикси-Валли (Невада) в 1954 г. (фото 1.3) и при землетрясении Сан-Фернандо (Калифорния, 1971 г.), где в некоторых местах по разломам образовались уступы высотой 3 м.

Классификация разрывов проста и основана только на их геометрии и на направлении относительного смещения. Различ-

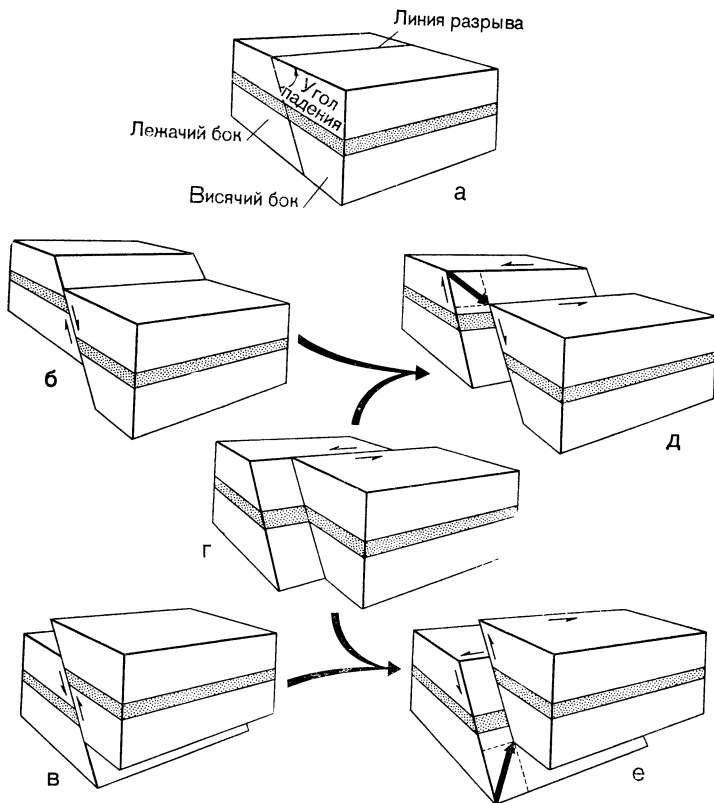


Фото 1.3. Уступ сброса (высота 4,5 м), возникший в результате землетрясения Дикси-Валли — Фэрвью-Пик (Невада) в декабре 1954 г.

ные типы разрывов схематически показаны на фиг. 1.7. *Падение* (угол падения) разрыва — это угол, образуемый его поверхностью с горизонтальной плоскостью, а его *простираение* — это направление линии разрыва, выходящего на земную поверхность, относительно направления на север.

*Сдвигами* называют разрывы, по которым горные породы смещаются латерально, параллельно простираению этих разрывов. Если наблюдатель, находящийся на одной стороне разрыва, видит, что другая сторона движется слева направо, то такой разрыв называется *правосторонним* (или *правым*) *сдвигом*. Подобным же образом определяется *левосторонний* (*левый*) *сдвиг*.

*Сбросы, взбросы и надвиги* (разрывы со смещением по падению) — это разрывы, в которых движение происходит в целом параллельно направлению падения разрыва; таким образом, смещение имеет вертикальную составляющую. *Сбросом* называют разрыв, при котором горные породы, находящиеся над его наклонной поверхностью (висячий бок), смещаются вниз относительно подстилающего массива (лежачий бок). К этой же категории относят и разрывы с почти вертикальным смещением. *Взбросом* называется разрыв, при котором вышележащий блок



Фиг. 1.7. Схемы разных типов разрывов.

*а* — названия различных элементов разрыва, *б* — сброс, *в* — взброс; *г* — левосторонний (левый) сдвиг; *д* — левосторонний сбросо-сдвиг; *е* — левосторонний взбросо-сдвиг.

смещается по наклонной поверхности разрыва вверх относительно нижнего блока. *Надвиги* близки к взбросам; этим термином обычно называют только пологие разрывы.

Характер геологической опасности меняется в зависимости от типа разрыва. Главный результат смещений виден на фиг. 1.7. Наиболее узкая зона нарушений обычно бывает вдоль сдвигов, тогда как при смещениях по разрывам, ограничивающим грабены, или при образовании надвигов и сбросов подвижки могут возникать в сравнительно широкой зоне.

В результате полевых исследований были установлены случаи, когда трещины и разрывы, пересекающие горные породы на глубине, не проникают в верхнюю часть осадочного чехла. Выветрелые горные породы и почвенный слой иногда поглоща-

ют дифференциальные смещения, наглядным примером чего служат явления, вызванные Аляскинским землетрясением 1964 г. По разлому Паттон-Бей произошла взбросовая подвижка, и на уровне пляжа в коренных породах, перекрытых гравийными отложениями, возник эскарп высотой 2,5 м, но наверху, на береговом уступе, пересеченном этим разрывом, никакой заметной подвижки не было. Таким образом, в выветрелых породах, на расстоянии в 20 м, было поглощено более 2 м общего смещения.

И все-таки разрывные смещения часто передаются через неконсолидированные отложения мощностью в сотни метров; обнаружено, что в мягких породах бывает даже и некоторое увеличение амплитуды смещения. Такие противоречия привели к необходимости наблюдений в траншеях, которые прорывают поперек линий старых разрывов, чтобы выяснить, насколько типичны величины смещений, измеряемых на поверхности. Наблюдения, продолжавшиеся более десятилетия, показали, что смещение в зонах разрыва происходит не только в виде резких скачков при землетрясениях, но и путем медленного проскальзывания одного блока разрыва по другому. Это явление называют *тектонической ползучестью* (тектоническим *крипом*). Скорость крипа может быть от 1—2 мм в год примерно до 1 см в год.

Самые интересные данные получены в зоне разлома Сан-Андреас, близ города Холлистер, Калифорния. Построенные там винные погреба оказались на участке, пересеченном этим разломом, и испытывают медленную деформацию. В самом же городе наблюдаются смещения тротуаров и мостовых, перекося домов и изгородей. По разлому Хейвард (на восточном берегу залива Сан-Франциско) происходит деформация и даже отмечаются серьезные повреждения (в результате медленного относительного смещения) многих сооружений, в том числе крупного водопроводного туннеля, дренажной системы и железнодорожных путей, пересекающих этот район.

Очевидно, ползучесть проявляется тогда, когда мягкий материал, образовавшийся вдоль разрыва, распространяется на большую глубину. Этот материал состоит из тонко растертой породы, обычно измененной до состояния глины (глинка трения); он имеет малую прочность и часто насыщен водой, в результате чего обладает низким коэффициентом эффективного трения. Ниже зоны развития «глинки трения» располагаются более жесткие породы, которые, по-видимому, крепко спаяны по плоскости разрыва, и в них накапливается энергия упругой деформации. Однако вблизи дневной поверхности между соседними блоками прочных пород попадает глинистый материал и происходит более или менее непрерывное скольжение.

Последние геодезические исследования нарастания деформации вдоль системы разлома Сан-Андреас в районах центральной

и северой Калифорнии (см. фиг. 1.3) показали, что в настоящее время там происходит относительное правостороннее движение со скоростью около 3,2 см в год. Особо точные измерения горизонтального смещения сделаны между высотами, находящимися по разные стороны разлома, с помощью геодезических приборов. Если вариации температуры воздуха вдоль визирной линии измеряются с помощью самолета или вертолета, то точность измерений оказывается лучше чем 1 см на 10 км, или  $10^{-6}$ . В центральной части Береговых хребтов наибольшие смещения сосредоточены на отрезке разлома длиной несколько десятков километров. Севернее, в направлении залива Сан-Франциско, движение приурочено к системе трех разломов: Сан-Андреас, Хейвард и Калаверас, и ширина этого участка составляет примерно 20 км, тогда как к северу от залива Сан-Франциско упругие деформации захватывают полосу шириной более 40 км. Некоторая часть этой деформации, несомненно, отражается в медленном скольжении по разрыву, но, согласно упомянутой выше модели, нельзя быть уверенным в том, что там, где происходит медленное скольжение, упругая деформация не накапливается в более прочных породах коры, залегающих на глубинах 5—20 км. Таким образом, разломы, по которым проявляется ползучесть, нельзя в настоящее время считать зонами малого сейсмического риска.

Достаточно беглого взгляда на любую детальную геологическую карту, чтобы увидеть, что большинство областей земной коры рассечено множеством разрывов. Некоторые из них невелики, и их можно проследить только на небольшом расстоянии, а дальше они теряются среди простых трещин в породах. Другие в течение длительного времени были неактивны. Полевые геологические работы показали, что по многим протяженным древним разрывам (например, по разлому Мелонес в Калифорнии или по разлому Ньюарк в Аппалачах) движений не было в течение миллионов лет. В результате различных процессов разрывы были залечены, и породы в зонах этих разрывов скреплены, вероятно, так же прочно, как и за пределами этих зон. Следовательно, известные разрывы в своем большинстве не создают геологической опасности.

Как и в случае вулканов, бывает трудно определить, является ли тот или иной разрыв *активным*, *неактивным* или, так сказать, *дремлющим*. Например, после крупного землетрясения 1857 г. в районе Форт-Техона не наблюдается свежих подвижек по разлому Сан-Андреас. По разлому Мертвого моря (в Палестине), который когда-то был, согласно Библии и историческим данным, активным генератором землетрясений, не образовалось новых нарушений и не возникало крупных землетрясений вот уже много сотен лет. Не вдаваясь в детали, актив-

ный разрыв можно определить как разрыв, по которому в недавнем прошлом происходило движение, а геологические и сейсмологические данные указывают на то, что оно может возобновиться и в ближайшем будущем. «Недавнее прошлое» — это исторический период и предшествующая ему эпоха, включающая по меньшей мере весь *голоцен*, т. е. примерно 10 тыс. лет.

Показателем активности разрыва могут быть слабые землетрясения и даже *микроземлетрясения* (с магнитудой меньше 2), но их отсутствие не позволяет при современном уровне знаний говорить о неактивности разрыва. Едва ли когда-нибудь бывает ясно, указывают микроземлетрясения на то, что вдоль разрыва накопилась деформация, достаточная для возникновения в будущем крупного землетрясения, или же это просто отзвуки прежних деформаций.

В последние годы стало легче установить, действительно ли происходит по разрыву движение, и определить, когда оно началось. Для этого проводятся тщательные полевые наблюдения, прокладываются траншеи и выполняются радиоуглеродные определения возраста найденных вдоль разрыва обугленных окаменелостей, используются геодезические измерения и панорамная аэрофотосъемка.

**Дилатансия в породах земной коры.** В земной коре на глубинах около 5 км литостатическое давление, создаваемое весом вышележащих пород, уже примерно равно прочности нетрещиноватых образцов типичных горных пород при температурах (около 500°С) и давлениях, соответствующих этим глубинам. Если не учитывать другие факторы, то невозможно допустить вероятность таких касательных напряжений, которые вызвали бы внезапный хрупкий скол и последующее фрикционное скольжение по трещине; вместо этого порода должна деформироваться пластически. Эту проблему удалось обойти, когда было обнаружено, что присутствие воды создает механизм для мгновенного разрушения пород путем понижения эффективного трения вдоль трещин.

В начале 1960-х годов советские сейсмологи, изучавшие землетрясения в районе Гарма, сообщили, что перед значительными землетрясениями скорости волн  $P$  в коре сначала уменьшаются, а потом увеличиваются. Такие же данные были недавно получены в ряде районов США.

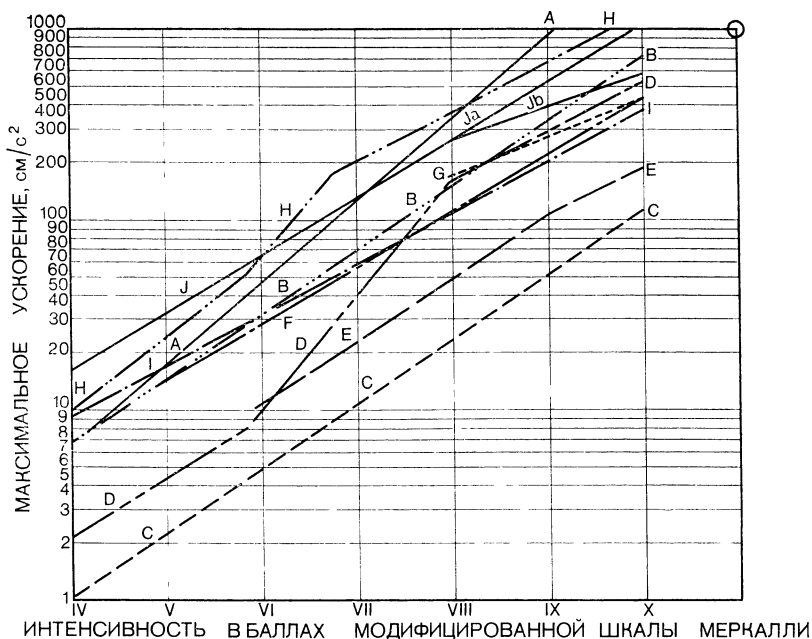
Исследования времени прохождения волн  $P$  и  $S$  перед землетрясением Сан-Фернандо в 1971 г. (см. раздел 1.4) показали, что за 4 года до землетрясения отношение скоростей продольных и поперечных волн довольно резко уменьшилось на 10% своей средней величины 1,75. Затем величина этого отношения постепенно возросла до значений, близких к нормальным. Одно

из возможных объяснений этого дает модель *дилатансии*. Логично предположить, что, когда породы коры деформируются, в них местами развиваются трещины, и объем пород возрастает, т. е. происходит их расширение (дилатансия). Образование трещин может происходить так быстро, что подземные воды не успевают проникнуть в расширившийся блок и заполнить трещины, так что они заполняются газом. Связанное с этим понижение порового давления ведет к уменьшению скорости главным образом волн  $P$ . Последующая диффузия подземных вод в сухие трещины увеличивает поровое давление и обеспечивает «смазку» стенок трещин, при этом скорость волн  $P$  должна снова возрастать.

Полная теоретическая картина возникновения землетрясений путем дилатансии еще не ясна, но эта гипотеза привлекательна тем, что она согласуется с отмечавшимися перед некоторыми землетрясениями изменениями уровня земной поверхности, электрической проводимости и других физических свойств. Эта гипотеза позволяет при определенных условиях предсказывать землетрясения. Например, измерения скорости продольных волн в окрестностях крупных водохранилищ до и после их наполнения (см. ниже в этом разделе) могут стать более прямым способом, позволяющим уловить приближение критической сейсмической опасности в районах плотин, чем те, которые сейчас имеются.

**Способы прогноза и обуздания землетрясений.** Предсказание землетрясений, как и предсказание фаз Луны, прогноз погоды и других природных явлений — это, несомненно, целая наука. Наибольшую известность получили такие аспекты этой проблемы, как прогноз *места*, прогноз *величины* и прогноз *времени* землетрясения. Для большинства людей прогноз землетрясений ассоциируется только с предсказанием времени их возникновения. С точки зрения уменьшения опасности более важен прогноз величины *сильных колебаний* грунта на каждом конкретном участке (см. раздел 1.5). Этот вид прогноза часто основывается на сопоставлении интенсивности землетрясений (в баллах сейсмической шкалы) с записями ускорений на поверхности грунта (см. фиг. 1.8).

Как указано в разделе 1.2, предсказание того, в каких районах должны возникать землетрясения, в настоящее время осуществляется в основном путем исследования материалов сейсмологических обсерваторий. Поскольку найдены также эмпирические закономерности, связывающие магнитуду землетрясения и длину наблюдаемого разрыва (см. табл. 1.3), можно установить некоторые грубые пределы для силы землетрясений, ожидаемых в том или ином районе.



Фиг. 1.8. Некоторые эмпирические соотношения между интенсивностью (в баллах по шкале ММ) и пиковыми ускорениями колебаний грунта при землетрясениях.

А—по Хершбергеру [17]; В—по Гутенбергу и Рихтеру, 1942 г.; С—по Канкани, 1904 г.; D—по Исимото, 1932 г.; Е—по Саваренскому и Кирносу, 1955 г.; F—по Медведеву и др., 1963 г.; G—из новозеландского законопроекта, H—по Кавасуми, 1951 г.; I—по Корнуэллу; J—по Нейману, 1954 г. Крестиком отмечена точка, относящаяся к характеристикам землетрясения Сан-Фернандо (февраль 1971 г.). [Корреляции, выполненные до 1931 г., относятся, вероятно, к оригинальной шкале Меркалли.—Ред.]

Сделано много попыток найти те признаки, которые предупреждали бы об опасности. В 1975 г. китайские власти, используя, в частности, данные о возросшей сейсмической активности (о форшоках) и о беспокойном поведении животных, провели

Таблица 1.3

Зависимость длины разрыва от магнитуды землетрясения

Магнитуда (по Рихтеру)	Длина разрыва, км	Магнитуда (по Рихтеру)	Длина разрыва, км
5,5	5—10	7,5	60—100
6,0	10—15	8,0	100—200
6,5	15—30	8,5	200—400
7,0	30—60		



эвакуацию населения большой области перед разрушительным землетрясением в Хайчэне. Однако перед катастрофой 1976 г. в Таншане никакого предупреждения сделано не было. В других местах главное внимание уделяется геодезическим данным, например в Калифорнии измерениям деформации земной коры вдоль разлома Сан-Андреас с помощью геодеметров.

Было обнаружено (постфактум), что незадолго до землетрясения в Ниигата (см. раздел 1.4) произошло изменение высоты древней поверхности; если бы это стало известно заранее, такое явление могло послужить указанием на приближающееся землетрясение.

Другая идея основана на обнаружении пространственных и временных перерывов в сейсмической активности внутри тектонически активного региона. В 1973 г. сейсмологи Геологической службы США предсказали, что в течение ближайших шести месяцев по разлому Сан-Андреас южнее Холлистера произойдет землетрясение с магнитудой 4,5. Прогноз был основан на 4 главных ударах землетрясений, которые произошли за 3 года на обоих концах 25-километрового участка разлома Сан-Андреас, оставив нетронутым находящийся в середине этого участка отрезок длиной 6 км, где в этот период землетрясений не было. Предполагалось, что на этом отрезке напряжения продолжают расти, и упругая энергия должна будет высвободиться путем землетрясения. Однако в предсказанные шесть месяцев землетрясение не произошло. Одна из трудностей использования таких методов прогноза — выбор начального момента, с которого следует оценивать среднюю повторяемость землетрясений.

Более перспективный метод основан на теоретических и экспериментальных предположениях, содержащихся в упомянутой ранее теории дилатансии. К счастью, как показывают величины, характеризующие продолжительность цикла дилатансии (табл. 1.4), предсказываемый для наиболее опасных землетря-

**Таблица 1.4**

**Продолжительность предшествующих землетрясениям изменений скорости волн  $P$  и  $S$**

Магнитуда землетрясения	Продолжительность изменений скорости	Магнитуда землетрясения	Продолжительность изменений скорости
2	1 день	5	3 месяца
3	1 неделя	6	1 год
4	1 месяц	7	6 лет

сений интервал времени довольно велик и можно провести дополнительное обследование района.

Часто указывают на то, что, если даже сейсмологи и научатся предсказывать время и магнитуду землетрясения, с точки зрения грозящей опасности останется еще много проблем. Предположим, объявляется, что в течение месяца произойдет (с вероятностью один к двум) разрушительное землетрясение. Какова будет реакция жителей на это? Будет ли приостановлена работа крупных промышленных и торговых предприятий и тем самым нарушится развитие крупных секторов экономики района? Трудности возникают даже при более краткосрочном прогнозе, если работа останавливается до окончания прогнозного срока. Предположим, этот срок истек, а землетрясения не было, кто возьмет на себя ответственность снова открыть школы и возобновить обычную деятельность?

Возможно, когда-нибудь успех принесет некий комплексный подход к проблеме уменьшения сейсмической опасности. Можно ли бороться с землетрясениями и воздействовать на них, как в случаях наводнений или приближения цунами? Явление, случайно отмеченное около Денвера (штат Колорадо), подсказывает некоторую возможность. При закачке сточных вод в глубокую скважину в этом районе начались землетрясения, число которых тесно коррелировалось с количеством закачанной в скважину воды. Возможно, вода понижала трение вдоль разрывов, существовавших вокруг скважины, до такой величины, когда остаточная упругая деформация в коре могла уменьшиться путем резкого смещения; возможно, также, что раздувался водоносный слой и затем происходило выравнивание. Как продолжение этого опыта, сейсмологи Геологической службы США вызвали ряд слабых землетрясений в нефтеносном районе Рейнджли, закачивая там воду в скважины.

Этот эксперимент привел к умозрительному предположению, что можно ограничить силу землетрясений, возникающих вдоль активного разлома, скажем, магнитудой 5 или меньше, намеренно вызывая небольшие подвижки путем накачивания воды в пробуренные в зоне разлома скважины. Можно было бы также ограничить длину возникающего разрыва, разграничивая район «сейсмическими клапанами», для чего надо откачивать из зоны разлома воду, тем самым «запирая» его. Для осуществления этого замысла необходимо лучшее знание скорости и направления движения грунтовых вод, чем это возможно сейчас в большинстве районов.

**Землетрясения от ядерных взрывов.** Как в США, так и в СССР выполняются инженерные работы, для которых используются крупные подземные ядерные взрывы. В США программа,

направленная на то, чтобы заставить энергию атомных взрывов работать на строительство, является частью проекта «Плаушэр» (plowshare — лемех). По этому проекту уже проведены некоторые опытные взрывы, рассчитанные на то, чтобы повысить поступление природного газа путем дробления газоносных пластов. Во время эксперимента, проведенного 10 сентября 1969 г. в графстве Гарфилд (в 70 км к северо-востоку от Гранд-Джанкшен, Колорадо), на глубине 2570 м был произведен подземный ядерный взрыв мощностью 40 килотонн. Была раздроблена пачка переслаивающихся песчаников и сланцев. Через несколько месяцев после взрыва давление на устье скважины возросло в 6 раз, а стоимость дополнительно добытого газа составит, как ожидается, 1,57 млн. долл.

В Советском Союзе в течение ряда лет осуществляется программа крупных работ по снабжению водой прикаспийских территорий. За последние 15 лет уровень грунтовых вод понизился там на 2,5 м; рассчитано, что если не будут приняты защитные меры, то к концу этого столетия произойдет дальнейшее понижение на 1,7 м. Планируется перегородить плотинами реки, текущие на север, и направить их воды на юг. Один канал длиной 112 км предложено проложить с помощью ядерных взрывов. Начиная с 1966 г. отдаленными сейсмическими станциями выделялись волны, приходящие из крупных очагов в районе Каспийского моря. Есть указания, что эти волны вызваны необъявленными подземными ядерными взрывами, производимыми для выполнения этой программы.

Во всех таких случаях использования (при горных работах и в строительстве) ядерных взрывов, сравнимых по производимому эффекту с умеренными землетрясениями, должна быть обеспечена сейсмическая безопасность. Колебания грунта, вызванные подземным взрывом, могут оказаться достаточно сильными, чтобы причинить материальный ущерб. Изучение такой опасности проведено Комиссией по атомной энергии США на испытательном полигоне в Неваде; советские исследователи также опубликовали работы по изучению последствий подземных ядерных взрывов.

**Землетрясения, вызванные наполнением водохранилищ.** До того как в 1935 г. было наполнено водохранилище Мид на реке Колорадо, в районе не отмечалось проявлений сейсмической активности; однако по завершении строительства здесь часто стали возникать слабые землетрясения. Более того, записи местных сейсмических станций, установленных Береговой и Геодезической службами США, показали, что количество толчков довольно хорошо коррелируется с изменениями нагрузки в водохранилище. Впоследствии стали известны еще 10—15 докумен-

тированных случаев (табл. 1.5), когда наполнение водохранилищ было вероятным спусковым механизмом землетрясений. Однако, как показывает табл. 1.5, до сих пор недостаточно ясна тектоническая обстановка, в которой возникают эти землетрясения. Иногда они происходят в известных сейсмических областях, таких, как Кремаста (Греция), а иногда в районах очень низкой сейсмической активности, таких, как озеро Мид (США) или Койна (Индия). В глубинном геологическом строении районов водохранилищ, перечисленных в табл. 1.5, участвуют самые различные образования: от гранитов и метаморфических пород до глинистых сланцев и песчаников. Подвижки в очагах, определяемые для искусственно вызванных землетрясений, имеют характер как сдвигов, так и сбросов и взбросов (фиг. 1.7). Наибольшая нагрузка, когда-либо наложенная искусственно на земную кору, — это водохранилище Кариба на реке Замбези (восточная Африка). Его наполнение началось в декабре 1958 г.; запасы воды превышают 150 км<sup>3</sup>. К сожалению, нет данных о сейсмичности этого района до наполнения водохранилища, но с момента установки сейсмографов в 1961 г. там отмечено за три года более 2000 толчков.

Множество крупных водохранилищ не вызвало в прилегающих районах землетрясений, хотя некоторые плотины построены в тектонически активных областях (например, водохранилище Сан-Луис в Калифорнии). В США к 1973 г. были построены 52 плотины высотой более 100 м, из них 82% находятся в сейсмических зонах 2 и 3 (фиг. 1.5), но только в окрестностях 18 плотин отмечена сейсмическая активность. В десяти случаях возникновение землетрясений можно связать с наполнением водохранилищ. Озеро Мид остается единственным в США водохранилищем, где значительная сейсмическая активность обеспечивает необходимое количество статистических данных, и на их основе доказана прямая зависимость между уровнем воды и количеством землетрясений. Слабые толчки в районе озера Мид продолжают, и до 1973 г. вблизи озера и у плотины Хувер отмечено более 10 тыс. землетрясений, из которых примерно 1000 ощущалась местным населением. Сильнейшее землетрясение, имевшее интенсивность VI баллов (по шкале ММ), произошло 4 мая 1939 г.

По плану водоснабжения штата Калифорния был построен ряд крупных плотин, связанных акведуками и каналами (см. гл. 7). К 1962 г., еще до завершения строительства этих плотин, вокруг них была развернута специальная сеть сейсмических станций для выяснения местных сейсмических условий; одновременно плотины были оборудованы акселерометрами для записи сильных колебаний. Впоследствии чувствительные сейсмографы, предназначенные для измерения вертикальной

Таблица 1.5

## Водохранилища, наполнение которых вызвало землетрясения

Район (страна), где построена плотина	Вы- сота плоти- ны, м	Ем- кость, км <sup>3</sup>	Геология ложа водохрани- лища	Дата напол- нения	Дата первого землетря- сения	Сейсмический эффект
Уэд-Фодда (Алжир)	101	0,228	Доломито- вые мер- гели	1932 г.	Январь 1933 г.	Ощутимые земле- трясения
Хувер (США)	221	38,3	Граниты и докембрий- ские сланцы	1935 г.	Сентябрь 1936 г.	Заметное земле- трясение, $M = 5$
Талбинго (Австра- лия)	162	0,92		1971 г.	1972 г.	Землетрясения с $M < 3,5$
Спньфын (КНР)	105	11,5	Граниты	1959 г.		Высокая актив- ность, $M = 6,1$
Гран-Валь (Франция)	78	0,29		1959— 1960 гг.	1961 г.	Интенсивность $V$ баллов (по шка- ле ММ) в 1963 г
Монтэнар (Франция)	130	0,27	Известняки	1962 г.	Апрель 1963 г.	$M = 4,9$
Кариба (Замбия)	128	160	Архейские гнейсы и осадочные породы серии Карру	1958 г.	Июль 1961 г.	Землетрясения с $M = 5,8$
Вогорно (Швейца- рия)	230	0,08		Август 1964 г.	Май 1965 г.	
Койна (Индия)	103	2,78	Базальты деканских траппов	1962 г.	1963 г.	Сильное землетря- сение, $M = 6,5$ ; погибло 177 че- ловек
Бенмор (Но- вая Зе- ландия)	110	2,04	Граувакки и аргил- литы	Декабрь 1964 г.	Февраль 1965 г.	Значительное зем- летрясение, $M = 5,0$
Кремаста (Греция)	160	4,75	Флиш	1965 г.	Декабрь 1965 г.	Сильное землетря- сение, $M = 6,2$ ; 1 убитый, 60 ра- неных
Нурек (Тад- жикская ССР)	317	10,5		1972 г. (до 100 м)	1972 г.	Возросшая актив- ность, $M = 4,5$
Куробе (Япония)	186	0,199		1960 г.	1961 г.	Землетрясения, $M = 4,9$

составляющей колебаний, были соединены телефонно-телеметрической связью с записывающим центром в Сакраменто, где и производится быстрое определение очагов землетрясений.

Земляная плотина Оровилл на западном склоне Сьерры-Невады имеет высоту 236 м, а емкость водохранилища (при максимальном рабочем уровне) составляет 4,365 км<sup>3</sup>. Наполнение водохранилища началось в ноябре 1967 г. и было закончено в сентябре 1968 г. Сейсмические наблюдения показали, что с 1963 г. по июнь 1975 здесь не было землетрясений с магнитудой выше 2. 1-го августа 1975 г. в 8 км к юго-западу от водохранилища произошло землетрясение с магнитудой 5,7, сопровождавшееся форшоками и афтершоками. Причинная связь с наполнением водохранилища не доказана.

Возможны две причины того, почему крупное водохранилище может как-то повлиять на возникновение очагов землетрясений, причем обе эти причины являются только частью некоторого комплекса условий. Искусственно вызванное землетрясение обычно возникает на небольшой глубине, где деформация пород может возрасти под действием дополнительной нагрузки, накладываемой на земную кору при наполнении водохранилища. Эта возросшая деформация достигает, возможно, величины, необходимой для возникновения местных разрывов. Однако дополнительная нагрузка, как оказалось, мала по сравнению с энергией землетрясений. Большее воздействие может оказать вода, просачивающаяся по трещинам под недавно заполненным водохранилищем. Напор грунтовых вод увеличивает поровое давление в горных породах на несколько бар, и этого может быть достаточно, чтобы вдоль трещин и ослабленных зон понизилось эффективное сопротивление трения и произошло резкое смещение пород.

Единственно эффективный способ уменьшения опасности вызванных землетрясений для сохранности плотины — это понижение уровня водохранилища.

### **Землетрясения, связанные с вулканической деятельностью.**

Как видно из фиг. 1.1, на всем земном шаре вулканы и очаги землетрясений часто располагаются вместе вдоль краев плит. Как и в случае землетрясений, вулканические районы имеются и во внутренних областях плит: таковы, например, Гавайские вулканы.

Несмотря на то что вулканы и землетрясения приурочены к одним и тем же тектоническим зонам, нет доказательств, чтобы какие-либо сильные или умеренные землетрясения относились к тектоническому типу, т. е. к типу упругой отдачи. Те землетрясения, для которых можно обоснованно предполагать связь с вулканами, делятся на три категории: 1) вулканические

взрывы; 2) мелкофокусные землетрясения, вызванные движением магмы, 3) тектонические землетрясения, способствующие усилению вулканической деятельности.

Для извержений вулканов характерны мощные взрывы (см. раздел 2.2), когда высвобождается газ, растворенный в магме под большим давлением; при этом возникают упругие волны, регистрируемые близко расположенными сейсмографами. Вполне вероятно также, что, когда магма движется из одного резервуара в другой по соединяющим их подземным каналам, вмещающие породы нагреваются и при этом возникают перепады температур, которые вызывают деформацию и растрескивание пород, наполнение и разгрузку вулканического очага. Присутствие перегретого пара и газов благоприятно для возникновения местных подвижек по трещинам. Этот механизм объясняет, вероятно, многие мелкофокусные землетрясения, ощущаемые во время вулканических извержений (см. гл. 2). Возможно, лучшим подтверждением правильности таких представлений служит одно из извержений вулкана Мауна-Лоа в 1975 г. Сеть сейсмографов, установленных вокруг этого вулкана, позволила обнаружить слабые землетрясения, очаги которых располагались главным образом на глубине более 15 км. Было замечено, что на протяжении нескольких месяцев, по мере того как магма приближалась к поверхности, глубина очагов землетрясений уменьшалась. Процесс закончился излиянием магмы из вулкана. В такой ситуации данные сейсмической сети можно использовать для предсказания вулканических извержений.

Землетрясения третьей категории, тектонически связанные с вулканами, гораздо труднее использовать для такого прогноза, так как случаи, относящиеся к этой категории, редки (см. гл. 2). После сильнейшего Аляскинского землетрясения 1964 г. (см. раздел 1.1) не было замечено значительного усиления вулканической деятельности, но вот извержение вулкана Пуйеуэ в Андах началось спустя 48 часов после сильнейшего Чилийского землетрясения 1960 г. По меньшей мере можно предположить, что сильные сейсмические сотрясения стимулируют деятельность вулканов: в резервуарах магмы возникают волны, при этом общее сжатие и расширение газо-жидкого расплава может оказаться спусковым механизмом извержения вулкана.

В одном случае тектоническое землетрясение совпало с крупным извержением вулкана Сакурадзима в Японии, что дало повод предположить связь между этими событиями. В январе 1914 г., уже после начала извержения, произошло разрушительное землетрясение в районе города Кагосима, расположенного недалеко от этого вулкана. Магнитуда землетрясения

равнялась 7, очаг был расположен на глубине 50 км. В 1868 г. умеренное тектоническое землетрясение на южной оконечности острова Гавайи сопровождалось подвижкой по разрыву с амплитудой около 1 м, крупным местным цунами и извержением обоих вулканов: Мауна-Лоа и Килауэа. То же самое произошло 29 ноября 1975 г.: землетрясение с магнитудой 7,2, цунами и извержение вулкана Килауэа.

#### 1.4. Описание отдельных землетрясений

**Плотина Синьфын (КНР), 19 марта 1962 г.** В 1958 г. примерно в 160 км к северо-востоку от Гуанчжоу (прежнее название — Кантон) началось строительство крупной бетонной плотины на реке Синьфын (Синьфынцзян). Максимальная высота плотины 105 м, длина по гребню 440 м, емкость водохранилища 11,5 куб. км (см. табл. 1.5). Плотина была построена на территории, где не было исторических данных о разрушительных землетрясениях, и этот район должен был бы считаться мало опасным по любой оценке сейсмического риска (см. фиг. 1.6). Наполнение водохранилища в 1959 г. вызвало длинный ряд землетрясений, продолжавшийся в течение следующих 6 лет при весьма высоком уровне сейсмической активности, так что к 1972 г. было отмечено более 250 тыс. толчков с магнитудой более 0,2 и с очень небольшой глубиной очагов (меньше 10 км).

Водохранилище расположено на нарушенных разрывами гранитах позднего мезозоя. Система разрывов имеет сложный характер, с зонами перетертых пород и глинки трения; имеются данные (геологические и геодезические) о новейших движениях по этим разрывам.

После того как 23 сентября 1961 г. водохранилище впервые достигло своего максимального уровня (115 м), было отмечено увеличение как числа, так и силы землетрясений. В конце февраля 1962 г. сейсмическая активность понизилась и в течение 20 дней не было толчков с магнитудой больше 3, а затем, 19 марта 1962 г., произошел главный толчок ( $M = 6,1$ ) землетрясения со сдвиговым механизмом очага. Возникли сильные колебания, в результате которых в верхней части плотины образовалась трещина длиной 82 м. Этот выдающийся случай возникновения землетрясений под влиянием крупных водохранилищ детально изучен китайскими сейсмологами и строителями.

В дальнейшем конструкция плотины была усилена, и на различной высоте были помещены приборы для измерения сильных колебаний. При афтершоках были получены отличные записи сильных движений. Во время одного из землетрясений



с магнитудой 4,5 пиковое горизонтальное ускорение у основания плотины составило 5% ускорения силы тяжести (0,05 g), а у гребня было в десять раз больше. Проанализировав с помощью вычислительных машин полученные акселерограммы, инженеры смогли проверить динамические параметры усиленной плотины.

**Скопье (Скопле) (Югославия), 26 июля 1963 г.** Землетрясения не обязательно должны иметь большую магнитуду, чтобы причинить большие разрушения в районах, где здания недостаточно прочны и неспособны выдержать сильные колебания. Когда разражается крупная природная катастрофа, ключевым вопросом становится то, можно ли своевременно эвакуировать население в менее опасное место. Примером служит опыт Скопье, города с населением 200 тыс. человек.

Предшественник современного Скопье — римский город Скупи был расположен у слияния рек Лепенац и Вардар. В 518 г. н. э. Скупи был полностью уничтожен землетрясением, люди покинули это место, а император Юстиниан основал новый город — к востоку от нынешнего Скопье. Древние сообщения об этом землетрясении явно преувеличивают картину катастрофы 518 г.: будто бы Скупи провалился сквозь землю вместе со всеми его обитателями, деревья целиком исчезали в разверзшихся трещинах, одна из которых была шириной 4 м!

После 518 г. по историческим данным произошло около 25 землетрясений интенсивностью VI баллов и больше. При землетрясении 10 августа 1921 г. к северу от города Скопье образовался, как рассказывают, новый разрыв. С другой стороны, после землетрясения 1963 г. не сообщалось о свежих крупных смещениях по разрывам, но к северу и к югу от города наблюдались мелкие подвижки, трещины и песчаные выбросы.

Землетрясение 1963 г. разразилось ранним утром (в 5 часов 17 мин по местному времени); ни о каких предупреждающих форшоках ничего не известно. Землетрясение имело умеренную магнитуду ( $M = 6,0$ ), его эпицентр располагался всего в нескольких километрах к северо-востоку от Скопье. В городе рухнуло 10% зданий и еще 65% были повреждены до такой степени, что их нельзя было ремонтировать. Погибло 1200 человек; жертв могло быть гораздо больше, если бы землетрясение началось позже, когда в школьных и административных зданиях (многие из которых разрушились) были люди. Необычной особенностью этого землетрясения было отсутствие пожаров, так как в это летнее утро искусственное отопление не использовалось, а электричество было отключено сразу же как только началось землетрясение. Городской водопровод получил только

небольшие повреждения; канализация также не вышла из строя. Особый интерес с точки зрения проблем, обсуждаемых в этой книге, представляет то, что большое количество жертв этого землетрясения связано с крупными наводнениями на реке Вардар в 1962 и 1963 гг. Эти наводнения причинили ущерб на сумму более 3 млн. долл., ослабили основания домов и привели к тому, что множество бездомных ютилось в перенаселенных квартирах, разрушенных затем землетрясением.

Тяжелые разрушения были почти полностью ограничены пределами самого города. Так же было в Агадире (Марокко) при землетрясении 29 февраля 1960 г., имевшем магнитуду 5,5. Наблюдения показали, что колебания грунта выразились всего в нескольких импульсах. То же самое произошло, возможно, и в Никарагуа при землетрясении 23 декабря 1972 г. в Манагуа (фиг. 1.12), где пиковое ускорение равнялось 0,39 *g* и отмечена резко ограниченная (10 секунд) длительность колебаний (см. раздел 1.5).

Недостаток знаний о геоморфологии и стратиграфии четвертичных отложений Македонии не позволил провести после землетрясения полный анализ сейсмотектоники этого района. В горах, окружающих впадину Скопье, встречаются разрывы, да и в самой этой впадине есть зоны коробления и дробления, обнаруживаемые геологическими и геофизическими методами. Большинство разрывов считаются крутыми сбросами и взбросами.

Была найдена некоторая зависимость между типом и мощностью аллювия и степенью повреждений, но отсутствие сведений о конструкции и прочности старых построек затрудняет дело, так как вплоть до 1963 г. никакие правила сейсмостойкого строительства не учитывались. Инженерное, сейсмологическое и геофизическое изучение последствий катастрофы показало, что нет серьезных оснований переносить город в другое место, а по материалам сейсмической истории и тектоники не удастся найти поблизости район, где сейсмическая опасность была бы существенно меньше. Необходимо было при восстановлении города строго соблюдать нормы сейсмостойкого строительства.

**Инангахуа, Новая Зеландия, 24 мая 1968 г.** Новая Зеландия — область высокой сейсмичности (см. фиг. 1.1), где землетрясения умеренной силы отмечаются в том или ином месте каждое десятилетие. Разрушительное землетрясение Инангахуа произошло 24 мая 1968 г. в 5 часов 24 минуты (по местному времени) и имело магнитуду 7,1 и глубину очага 10—20 км. Эпицентр располагался примерно в 15 км к северу от города Инангахуа (Инангахуа-Джанкшен) на западной стороне Южного

острова Это было шестнадцатое новозеландское землетрясение, достигшее магнитуды 7, за период со времени первого такого сообщения примерно в 1848 г. В 1929 г. в 25 км к востоку располагался эпицентр землетрясения Буллер, имевшего магнитуду 7,6.

При землетрясении 1968 г. на большой площади произошло повреждение зданий, железных дорог, шоссе и мостов; отмечены скальные обвалы, оползни, обрушение склонов и фонтанирование песка. В Инангахуа интенсивность достигла X баллов (по шкале ММ), а в 45 км к югу, в районе Рифтона, акселерометр показал максимальное ускорение 0,35 g.

Хотя мейзосейсмическая область была редко населена (всего несколько сотен жителей) и отмечено только два случая смертельного исхода, ущерб, причиненный землетрясением, был, согласно сделанным оценкам, велик. Например, Железнодорожное управление запросило на ремонт путей, построек и мостов 474 тыс. долл.; Национальное бюро шоссеиных дорог — 515 тыс. долл.; ремонт школ обошелся Министерству просвещения в 121 тыс. долл. После землетрясения 1968 г. по правительственной программе страхования от землетрясений (см. раздел 8.7) по 10 500 заявлениям было выплачено 2,5 млн. долл.

Это землетрясение и его афтершоки произошли в районе позднечетвертичной деформации — в структурной депрессии, выполненной кайнозойскими породами, к северо-западу от Альпийского разлома (северо-восточного простираия), который, будучи активным в голоцене, не давал сколько-нибудь значительных землетрясений после основания европейских поселений около 150 лет назад.

Полевые геологические работы показали, что нарушения на поверхности, образовавшиеся при землетрясении 1968 г., связаны с разломами Инангахуа и Ротокоху. На первом из них установлены как подвижки по падению, так и левосторонние сдвиговые смещения. Подвижки отмечены на прогяжении 1 км; максимальное вертикальное смещение составило 30 см, горизонтальное — 33 см. Геодезическими измерениями и картированием установлено, что изменение высотного положения береговых реперов по разные стороны разлома Ротокоху достигло местами 1 м. Кулисообразно расположенная линия разрывов, относящихся к системе этого разлома, вытянулась примерно на 1,5 км; правостороннее смещение здесь составило также около 1 м. Общий характер деформации по двум разломам указывает на действие сжимающих сил и сокращение коры.

Наиболее слабыми частями деревянных домов оказались их основания, представляющие собой свободно стоящие столбы, почти не связанные распорными балками, что позволяло постройкам сдвигаться и опрокидываться при сотрясениях. Кир-

пичные печные трубы также оказались неустойчивыми и, падая, разрушали черепичную кровлю, что вело к повреждению стен и потолков дождевой водой. Несмотря на неоднократное разрушение кирпичных печных труб, в Новой Зеландии, как и во многих других сейсмичных странах, почти не делается попыток заменить такие трубы более устойчивыми, хотя Национальное общество сейсмостойкого строительства Новой Зеландии изучает эту проблему. Здания, построенные недавно, в соответствии с современными строительными нормами Новой Зеландии, обычно ведут себя при землетрясениях удовлетворительно.

**Землетрясение в Ниигате, Япония, 16 июня 1964 г.** Город Ниигата расположен на северо-западном побережье японского острова Хонсю. Согласно этой сейсмической истории, хорошо известной по крайней мере с 830 г. н. э., район Ниигаты — это одна из тех зон Японии, где сейсмический риск сравнительно мал. 16 июня 1964 г. ровно в 13 часов по местному времени произошло землетрясение с магнитудой 7,5, эпицентр которого находился в 60 км к северу от Ниигаты. Землетрясение вызвало значительные разрушения на полосе побережья длиной около 200 км. Из старой литературы известно, что одно достаточно крупное землетрясение случилось в том же районе в 1833 г. и что разрушения были примерно в тех же местах. В нашем веке только землетрясение 1928 г. причинило заметный ущерб самому городу Ниигата. Эти мелкофокусные землетрясения приурочены к японской внутренней дуге Хонсю. Другие разрушительные землетрясения, происходившие в первой половине XX в. вдоль той же дуги, — это землетрясение Таиго 7 марта 1927 г. ( $M = 8,0$ ), землетрясение Тоттори 10 сентября 1943 г. ( $M = 7,2$ ) и землетрясение Фукуи 28 июня 1948 г. (магнитуда 7,3). Все они унесли много человеческих жизней, так как возникали в густонаселенных районах японского побережья.

При землетрясении в Ниигата отмечен ряд интересных эпизодов. Небольшой островок Авасима, в 5 км к северо-востоку от эпицентра, был поднят на 80—160 см и испытал наклон вдоль оси север-северо-восточного простираения с относительным опусканием северо-западной стороны. В проливе, отделяющем остров от суши, эхолотированием обнаружен свежий разрыв север-северо-восточного простираения со смещением по падению. Для обследования этого уступа сейсмологами была использована подводная лодка «Йомиури», оборудованная смотровыми окнами.

Начиная с 1965 г. японское правительство финансирует долгосрочную программу исследований по прогнозу землетрясений с упором на геодезические измерения деформаций коры, в особенности на высокоточное нивелирование. В районе Ниигаты

наблюдения по линиям нивелировки проводились в 1898, 1930, 1955, 1958, 1961 гг. и непосредственно перед землетрясением 1964 г. Они показали, что в течение 60 лет берег поднимался со скоростью около 1 мм в год. Высказывалось предположение, что скорость поднятия увеличивалась в течение 5—6 лет до 1961 г. и потом мало менялась вплоть до 1964 г., когда произошло резкое опускание, связанное уже с самим землетрясением. Таким образом, изменение высоты береговых реперов может при благоприятных условиях послужить предупреждением о приближающемся крупном землетрясении (см. раздел 1.3).

Еще одной особенностью землетрясения Ниигата было разжижение грунта в пределах города, а также сильные колебания, записанные на двух сейсмограммах. На основании этих записей было рассчитано, что максимальное ускорение грунта составило приблизительно 0,16 g, что совсем немного, учитывая величину причиненного ущерба. Послевоенный рост Ниигаты привел к тому, что в черту города вошли недавно осушенные земли вдоль реки Синано, так что город оказался на территории, сложенной и молодыми, и древними отложениями, включая песчаные дюны и осушенные грунты. В районах развития молодых отложений и на осушенных землях в результате землетрясения многие большие здания наклонились или осели (см. фото 1.4). Сообщается, что только в префектуре Ниигата было разрушено 3018 домов, а другие 9750 получили умеренные или тяжелые повреждения, причем причиной большей части таких разрушений было растрескивание и неравномерное проседание грунта. Около 15 тыс. домов было затоплено в Ниигате в результате обрушения защитной дамбы, отделявшей город от реки Синано. Погибло только 26 человек.

Ко всем несчастьям этого дня добавилось цунами. После того как было зарегистрировано землетрясение, Японское метеорологическое агентство выпустило предупреждение о цунами, но уже через 15 минут после землетрясения морская волна, вызвавшая повышение уровня моря более чем на 4 м, затопила прибрежные деревни. Волна высотой 1—2 м распространилась вдоль побережья к югу на расстояние до 150 км.

**Перу, 31 мая 1970 г.** Вдоль всего перуанско-чилийского побережья от Венесуэлы до южного Чили идет четко ограниченная тектонически активная зона, для которой характерны высокая сейсмичность, молодые горы, вулканы и океанский желоб (см. фиг. 1.1).

31 мая 1970 г. в 15 часов 23 минуты местного времени примерно в 25 км к западу от прибрежного города Чимботе на глубине около 50 км под океанским желобом произошла подвижка по разрыву, вызвавшая землетрясение с магнитудой  $7\frac{3}{4}$ , кото-



Фото 1.4. Разжижение водонасыщенных песков при землетрясении 1964 г. в Ниигата привело к наклону жилых домов.

рое привело к самой крупной из сейсмических катастроф, когда-либо постигавших Западное полушарие. Полные размеры бедствия оставались не известными в течение нескольких недель; спасательные и восстановительные работы были сильно затруднены оползнями и горными лавинами, в результате которых были разрушены линии связи и закрыты дороги в Андах. На западе центрального Перу, на площади 75 тыс. км<sup>2</sup>, погибло более 50 тыс. человек, столько же было раненых, уничтожено около 200 тыс. домов, 800 тыс. человек остались без крова. В мейзосейсмическом районе, на площади около 100 тыс. км<sup>2</sup>, множество деревень было почти полностью уничтожено. По меньшей мере 18 тыс. человек были погребены под громадной каменной лавиной, сорвавшейся со склонов горы Уаскаран и



Фото 1.5. Аэрофотоснимок горы Уаскаран и лавины, разрушившей города Юнгай и Ранраирка при землетрясении в мае 1970 г. в Перу.

накрывшей город Ранраирка и большую часть города Юнгай.

Очевидцы рассказывали, что землетрясение началось с легкого покачивания, затем колебания стали более сильными и продолжались в разных местах по 30—50 секунд или дольше. Акселерометров в мейзосейсмической зоне не было, но в Лиме, может быть, в 200 км от разрыва, ставшего очагом землетрясения, прибор для записи сильных движений отметил высокочастотные колебания с поразительно высокими ускорениями:

для одной из горизонтальных составляющих 0,42 g (см. табл. 1.6).

Самым страшным результатом землетрясения была огромная лавина обломочного материала, сорвавшаяся с северной вершины горы Уаскаран (фото 1.5). Эта и более ранняя (1962 г.) лавины описаны в гл. 6. Лавина, объем которой был не меньше 50 млн. м<sup>3</sup>, состояла из камней, снега, льда и глины; она прошла расстояние 15 км до города Юнгай со скоростью порядка 320 км/ч. Лавина преодолевала гребни высотой 140 м, а глыбы весом в несколько тонн были отброшены на тысячу метров от края лавины.

Впоследствии уаскаранскую лавину очень живо описал Матео Касаверде, геофизик из Перуанского геофизического института, который по чистой случайности перед самым землетрясением повез чету французских туристов осматривать окрестности Юнгай:

«Мы проезжали кладбище, когда машину стало трясти. Но только остановив машину, я понял, что происходит землетрясение. Остановившись, мы выскочили из машины и стали смотреть, что делает вокруг нас землетрясение. Я увидел, как рухнуло несколько домов и развалился мостик через ручей у кладбищенского холма. Через полминуты или чуть позже землетрясение начало затихать. В это время я услышал сильный рев и грохот со стороны Уаскарана. Взглянув туда, я увидел что-то в виде тучи пыли; казалось, будто большая масса камня и льда скалывается от северного пика. Мне сразу же захотелось забраться повыше, и я побежал к вершине кладбищенского холма, который был в 150—200 м от нас. Я заметил, что многие в Юнгае тоже бегут к этому холму. На полдороге или чуть ближе к вершине жена моего друга споткнулась и упала, и я вернулся, чтобы помочь ей подняться...

Гребень приближающегося вала кончался чем-то вроде клуба пены, как у громадных океанских волн. По-моему, высота вала была не меньше 80 м. Было видно, как сотни людей в Юнгае бегут в разные стороны, и многие из них к кладбищенскому холму. Все это время не прекращался страшный рев и грохот. Я добежал до верхней площадки холма в тот момент, когда поток каменных обломков ударился об основание этого холма, наверное, всего лишь через 10 секунд после того, как я достиг вершины.

Примерно в это же время я увидел на склоне холма в нескольких метрах от себя мужчину, который тащил вверх двоих маленьких детей. Каменный поток подхватил его, но он успел подтолкнуть детей к вершине, в безопасное место, хотя поток щебня уже тащил его вниз, в долину, и вскоре он навсегда скрылся из виду. Я помню также, что всего лишь в нескольких



метрах позади меня на холм бежали две женщины, но потом я их уже не видел. Вокруг себя я насчитал 92 человека, которые, как и я, спаслись, забравшись на вершину холма. Это было самое ужасное, что я когда-либо пережил, и я никогда этого не забуду».

Значительный ущерб был причинен и самими сотрясениями грунта, особенно вдоль побережья у городов Чимботе и Касма, а также в городах и деревнях на расстоянии до 150 км от океана. Большинство домов из необожженного кирпича было в этих районах уничтожено или сильно повреждено. Хорошо еще, что вдоль побережья не возникло цунами.

### **Долина Сан-Фернандо, Калифорния, США, 9 февраля 1971 г.**

Главный толчок произошел в 6 часов 00 минут 42 секунды по тихоокеанскому стандартному времени (14:00:41,6 по Гринвичу). Эпицентр имел координаты 34°24,0' с. ш., 118°23,7' з. д., глубина очага была между 6 и 15 км, магнитуда равнялась 6,5.

Это землетрясение имеет первостепенное значение для всех исследований сейсмической опасности в условиях современного города, так как это первое крупное землетрясение в районе Лос-Анджелеса (население 5 млн. человек) после землетрясения Лонг-Бич 10 марта 1933 г., имевшего магнитуду 6,3. Характер и размеры ущерба, причиняемого землетрясением, — это не просто следствие размера магнитуды (см. раздел 1.5). Землетрясение с магнитудой 6<sup>1</sup>/<sub>2</sub> часто называют «умеренным» по сравнению с землетрясением, имеющим, допустим, магнитуду 8<sup>1</sup>/<sub>4</sub>, как в Сан-Франциско в 1906 г. Тем не менее при соответствующей обстановке — при широком развитии разрывов или при опасных геологических и грунтовых условиях в густонаселенных областях — землетрясение с магнитудой 6,5 может вызвать тяжелые местные разрушения. Например, при землетрясении Лонг-Бич (оно произошло в 17 часов 54 минуты) погибло более 100 человек, а ущерб составил 40—45 млн. долл. (в ценах 1933 г.). Многие школьные здания развалились, и это обусловило принятие прогрессивного «закона Филда», регулирующего школьное строительство в Калифорнии.

Землетрясение Сан-Фернандо также дает пример разрушительного «умеренного» толчка: погибло 65 человек, а ущерб, согласно сделанным оценкам, превысил 500 млн. долл. В результате образования крупных разрывов в пригородной жилой зоне обнаружили новые виды сейсмической опасности: поступили сообщения о воздействии сильных колебаний грунта на современные железобетонные постройки, такие, как здание больницы Олив-Вью (фото 1.6) или транспортные развязки на шоссе, а также сообщения о сотрясениях высотных (до 52 этажей) зданий в центре Лос-Анджелеса.

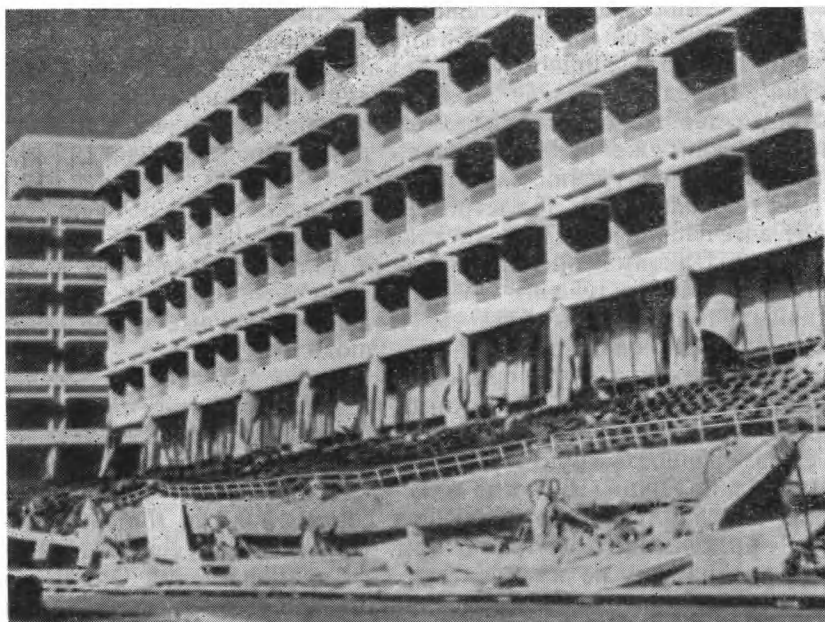


Фото 1.6. Разрушение железобетонных колонн нового здания больницы Олив-Вью при Калифорнийском землетрясении 9 февраля 1971 г. (фото Б. Болта).

Разрывы на поверхности образовались в долине Сан-Фернандо и вдоль предгорьев хребта Сан-Габриель на полосе длиной 12---15 км. По разрывам отмечено как надвигание, так и левосторонние сдвиги; их ориентировка менялась от места к месту при среднем азимуте простираения СЗ 288 и средней величине угла падения  $45^\circ$  (на север). Блок хребта Сан-Габриель сместился по надвигам на юг, в сторону долины Сан-Фернандо, где мощность аллювиальных отложений превышает 3500 м.

Образование надвигов в этом районе не было для геологов неожиданным, хотя уже утвердилась мысль, что при калифорнийских землетрясениях происходят главным образом сдвиги. Разрывы, проявившиеся при землетрясении 9 февраля, не совпали с разрывами, имевшимися на геологических картах, что указывает на трудность точного предсказания землетрясений. Разрывы, закартированные вдоль хребта Сан-Габриель, которые до этого землетрясения при любом исследовании сейсмической опасности считались бы активными, не оживились. Из этого можно извлечь тот урок, что если явно активные разрывы (т. е. те, по которым отмечались подвижки при исторических

землетрясениях) действительно надо считать в той или иной мере сейсмоопасными, то по разрывам, показанным на существующих картах, слишком уверенно выделять зоны сейсмического риска не следует. (После землетрясения стало известно, что некоторые данные о зоне разломов, проходящей через Сан-Фернандо, были уже ранее получены при гидрогеологических исследованиях и бурении.)

Афтершоки этого землетрясения продолжались по меньшей мере в течение 4 лет. По счастливой случайности, один акселерометр в Пакоима, предназначенный для записи сильных колебаний, работал в течение 7 минут после того, как был включен главным толчком. Выяснилось, что за эти первые *семь минут* было записано около десятка афтершоков.

Очень важно то, что сработало большое количество акселерометров (более 200). Некоторые из пиковых ускорений, измеренных при этом землетрясении, приведены в табл. 1.6. Ускорение, измеренное в грунте у береговой опоры плотины Пакоима, было наибольшим из когда-либо записанных при землетрясениях: вертикальная составляющая достигла 0,7 g, горизонтальная — приблизительно 1,25 g (см. табл. 1.6). В сейсмологической литературе, по крайней мере со времен отчета Олдэма о великом Ассамском землетрясении 12 июня 1897 г., появляются сообщения, что ускорения, возникавшие при землетрясениях, превышали ускорение силы тяжести (другими словами, если такое ускорение было направлено по вертикали, то предметы должны были отрываться от земли). Пакоимская акселерограмма снимает все сомнения по этому поводу, если речь идет о локальных сотрясениях. Однако необходимо заметить, что, судя по этой записи, сильные высокочастотные колебания были непродолжительными, и имеются теоретические данные, что крутой рельеф и особенности конструкции плотины привели к некоторому резонансному усилению колебаний. При этом бетонная плотина не была повреждена, а в домике смотрителя (примерно в 2 км от плотины) даже не треснула печная труба!

Поведение жителей мейзосейсмической области было достойно самой высокой похвалы. Конечно, люди испытали потрясение и горе: ведь их дома и имущество были уничтожены, но всюду царили спокойствие, дух взаимопомощи и изобретательности. Быстро были организованы бригады, которые ставили предупредительные знаки и ограждения на дорогах, выключали газовые печи. К счастью, в это утро была очень теплая, ясная, солнечная погода; люди ели и спали на лужайках и в машинах. При плохой погоде потребовалась бы массовая эвакуация. Договоры о страховании от землетрясения заключались в этом районе чрезвычайно редко (см. раздел 8.7).

Состояние одно- или двухэтажных домов с деревянным каркасом в Сан-Фернандо и Силмаре было обнадеживающим. Многие дома в зоне развития тектонических разрывов частично обрушились, были сорваны с фундаментов или были повреждены так, что чуть не рухнули и их пришлось потом разобрать. Тем не менее население пострадало не очень сильно, а самые тяжелые повреждения чаще всего были обусловлены плохой конструкцией или ветхостью старых построек. Всего в нескольких кварталах от полосы сильнейших смещений грунта степень разрушения жилых домов резко падала; в гущу домов, не испытывавших — или почти не испытывавших — повреждений (трубы остались стоять и т. д.), были как бы вкраплены отдельные сильно разрушенные дома.

В кварталах новой застройки типичным было частичное обрушение разноэтажных домов [*split-level house* — дом, в котором высота этажа меньше высоты полного лестничного марша. — *Перев.*] с большим гаражом под двухэтажной частью дома (фото 1.7). Дверь такого гаража лишает дом одной боковой стены. В стенах гаражей и в цоколях многих новых домов не было прочных деревянных поперечных балок. Редко использовалась прочная обшивка (например, фанера). В мейзосейсмической зоне было мало каменных домов, но те, которые были построены не из железобетона, оказались сильно разрушены.

Сейсмическая опасность, связанная с повреждением городских инженерных сооружений, оказалась не очень большой. Возможно, из-за того, что в Сан-Фернандо лопнули трубы главного газопровода и давление понизилось, утечка газа не стала серьезной проблемой, а из-за того, что на главных электрических подстанциях упало напряжение, разрывы в линиях электропередач не вызвали тяжелых последствий. Водоснабжение прекратилось, частично из-за разрыва главных трубопроводов в тех местах, где они пересекали тектонические нарушения. При сильном ветре опасность большого пожара была бы чрезвычайно велика. Портативные батарейные радиопередатчики явились для большинства семей в зоне разрушений важным средством связи с внешним миром.

Важным испытанием эффективности принятого в 1933 г. закона Филда стало состояние общественных школ после землетрясения. Сейсмостойкость более 5000 школьных зданий в школьном округе Лос-Анджелеса удовлетворяла требованиям этого закона. Почти все они выдержали землетрясение хорошо, так что если бы в них шли занятия, дети едва ли серьезно пострадали. Более старые здания (их было 578) не удовлетворяли требованиям закона Филда, и по крайней мере 50 из них были так сильно повреждены, что их пришлось уничтожить. Это в какой-то мере помогло в срочном решении задачи замены



Фото 1.7. Двухэтажное крыло нового разноэтажного дома рухнуло при землетрясении Сан-Фернандо (1971 г.), раздавив стоявший в гараже автомобиль.

Этот гараж, сооруженный в цокольном этаже, ослабил прочность конструкции дома (фото В. Болта).

обветшавших школьных зданий, что должно было быть выполнено, по принятому в Калифорнии закону, к 1975 г.

Земляные плотины обоих (верхнего и нижнего) водохранилищ Ван-Норман были очень сильно повреждены (фото 1.8). К счастью, уровень воды был ниже проектного максимума. На внутреннем откосе (у напорной грани) нижней плотины произошел крупный оползень, и если плотина обвалилась бы еще на метр, то произошла бы катастрофа (см. раздел 4.6).

Большой ущерб был причинен транспортным развязкам и дорожному покрытию. Под действием сильнейших колебаний и в результате смещения грунта многие железобетонные несущие опоры развалились. Обнаружились серьезнейшие конструктивные недостатки: например, бетонные пролеты мостов упали из-за того, что их опоры были слишком узкими. Хотя после этого землетрясения в требования к проектированию были внесены некоторые изменения, уместно поставить вопрос: следует ли строить чрезмерно сложные системы транспортных развязок

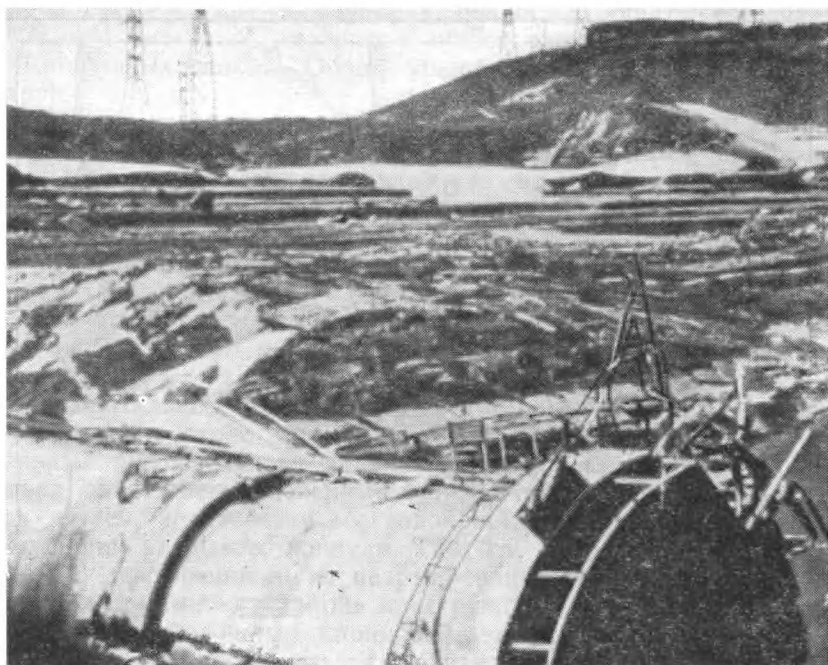


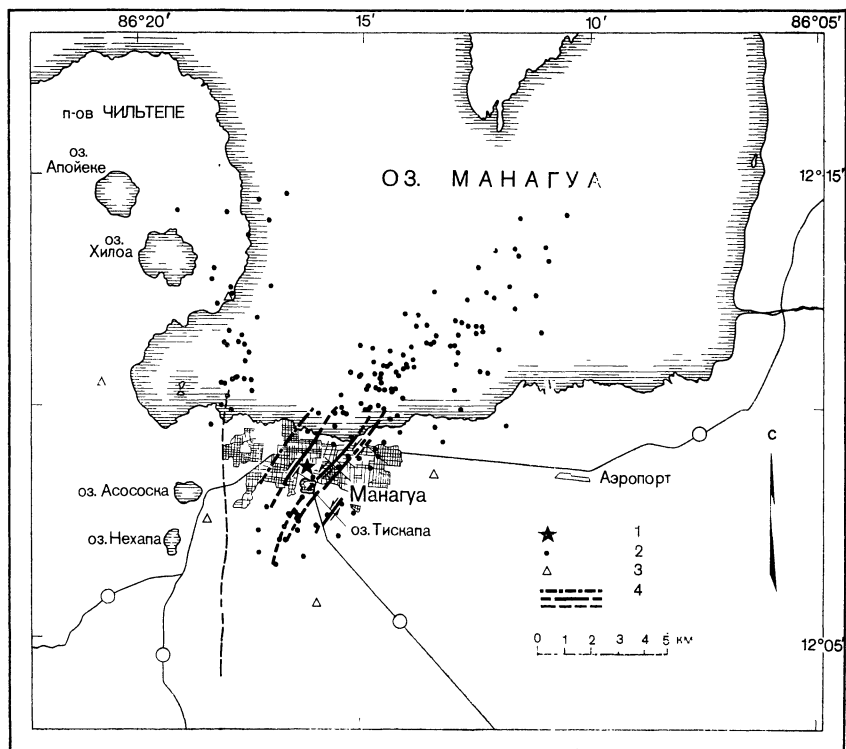
Фото 1.8. Обрушение плотины Ван-Норман при Калифорнийском землетрясении 9 февраля 1971 г. (фото Б. Болта).

с высотой отдельных участков 50 м и более, особенно в сейсмическом районе, на границе между горами и равниной, где широко развиты тектонические нарушения?

**Манагуа, Никарагуа, 23 декабря 1972 г.** Это землетрясение вызывает особый интерес, так как оно разразилось в крупном городе, административном центре страны. Его последствия показательны как пример того, как землетрясение может нарушить нормальную деятельность людей.

22 декабря 1972 г. в городе Манагуа ощущались два слабых землетрясения: в 22 часа 10 минут и в 22 часа 20 минут (по местному времени). 23 декабря в 0 часов 30 минут последовал главный толчок с магнитудой 6,2. После него было много афтершоков (см. фиг. 1.9), из них два сильнейших (с магнитудой около 5,0) произошли в течение одного часа и вызвали значительные дополнительные разрушения.

Очаг землетрясения располагался под центром Манагуа на глубине меньше 8 км. Особенно интересно, что положение очага было оценено с использованием характеристик волн, записанных



Фиг. 1.9. Карта разрывов, обнаруженных после землетрясения 1972 г. в Манагуа.

Эпицентры афтершоков (показаны точками) следуют общему направлению этих разрывов под озером Манагуа. К западу от озера имеется отдельная группа эпицентров: 1—эпицентр главного толчка; 2—эпицентры афтершоков; 3—временные сейсмостанции; 4—разрывы.

акселерометром для сильных колебаний, который был установлен на нефтеперерабатывающем заводе ЭССО (см. фиг. 1.12) на мощной пачке аллювиальных пород в 17 км от центра города. Землетрясение вызвало крупные разрушения в 295 кварталах центральной части города; значительные разрушения отмечены на расстоянии до 15 км от границ центра города.

Никарагуа — крупнейшая из стран Центральной Америки, ее население 1,5 млн. человек. Население Манагуа составляло 420 тыс. человек. Во время землетрясения приблизительно 5 тыс. человек погибло, 20 тыс. было ранено и 250 тыс. осталось без крова. Экономический ущерб был огромным для такой небольшой и сравнительно бедной страны: рухнуло 50 тыс. домов (из общего количества 70 тыс.); 95% магазинов и мелких ла-

вок, а также 11 крупных фабрик, полностью уничтожено; разрушено 4 больницы, имевших в общей сложности 750 мест, и 740 школьных классов. Общий ущерб превысил миллиард долларов.

По-видимому, причиной землетрясения была подвижка по разрыву, проходящему под самым городом, который построен к югу от озера Манагуа на рыхлых аллювиальных и пирокластических (вулканических) отложениях. Полевыми геологическими исследованиями в Манагуа обнаружены четыре тектонических разрыва, по которым в период землетрясений произошли подвижки (фиг. 1.9). Картирование этих подвижек было сложным из-за плотной городской застройки, но все же ясно, что смещения были главным образом горизонтальными, левостороннего направления.

Максимальное суммарное смещение по двум из этих разрывов составило около 30 см. Подвижки привели к тяжелым локальным разрушениям в зданиях, оказавшихся на линиях разрывов, повредили инженерные сооружения на улицах города и под землей; практически все водопроводные трубы, пересекавшие линии разрывов, лопнули. Там, где разрывы прошли под домами, построенными из неармированного бетона, или под старыми домами «набивной» конструкции (деревянный каркас, забитый необожженным кирпичом), эти разрывы можно было проследить по полосе сильнейших разрушений.

Никарагуа размещается на краю Тихоокеанской плиты (фиг. 1.1); начиная с 1920 г. на территории этой страны отмечено более 450 местных толчков. Здесь часты также вулканические извержения, из которых самым впечатляющим было, вероятно, извержение в январе 1835 г., когда обрушилась часть вулканического конуса Косигуина, выбросив перед этим ужасающее количество пепла (фиг. 2.15). Землетрясение, похожее на катастрофу 1972 г., но меньшей силы (магнитуда 5,5), произошло в Манагуа 31 марта 1931 г. На поверхности образовались разрывы, 400 человек (из 60 тыс.) было убито. Совершенно ясно, что это предупреждение не было должным образом учтено.

Землетрясение 1972 г. повредило большую часть правительственных зданий. Ранчо Эль-Ретиро, загородная резиденция генерала А. Сомосы, президента Чрезвычайного комитета, стало штаб-квартирой правительства, и вся военная, полицейская и другая администрация была сосредоточена там. Через пять часов после землетрясения 70% полицейских было вызвано на службу; 12 полицейских погибли. Была разрушена федеральная тюрьма, причем погибло 39 человек, остальные заключенные разбежались. В течение нескольких часов 300 тыс. жителей превратились в беженцев. Люди устремились прочь из города,



на дорогах и перекрестках образовались транспортные пробки. В центральных районах, особенно в универмагах, начались грабежи, и через 38 часов после землетрясения было объявлено военное положение.

Трагедия Манагуа дает один из последних примеров связанной с землетрясениями *опасности пожаров*. Почти за 50 лет до этого произошёл самый знаменитый, вероятно, пожар, который возник при землетрясении Кванто 1 сентября 1923 г., когда были опустошены Токио, Иокогама и их окрестности. В результате сотрясений, пожара и цунами тогда погибло 140 тыс. японцев. Из-за того, что Токио был построен из легко воспламеняющихся материалов, из-за того, что использовались очаги с открытым огнем, после землетрясения в разных частях города разразилась настоящая огненная буря, в которой сгорели заживо около 38 тыс. человек. Погибли невосполнимые исторические собрания библиотек, музеев, художественных коллекций и архивов.

Здание центральной пожарной команды Манагуа было построено в 1964 г. с расчетом противостоять землетрясениям. В здании находилось 20 пожарников, 8 пожарных машин и 4 машины скорой помощи. При главном толчке рухнул второй этаж, раздавив пожарные установки, убив двоих пожарных и ранив других. Радиосвязь вышла из строя, аварийного энергоснабжения не было. Вскоре в городе стали возникать пожары; пришлось протянуть пожарные шланги к озеру и качать воду оттуда, так как водопровод вышел из строя. Местами пожары возникли действительно вследствие землетрясения, местами же — от поджогов (производимых с намерением получить страховку) и в результате грабежей. Все противопожарное оборудование и персонал продолжали борьбу с огнем в течение 7 дней, имея материалы, рассчитанные на 24 часа.

В субботу 29 декабря пожар в деловой части города еще продолжался, но, к счастью, уже подошла помощь извне: в течение первых семи часов после землетрясения из других городов Никарагуа прибыло 14 пожарных грузовиков с экипажем 135 человек. Из других стран было послано 132 человека и 9 пожарных машин; подразделение инженерных войск США, прибывшее 26 декабря, сыграло важную роль в создании защитного пояса вокруг главных очагов пожара, используя свое тяжелое оборудование и взрывчатые вещества.

## 1.5. Меры по уменьшению опасности землетрясений

**Типы опасности.** Сейсмическую опасность можно разбить на 4 класса: 1) колебания грунта; 2) подвижки по разрывам; 3) цунами и сейши; 4) вторичные опасности: а) лавины, об-

валы и оползни, дифференциальное опускание, наклон и перекося поверхности, разжижение и резкая просадка грунта, б) наводнения при прорыве плотин и защитных дамб, в) пожары.

Все эти виды бедствий рассмотрены с примерами в разных частях этой книги. Как показано в разделе 1.3, разные типы подвижек по разрывам ведут к весьма различным последствиям (фиг. 1.7). Нарушения грунта либо локализуются в узкой зоне вдоль поверхности разрыва, как это было при сдвиговых смещениях по разлому Сан-Андреас в 1906 г., либо распространяются на зону многометровой ширины, как это чаще бывает при надвиговых смещениях, например при землетрясении Сан-Фернандо. Опасность особых разрушений, когда, например, активный разрыв проходит под плотиной или пересекает жизненно важные магистрали (такие, как водо- и газопроводы), может быть сведена к минимуму с помощью геологического районирования.

Однако на планирование застройки участков, на которых развиты тектонические разрывы, обращается обычно так мало внимания, что школы, больницы и другие важные и вмещающие много людей здания в Калифорнии, Японии, Турции и в других местах часто оказываются построенными прямо на активных разрывах. Наоборот, в отдельных районах естественные приразломные формы рельефа, например природные запруды, можно было бы успешно использовать как *небольшие* водохранилища. В этих случаях смещения по разрывам только в очень небольшой степени повлияли бы на запасы воды. Опасность цунами (пункт 3 нашей классификации) специально рассмотрена в гл. 3.

Разрушения, вызванные сейсмическими колебаниями, распространены наиболее широко и влияют на все находящееся в захваченном ими районе; этот вопрос детально разобран в этом разделе. Случаи резкой просадки грунта (пункт 4 нашей классификации) и защитные меры обсуждаются в разделах 1.1, 1.4 и в описаниях специальных исследований, помещенных ниже в этом разделе. Вопрос об уменьшении ущерба, связанного с геологическими явлениями, подробно освещен в гл. 4 и 5. Как показали полевые работы, при многих землетрясениях наибольший ущерб связан с недостаточной прочностью основания (плохо связанные грунты, такие, как илистые грунты залива Сан-Франциско). В этой обстановке не только происходит при соответствующих условиях усиление сейсмических колебаний, но сам намывтый материал, образующий склоны, может прийти в движение, и сейсмический риск для жизни и имущества людей резко возрастет.

С землетрясениями связаны вторичные, но чрезвычайно опасные явления — наводнения и пожары. Наводнения возникают

не только тогда, когда на побережье, захватывая бухты и эстуарии, обрушивается цунами, но и при крупных сейшах в озерах и каналах; они возникают и тогда, когда в результате сотрясений грунта происходит прорыв плотин. Такие наводнения бывают самыми опустошительными. Только метровый слой земли предотвратил катастрофу при разрушении земляной плотины водохранилища Ван-Норман во время землетрясения Сан-Фернандо в 1971 г. (см. фото 1.8).

При изучении землетрясений постоянно сталкиваешься со случаями пожаров. Не забываются разгулы огненной стихии, последовавшие за землетрясениями в Сан-Франциско (1906 г.) и в Токио (1923 г.). В период восстановления после 1906 г. в Калифорнии было модно рассуждать о катастрофическом пожаре и преуменьшать воздействие сейсмических сотрясений, чтобы не отпугнуть иммигрантов. Когда эмоции несколько остыли, повторное изучение показало, что до 20% общего ущерба в Сан-Франциско вызвано колебаниями грунта. Однако именно пожар, за три дня уничтоживший в деловых районах Сан-Франциско на площади 12 км<sup>2</sup> 521 квартал, был главной причиной материального ущерба.

Этот большой пожар не был неожиданностью. Национальное бюро страхования от пожаров сообщало уже в 1905 г.: «Ввиду исключительно большой площади города, большой высоты домов, множества выставленных напоказ не защищенных от огня предметов, ввиду отсутствия противопожарных полос, проходов и преград, а также ввиду того, что здания построены из весьма легковоспламеняющихся материалов, потенциальная угроза пожаров чрезвычайно велика. В связи с этим, а также в связи с почти полным отсутствием распылителей и современного противопожарного оборудования вообще вероятность пожаров вызывает большую тревогу. По сути дела, Сан-Франциско нарушил все страховые традиции тем, что до сих пор еще не сгорел».

Хотя главные водохранилища, располагавшиеся к югу от города, на ожившем разломе Сан-Андреас или поблизости от него уцелели, магистральные линии водопровода в тех местах, где они пересекали этот разлом или заболоченные участки земли, были повреждены. Вопреки распространенному мнению емкости, питавшие городской водопровод, не были опустошены. Проблема возникла из-за повреждения распределительной системы. В настоящее время общий риск возникновения пожаров в Сан-Франциско уменьшился благодаря наличию усовершенствованного противопожарного оборудования, насосных установок вдоль залива, резервуаров с водой под улицами, а также благодаря применению огнестойких материалов при строительстве.

**Оценка сейсмической опасности для строящегося объекта. Расчетное землетрясение.** Региональные карты сейсмичности или сейсмического риска, такие, как на фиг. 1.5 и 1.11, обычно не отражают геологических условий и не учитывают различий, связанных со свойствами грунтов. Следовательно, необходимо, чтобы места крупного и особо важного строительства в густонаселенных районах подвергались специальному инженерно-геологическому изучению, детальность которого должна зависеть от назначения здания, его предполагаемой заселенности и от типа конструкции. В населенных районах больше бед принесет, вероятно, повреждение ядерного реактора, чем, скажем, нефтепровода.

В последние годы были хорошо определены те факторы, или условия, которые необходимо учитывать при оценке сейсмического риска на конкретном участке, намечаемом для строительства.

1. *Геологические условия.* Могут потребоваться любые из перечисленных ниже исследований:

а) составление структурно-геологической карты района (в цвете) с сопроводительной запиской о новейших тектонических движениях;

б) сбор сведений об активных разрывах района и о типах смещений (например, левосторонний сдвиг и т. п.). Иногда для этого необходимы полевые работы. Особенно важны геологические данные о движениях по разрывам в голоцене (на протяжении последних 10 тыс. лет): о смещениях в современных аллювиальных отложениях, о радиоуглеродных датировках органического материала из пересекающих разрывы траншей и т. д.;

в) составление детальной геолого-геоморфологической карты территории вокруг участка; особое внимание должно быть обращено уступам в коренных породах, эффекту селективной эрозии и смещениям в перекрывающих отложениях. На такой карте должны быть показаны типы пород, структура поверхности и местные разрывы, а также должна быть дана оценка вероятной длины этих разрывов, их непрерывности и типа движений по ним;

г) если вблизи объекта проходят разрывы, пересекающие весь район, необходимы геофизические исследования, которые должны определить участки недавней активизации движений по разрывам и указать положение других линеаментов. Иногда целесообразно провести измерения электрического сопротивления и силы тяжести по профилю, перпендикулярному к разрыву; на результаты таких наблюдений часто влияет уровень грунтовых вод, который может оказаться различным по разные стороны разрыва благодаря глинке трения, образующей водонепроницаемую перегородку;

д) сбор данных об оползнях, крупных просадках и короблении грунта, а также о затоплении участка при наводнениях или цунами;

е) проверка уровня грунтовых вод в окрестности объекта с тем, чтобы выяснить, имеются ли там водонепроницаемые перегородки, которые могут быть связаны с разрывами или могут повлиять на поведение почвенного слоя при сейсмических колебаниях.

2. *Сейсмические условия.* Методика оценки параметров колебаний грунта для оптимального проектирования в строительстве находится еще на ранней стадии разработки, и многое пока не проверено. Важно поэтому указать на неопределенности, присущие перечисленным ниже исследованиям, и на допущения, используемые при их проведении:

а) сбор документов о подробностях сейсмической истории окрестностей выбранного участка. При составлении перечня ощущавшихся землетрясений особенно важны каталоги исторических землетрясений. В таком перечне надо указать место, магнитуду и максимальную интенсивность (в баллах) каждого землетрясения. Эти сведения следует иллюстрировать картографическим материалом;

б) построение (там, где имеются соответствующие данные) кривых повторяемости всех местных землетрясений, даже самых малых магнитуд. На основе такой статистики можно в дальнейшем оценить частоту разрушительных землетрясений;

в) обобщение имеющихся исторических данных о сотрясениях грунта и разрушениях, сбор других данных, характеризующих интенсивность землетрясений вблизи участка;

г) оценка максимальной интенсивности сотрясений (по шкале ММ) на твердых грунтах вблизи участка по сообщениям об ощутимости всех значительных землетрясений;

д) определение *расчетного землетрясения*. Геологические и сейсмологические данные, перечисленные выше, должны использоваться для предсказания характера землетрясений, которые могут вызвать самые сильные колебания на участке проектируемого строительства (необходимо предусмотреть суммарное воздействие нескольких таких землетрясений). Там, где это возможно, следует указать положение тектонических нарушений, по которым происходили подвижки, и указать вероятный механизм этих подвижек (сдвиг, надвиг и т. п.). Надо оценить вероятную глубину очагов ожидаемых землетрясений, длину разрывов и величину смещений, а также пределы надежности этих оценок. Эти величины помогут оценить магнитуду ожидаемых разрушительных землетрясений по стандартным кривым, характеризующим зависимость между длиной разрыва и магнитудой (табл. 1.3).

3. *Инженерно-геологические условия.* Когда имеются геологические данные о недостаточной механической прочности грунтов (например, в поймах рек или в прибрежных районах, сложенных рыхлыми отложениями), рекомендуется провести полевое изучение грунтов, слагающих район строительства. Кроме того, необходимо обследовать участки опускания и осадки грунта (как естественной, так и вызванной отводом грунтовых вод) и проверить устойчивость окрестных склонов. Опасность таких нарушений поверхности освещена в гл. 4 и 5, поэтому мы укажем здесь только три вида исследований, требующих особого внимания:

а) исследование технических свойств грунтов основания в пределах, обусловленных типом проектируемого здания. Для этого важно провести бурение, проходку траншей, выемку грунта, а также поиски песчаных прослоев, в которых может произойти разжижение;

б) измерения (*in situ* или путем лабораторных испытаний керна буровых скважин) физических свойств грунтов: плотности, водонасыщенности, прочности на сдвиг, поведения при циклической нагрузке, величины затухания упругих волн;

в) определение затухания и скоростей волн  $P$  и  $S$  в породах осадочного чехла геофизическими методами.

**Пиковые ускорения при сильных колебаниях грунта.** Для многих расчетов при проектировании необходима количественная характеристика тех колебаний, которые должно выдержать сооружение, т. е. характеристика *расчетного землетрясения*. Часто используются два главных параметра: *максимальное* (или *пиковое*) *ускорение* колебаний и *продолжительность* сильных колебаний.

Величина максимального ускорения определена теперь по нескольким сотням записей сильных колебаний (некоторые из важнейших измерений представлены в табл. 1.6); полученные сведения обобщены в форме кривых зависимости ускорения от магнитуды землетрясения, от близости к разрыву, по которому произошла подвижка, и от других переменных. Выявилась одна грубая закономерность: пиковое вертикальное ускорение составляет примерно половину среднего горизонтального (если подвижка происходит в направлении, близком к падению разрыва, эта доля оказывается больше).

Магнитуда землетрясения влияет на пиковое ускорение не так сильно, как считали раньше. Как показывает табл. 1.6, землетрясение на разломе Сан-Андреас, происшедшее в 1972 г., дало на расстоянии 10 км от очага пиковое ускорение колебаний грунта 0,69 g; при землетрясении в Анконе (Италия), имевшем магнитуду всего лишь 4,5, было отмечено пиковое

Таблица 1.6

**Землетрясения, при которых отмечены высокие ускорения колебаний грунта**

Записывающая станция	Горизонтальное расстояние, км; от эпицентра (Э), от разрыва (Р)	Составляющая	Максимальное ускорение в % от ускорения силы тяжести	Примечания
<i>16 мая 1968 г. Япония. Магнитуда 7,9</i>				
Хатинохе	Около 200 (Э)	СЮ ВЗ	24 19	Область порта. Небольшой сарай. Мягкий грунт
<i>21 июля 1952 г. Графство Керн, Калифорния. Магнитуда 7,7</i>				
Тафт	40 (Э)	СВ 21° ЮВ 111°	15 18	В служебном туннеле между зданиями. Аллювий
<i>17 октября 1966 г. Перу. Магнитуда 7,5</i>				
Лима	200 (Э)	СВ 8° СЗ 278°	42 27	Небольшое здание. Грубый плотный гравий и галька
<i>13 апреля 1949 г. Залив Пьюджет-Саунд, штат Вашингтон. Магнитуда 7,1</i>				
Олимпия	16 (Э)	СЗ 356° СВ 86°	16 27	Небольшое здание. Насыпной грунт у берега залива. Глубина очага 50 км
<i>11 декабря 1967 г. Индия. Магнитуда 6,5</i>				
Плотина Койна	8 (Э)	Вдоль оси плотины Перпендикулярно	63 49	Галерея плотины
<i>21 января 1970 г. Япония. Магнитуда 6,8</i>				
Хироо	18 (Э)	ВЗ СЮ	44 ~ 30	Глубина очага 60 км
<i>21 декабря 1964 г. Юрика, Калифорния. Магнитуда 6,6</i>				
Юрика	24 (Э)	СВ 79° СЗ 349°	27 17	Двухэтажное здание. Аллювий
<i>6 августа 1968 г. Япония. Магнитуда 6,6</i>				
Увадзима	11 (Э)	Поперечная Продольная	44 36	Строительство моста Итасима. Мягкий аллювий. Глубина очага около 40 км

Записывающая станция	Горизонтальное расстояние, км, от эпицентра (Э), от разрыва (Р)	Составляющая	Максимальное ускорение в % от ускорения силы тяжести	Примечания
<i>18 мая 1940 г. Эль-Сентро. Калифорния. Магнитуда 6,5</i>				
Эль-Сентро	6 (Р)	СЮ ВЗ	32 21	Двухэтажное тяжелое железобетонное здание, массивная бетонная подставка. Аллювий
<i>9 февраля 1971 г. Сан-Фернандо, Калифорния. Магнитуда 6,5</i>				
(В полосе, нарушенной разрывами, шириной 42 км, максимальное ускорение $\geq 0,15g$ отмечено на 31 акселерограмме)				
Плотина Пакоима, у береговой опоры	3 (Р)	СВ 14° СЗ 284°	115 105	Небольшое здание на скалистом гребне у края плотины. Сильно трещиноватые диоритовые гнейсы
Лейк-Хьюс, станция № 12	25 (Э)	СВ 21° СЗ 291°	37 28	Небольшое здание. Трехметровый слой аллювия над песчаниками
Плотина Кастейик, у береговой опоры	29 (Э)	СВ 21° СЗ 291°	39 32	Небольшое здание Песчаники
<i>10 марта 1933 г. Лонг-Бич. Калифорния. Магнитуда 6,3</i>				
Вернон	16 (Э)	СВ 8° ЮВ 98°	13 15	Основание шестиэтажного здания. Аллювий
<i>23 декабря 1973 г. Никарагуа. Магнитуда 6,2</i>				
Манагуа	5 (Р)	ВЗ СЮ	39 34	Нефтеперерабатывающий завод ЭССО. Аллювий
<i>30 июня 1941 г. Санта-Барбара, Калифорния. Магнитуда 5,9</i>				
Санта-Барбара	16 (Э)	СВ 45° ЮВ 135°	24 23	Двухэтажное здание. Аллювий
<i>27 июня 1966 г. Паркфилд, Калифорния. Магнитуда 5,6</i>				
С-Н № 2	0,08 (Р)	СВ 65° СЗ 335°	48 Акселерометр вышел из строя	Небольшое здание Аллювий



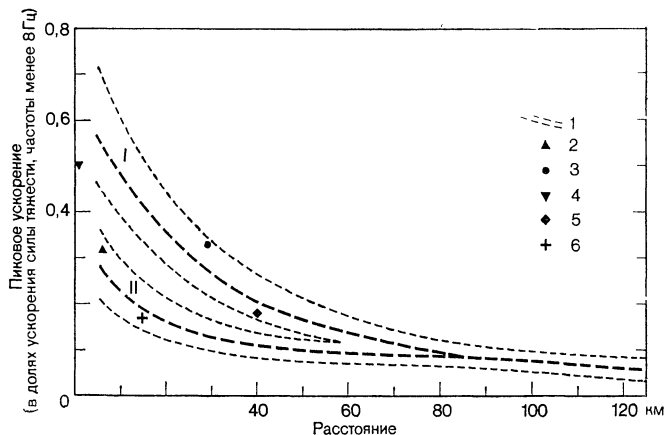
Записывающая станция	Горизонтальное расстояние, км; от эпицентра (Э), от разрыва (Р)	Составляющая	Максимальное ускорение в % от ускорения силы тяжести	Примечания
<i>4 сентября 1972 г. Долина Бэр, Калифорния Магнитуда 4,7</i>				
Ранчо Меленди	8,5 (Э)	СЗ 331° СВ 61°	69 47	Около 19 м от разлома Сан-Андреас. Небольшое здание. Аллювий (никаких повреждений)
<i>21 июня 1972 г. Италия. Магнитуда 4,5</i>				
Анкона	Около 5 (Э)	СЮ ВЗ	61 45	Скальный грунт

ускорение 0,6 g. Такие большие ускорения бывают только в двух-трех высокочастотных колебаниях (вероятно, соответствующих приходу волны S), они несут небольшую энергию и не оказывают заметного воздействия на прочные сооружения.

Важное значение имеет, очевидно, быстрота уменьшения ускорения с расстоянием от центра сейсмического возмущения (возможны, конечно, и флуктуации, связанные с локальным усилением колебаний). Сопоставление, представленное на фиг. 1.10, показывает общие закономерности распределения пиковых ускорений (для частот меньше 8 Гц) в твердых грунтах. По указанным выше причинам лучше не коррелировать пиковые ускорения с магнитудой землетрясения, как это иногда делают, а просто разделить наблюдаемые значения только на два класса, как показано на фиг. 1.10 (классы I и II).

Класс I включает те подвижки по разрывам, которые вследствие характера смещения, типа пород, глубины разрыва и т. д. генерируют поверхностные волны большой интенсивности, как в случае землетрясения Сан-Фернандо в 1971 г. (см. кривую «Кастейик-1971» на фиг. 1.10). Класс II объединяет волны, излучаемые из очага, в котором происходит смещение по разрыву менее «жесткого» типа, как при землетрясении 1940 г. в долине Импириал-Валли (землетрясение Эль-Сентро). Пиковое ускорение вблизи «высокоинтенсивного» «жесткого» разрыва в среднем близко, по-видимому, к величине 0,6 g.

В настоящее время статистика фактических полевых записей еще невелика, так что оценки пока грубы. Как показывают кривые 90%-ной вероятности (фиг. 1.10), пиковое ускорение вблизи очага класса II в 9 случаях из 10 будет меньше 0,4 g.



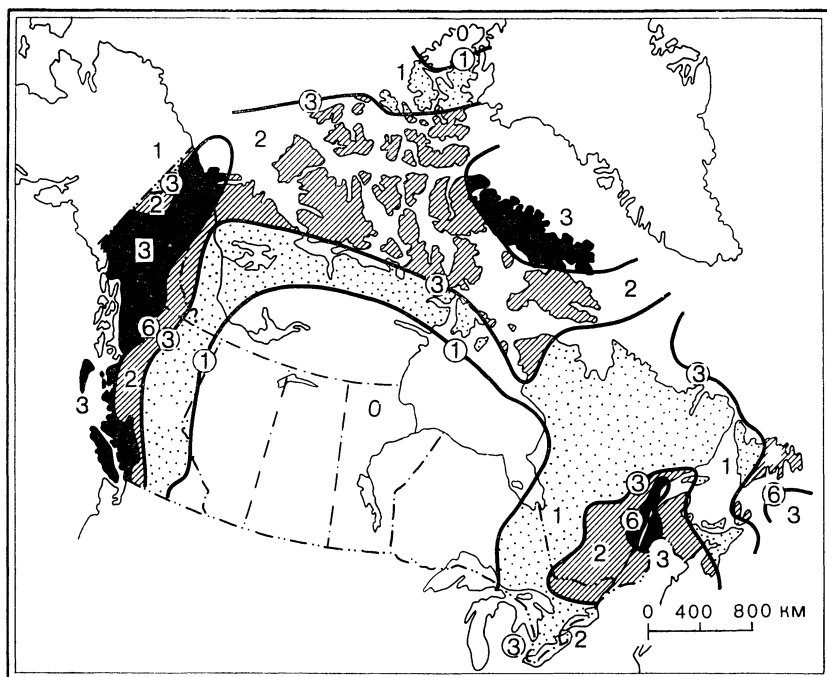
Фиг. 1.10. Кривые показывающие общие закономерности уменьшения величины максимального ускорения колебаний грунта (с частотой менее 8 Гц) с увеличением расстояния от очага (от разрыва, по которому произошла подвижка).

Предполагается, что грунты представляют собой скальные породы или твердые отложения осадочного чехла. Разными значками показаны характеристики записей, представленных в табл. 1.6 (по [8]). *I* — очаги колебаний высокой интенсивности; *II* — очаги колебаний обычной интенсивности. *I* — пределы 90%-ной вероятности; 2 — Эль-Сентро, 1940 г. (меридиональная составляющая); 3 — Кастелник, 1971 г.; 4 — Паркфилд, 1966 г.; 5 — Тафт, 1952 г.; 6 — Вернон, 1933 г.

Для более высоких частот могут быть и большие ускорения, но обычно строителям важны только частоты не выше 8 Гц. На расстоянии больше 100 км от очага землетрясения пиковые ускорения в коренных породах едва ли могут превысить 0,1 g.

Вероятность возникновения ускорений, превышающих определенную величину, уже используется как мера сейсмического риска при составлении национальных карт сейсмического районирования (фиг. 1.11). Интересно сопоставить канадскую карту, показанную на фиг. 1.11, с картами сейсмического риска, применяемыми в США (фиг. 1.5), особенно для пограничного района.

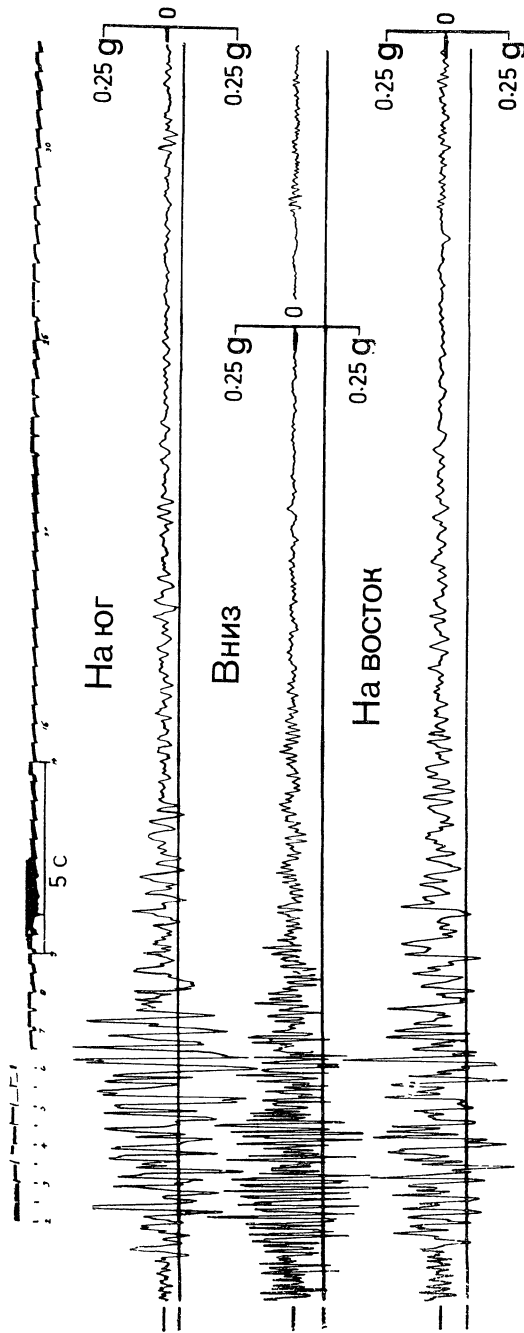
**Продолжительность сильных колебаний.** Многие инженеры и сейсмологи считают, что длительность сильных колебаний — это единственный важнейший фактор, от которого зависят повреждения и разрушения разных строений, почвенного слоя и склонов. Человек может ощущать колебания такой малой амплитуды, что их ускорение составляет всего лишь тысячную долю ускорения силы тяжести (0,001 g), поэтому не удивительно, когда люди сообщают, что ощущали колебания в течение 100 секунд или больше. Однако для оценки опасности важно



Фиг. 1.11. Один из типов карт сейсмического районирования: построенная для территории Канады (1970 г.) карта показывает зоны с различной вероятностью риска.

Обозначения на изолиниях — величины ускорений в процентах от ускорения силы тяжести с вероятностью 0,01 в год. Цифры между изолиниями — обозначения категорий сейсмических зон (по [32]).

предсказать продолжительность сейсмических колебаний с ускорениями, превышающими некоторую критическую величину. Изучение имеющихся акселерограмм сильных колебаний, записанных на твердых грунтах на разных расстояниях от центра землетрясения, дает возможность построить некоторую среднюю кривую продолжительности колебаний как функции частоты, порога амплитуды и рихтеровской магнитуды. Как видно на фиг. 1.12, продолжительность значительных колебаний в районе Манагуа была только 10 секунд. Магнитуда землетрясения влияет на продолжительность гораздо сильнее, чем на пиковое ускорение, потому что чем больше магнитуда, тем больше длина разрыва, по которому происходит подвижка (табл. 1.3), и, следовательно, тем больше площадь, с которой по мере разрастания разрыва излучаются сейсмические волны. Длительность колебаний до некоторой степени уменьшается вследствие затухания волн: чем дальше место записи от



Фиг. 1.12. Акселерограмма, записанная на нефтеперерабатывающем заводе компании ЭССО в Манагуа при главном толчке землетрясения 1972 г.

*Верхняя запись* — составляющая колебаний грунта в направлении север — юг (отклонение записи вверх соответствует движению на юг), *средняя запись* — вертикальная составляющая (отклонение записи вверх — движение вниз), *нижняя запись* — составляющая колебаний в направлении запад — восток (вверх — на восток) Максимальное мгновенное ускорение на составляющей север — юг 0,34 g. Интервал между марками времени 0,5 с.

фронта разрыва, тем меньше амплитуда волны, причем высокие частоты затухают быстрее, чем низкие.

Подходящей характеристикой для расчетного землетрясения является его *условная продолжительность* (bracketed duration), т. е. отрезок времени (разный для различных диапазонов частот) между первым и последним записанным пиком ускорения, имеющим величину выше условленного уровня (скажем, выше 0,05 g). Например, при разработке проекта надо учесть, что по материалам сейсмической истории на данном участке при землетрясении в течение 20 секунд отмечались колебания с ускорением 0,05 g и выше, в течение 5 секунд — 0,20 g и выше, а максимальный всплеск ускорения равнялся 0,30 g. Проанализировав имеющиеся записи сильных колебаний и введя необходимые предположения об их затухании, Болт произвел оценку условной продолжительности землетрясений в зависимости от их магнитуды и близости к очагу (табл. 1.7). Табл. 1.7 показывает, что в 25 км от центра землетрясения с магнитудой 8 условная продолжительность для высоких частот (более 2 Гц) и ускорений выше 0,05 g составит около 30 секунд. Читатель может убедиться, что длительность сильных колебаний в Манагуа (фиг. 1.12) согласуется с табл. 1.7.

**Таблица 1.7**

**Условная продолжительность землетрясений (в секундах) для ускорений > 0,05 g при частотах > 2 Гц**

Расстояние, км	Магнитуда						
	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
10	8	12	19	26	31	34	35
25	4	9	15	24	28	30	32
50	2	3	10	22	26	28	29
75	1	1	5	10	14	16	17
100	0	0	1	4	5	6	7
125	0	0	1	2	2	3	3
150	0	0	0	1	2	2	3
175	0	0	0	0	1	2	2
200	0	0	0	0	0	1	2

Для наилучшего учета требуются не только величины пиковых ускорений и продолжительности, но и оценка того, в каком порядке появляются эти пики, количество импульсов и общее содержание частотных компонент (*спектр колебаний*) землетрясения. К сожалению, пока еще записей сильных колебаний недостаточно, чтобы можно было с большой уверенностью рассчитывать средние спектры для всех важнейших геологических

обстановок. Рассчитаны синтетические сейсмограммы, основанные на статистической экстраполяции имеющихся записей, и ими можно пользоваться, соблюдая известную осторожность.

**Исследования по программе городского развития Редвуд-Шорс, Калифорния.** В 1960-е годы город Редвуд-Сити (Калифорния) участвовал в программе освоения 1800 га побережья залива Сан-Франциско (фиг. 1.3). Основной частью этой площади был необжитой полуостров, подвергавшийся затоплению во время высоких приливов. Прежде всего была сооружена система дамб, высота которых была на 1 м выше уровня максимального астрономического прилива. Затем на поверхность полуострова, сложенную главным образом илистыми осадками залива, был насыпан каменный материал и щебень с окружающих холмов, и, таким образом, эта поверхность была поднята. Во время проведения работ значительное внимание общественности было привлечено к возникающей при этом геологической опасности особого рода. Город учредил Бюро советников, в задачу которого входила проверка геологических условий этого района и предоставление рекомендаций по поводу мероприятий, необходимых для обеспечения безопасности населения.

Подстилающими породами этого равнинного участка являются глинистые сланцы, песчаники и другие породы францисканской формации: эти породы основания покрыты аллювием и отложениями залива, имеющими четвертичный (плейстоценовый и голоценовый) возраст и мощность от нескольких метров до 200 м и более. Погребенная поверхность основания имеет сложный рельеф, обусловленный, вероятно, речной эрозией, предшествовавшей отложению рыхлых осадков. Было пробурено более 200 скважин, давших сведения о свойствах грунтов. Бурение обнаружило прослой и линзы песка и гравия, обычно мощностью менее 2 м, но с отдельными раздувами до 8 м. Эти пески встречались обычно на глубине 12 м под илистыми отложениями залива. Испытание проб песка и гравия показало, что при сейсмических колебаниях они должны сохранять стабильность, но при наиболее интенсивных землетрясениях в них может произойти небольшое разжижение. Однако был сделан вывод, что при данном сочетании размера, формы и глубины залегания этих линз разжижение нигде не должно выйти за пределы критической устойчивости окружающих дамб, а дифференциальная осадка не может превысить нескольких сантиметров. Мареограммы залива Сан-Франциско показывают, что амплитуда волн цунами (см. раздел 3.2), проходящих через пролив Золотые Ворота, уменьшается на 75% при их движении к Редвуд-Сити.

Данных о позднечетвертичных движениях по разрывам для этой площади не было, а сейсмические материалы, как исторические, так и инструментальные, указывали на то, что здесь не было и очагов землетрясений. Однако осваиваемый район Редвуд-Шорс (Редвудское побережье), как и большинство других освоенных площадей вокруг залива Сан-Франциско, лежит между разломами Сан-Андреас и Хейвард, и в течение проектного 100-летнего срока службы построек, возводимых на этом участке, по одному из разломов ожидается по меньшей мере одно землетрясение с магнитудой  $7-8\frac{1}{4}$ .

Водонасыщенные аллювиальные отложения, перекрывающие породы фундамента, должны оказать значительное воздействие на характеристики колебаний при землетрясениях. Поэтому рекомендуется, насколько это выполнимо, установить, как поведут себя эти отложения при сейсмических колебаниях в случае, допустим, землетрясения, подобного катастрофе 1906 г. Математические расчеты близких к натуре моделей слоев глинистых и скальных пород показали, что короткопериодные компоненты колебаний грунта, которые чаще всего вызывают повреждения одно- и двухэтажных домов, не должны значительно отличаться от тех, что ожидаются в старых городах, расположенных вокруг залива Сан-Франциско. С другой стороны, чехол илистых отложений вызовет, вероятно, некоторое относительное увеличение амплитуды длиннопериодных колебаний, так что при проектировании высоких зданий здесь необходимо соблюдать более строгие требования, чем в местах, удаленных от залива.

Учтя изложенные выше технические соображения, Бюро советников сообщило свою оценку геологического риска в районе Редвуд-Шорс. В этой оценке главное внимание уделено следующему: во-первых, без чрезвычайных расходов на строительство нет *абсолютных* гарантий безопасности людей и сохранности их имущества ни в какой части изученной площади, даже если будут приняты все разумные меры предосторожности. Люди в своей повседневной жизни часто вынуждены считаться с возможностью нежелательных событий в будущем, и обычный подход заключается в том, чтобы свести риск к минимальному уровню, принятому как норма во всей обширной области. (Это не означает, конечно, что те, кто придерживается иных взглядов, не должны стремиться убедить общественность в необходимости изменить утвердившееся мнение.)

Во-вторых, надо учитывать характер предстоящего развития района. В Редвуд-Шорс жилые кварталы застраиваются главным образом домами, предназначенными для одной семьи. Даже самое сильное землетрясение на таком участке может вызвать только небольшое проседание, коробление и уплотне-

ние грунта, поэтому при проектировании разумно будет исходить из того, что такой характер нарушений в грунтах не создаст большей опасности для зданий, чем в других населенных пунктах в районе залива Сан-Франциско. На деле полный риск можно сделать даже меньше обычного: например, опасность пожаров и других вторичных явлений можно свести к минимуму, предприняв для этого соответствующие меры в самом начале планируемого строительства.

**Исследование по программе строительства больниц Управления социального обеспечения бывших военнослужащих США.** Во время землетрясения в Сан-Фернандо 9 февраля 1971 г. (см. раздел. 1.4) погибли 34 человека из числа пациентов и служащих, когда рухнули два крупных здания больницы Управления социального обеспечения бывших военнослужащих (Управления ветеранов) США. Эти здания были сооружены еще до того, как стали широко использоваться нормы сейсмостойкого строительства. Другие три крупные больницы, все современной постройки, в том числе больница Олив-Вью (см. фото 1.6), были так сильно повреждены этим же землетрясением, что больных и персонал пришлось эвакуировать.

Этот вопрос обсуждался 18 февраля 1971 г. в Лос-Анджелесе на заседании одного из подкомитетов Комитета по делам ветеранов палаты представителей. С показаниями выступил Ф. Родс, заместитель главы Управления ветеранов; он говорил о том, как люди помогали друг другу во время этого бедствия: «Я видел, как работали полицейские и пожарные из разных ведомств, поисковые и спасательные группы, врачи, работающие не у нас, и местные добровольцы. Они помогали нашим людям в обследовании развалин, не прекращавшемся ни днем, ни ночью примерно пять суток. Непрерывно работали гигантские подъемные краны, бульдозеры и другие аварийные машины, причем работали осторожно, чтобы не раздавить тех, кто мог остаться в живых».

Управление ветеранов, которому принадлежит большее количество больниц, чем любой другой организации в мире, немедленно учредило специальный Комитет по землетрясениям и ураганам, чтобы разработать требования к проектированию сейсмостойких больничных помещений. По рекомендации этого комитета в Калифорнии начались исследования по оценке сейсмического риска в районах расположения уже существующих и проектируемых больниц Управления ветеранов; эти исследования были позднее распространены на другие сейсмичные области. Из 168 больниц, принадлежащих этой организации, 68 находятся в районах, где известны разрушительные последствия умеренных или сильных землетрясений. Были



приглашены консультанты для изучения геологического и сейсмического риска, и впервые в истории Управление ветеранов решило установить во всех больницах этих районов акселерометры для записи сильных колебаний при будущих землетрясениях.

Исследования по оценке пригодности мест, в которых располагались больницы, показали, что в Калифорнии значительное число старых больничных зданий Управления ветеранов не выдержит землетрясения даже умеренной интенсивности. В результате одни из непрочных зданий были освобождены, другие начали реконструироваться, а обширные помещения лечебного центра Уодсворт в Лос-Анджелесе были снесены.

Были разработаны и включены в специальный справочник Управления ветеранов (H-08-8) новые стандарты сейсмостойкого строительства. Они требуют прежде всего проводить оценку характеристик сильных колебаний грунта на участке строительства, используя геологические, геофизические и сейсмологические методы. Требуется также оценка наибольшей величины горизонтальных колебаний, которые могут возникнуть в течение срока службы больницы, и эта величина определяет тип конструкции здания больницы.

Другое требование заключается в том, чтобы важнейшие помещения и оборудование больницы оставались после землетрясения в работоспособном состоянии. В срочном случае необходимо ввести в действие оборудование, которое позволило бы больнице не только продолжать лечение своих собственных пациентов, но и обслуживать район в период после землетрясения.

Немногим проблемам сохранения работоспособности оборудования при землетрясении было уделено столько внимания, как проектированию самого здания. Это оказалось очень сложной задачей, в которую входит и сохранение таких жизненно важных линий, как электропроводка от аварийных генераторов, и обеспечение непрерывной работы системы кондиционирования воздуха, водоснабжения, системы дезинфекции воды, санитарной службы, а также обеспечения возможности проведения важнейших медицинских процедур. Управление ветеранов распорядилось, чтобы нормальное водоснабжение больницы включало два независимых соединения с местным водопроводом, а также аварийные резервуары, которые могли бы обеспечить водоснабжение больницы. Эти резервуары должны быть расположены близко к зданиям больницы, с тем чтобы свести к минимуму уязвимость линий водоснабжения при землетрясениях.

**Исследование места строительства ядерного реактора в районе Пойнт-Арена, Калифорния.** В настоящее время во многих

странах значительную часть энергии производят атомные электростанции. Ввиду особого характера ядерных реакторов размещение и проектирование таких сооружений выполняются, как правило, под строгим правительственным контролем, с тем чтобы атомная электростанция могла работать без ненужного риска для здоровья и безопасности населения.

Комиссия ядерного планирования разработала сейсмические и геологические принципы выбора мест для ядерных реакторов в США. Эта работа выполнялась в несколько этапов в течение ряда лет. Энергетическая компания (заявитель), желающая добавить атомную электростанцию к своей системе, должна провести исследование по выбору места, которое удовлетворяло бы требованиям размещения реакторов. Помимо использования своих собственных сотрудников Комиссия ядерного планирования США заключает договоры о консультациях с геологами, сейсмологами и инженерами, с тем чтобы бюро, выдающее лицензии на строительство, могло тщательно проверить результаты исследования, проведенного заявителем. Конечно, при такой проверке часто возникают серьезные споры между группами, настаивающими на различных оценках выбранного места. Заинтересованные представители общественности имеют возможность получить нужные сведения.

Эту процедуру можно показать на примере краткого рассмотрения заявки, поданной компанией «Пасифик гэс энд электрик» на лицензию для строительства ядерного реактора в одном из районов побережья северной Калифорнии вблизи города Пойнт-Арена (фиг. 1.3). Этот прибрежный район, находящийся на сравнительно мало населенной территории, расположен в 8 км от главной линии разлома Сан-Андреас, который был здесь активен в течение всего позднего кайнозоя и по которому в этом районе произошла подвижка во время землетрясения 1906 г.

В США основной задачей при выборе места строительства считается установление силы двух прогнозируемых землетрясений: 1) того, при котором осуществима *безопасная остановка* станции (safe shut-down earthquake), и 2) того, при котором еще возможно *продолжение работы* (operating-basis earthquake).

Прогнозирование землетрясения, при котором можно безопасно остановить станцию (прежде в документах Комиссии ядерного планирования оно именовалось *основным расчетным землетрясением* — design-basis earthquake), основано на оценке максимальной энергии возможного землетрясения с учетом региональных и детальных геологических и сейсмологических данных и механических свойств местных грунтов. Конструкции здания электростанции и составных элементов реакторной установки должны быть спроектированы так, чтобы при максималь-

ных колебательных движениях, вызванных землетрясением, они остались бы целы. Необходимо обеспечить: 1) целостность стенков, удерживающих давление внутри реактора, 2) возможность выключить реактор и держать его в безопасном выключенном состоянии, 3) возможность предотвратить несчастные случаи или уменьшить их последствия при высвобождении радиации.

Землетрясение, при котором возможно продолжение работы, — это менее тяжелое землетрясение, которое, согласно региональным и локальным геолого-сейсмическим данным и учитывая местные грунтовые условия, вполне может произойти в районе электростанции в течение срока ее службы. Все узлы атомной электростанции, необходимые для продолжения ее работы, должны быть сконструированы так, чтобы при колебательных движениях, вызванных таким землетрясением, они остались бы *в работоспособном состоянии*.

Согласно этому представлению, землетрясение первого из указанных типов (с максимальной возможной интенсивностью) вполне может вывести реактор из строя и причинить некоторые повреждения, но *системы безопасности*, необходимые для предотвращения катастрофы, сохраняются в исправности. С другой стороны, землетрясение второго типа (менее интенсивное, но более вероятное) не обязательно прервет работу станции, но после землетрясения может возникнуть необходимость специального обследования и проверки. Интенсивность землетрясения, при которой станция должна продолжать работать, всегда берется такой, чтобы максимальное ускорение было не меньше половины того, которое ожидается при землетрясении такой силы, когда возможно уже только безопасное выключение станции.

Участок, предложенный для строительства электростанции Пойнт-Арена, сложен миоценовыми породами, которые смяты в складки, раздроблены и расланцованы, поэтому были приняты очень детальные полевые геологические исследования возможности будущего коробления, смятия, наклона, поднятия или опускания пород выбранного района и вероятности образования там разрывов. В целом геологические исследования показали, что образование разрывов на этой площади было ограничено в голоцене зоной разлома Сан-Андреас. Однако обширные морские геофизические работы, проведенные вдоль побережья, указали на существование линеаментов и разрывов на морском дне и тем самым поставили новые вопросы, которые оказались трудно разрешимыми с точки зрения геологической опасности.

Как показывают геологические данные и материалы сейсмической истории, на оценку силы самых интенсивных сейсмических колебаний, ожидаемых в выделенном районе, решающее

влияние оказывает возможность близкого землетрясения с очагом на разломе Сан-Андреас. Интенсивность таких колебаний рассчитана с помощью ряда независимых методов, среди них: теоретическое моделирование подвижки по разрыву, анализ затухания сейсмических волн в породах того типа, который развит между участком строительства и линией разлома Сан-Андреас, оценка вероятной интенсивности колебаний на этом участке при землетрясении 1906 г.

Например, согласно заниженной оценке, основанной на интенсивности землетрясения в Сан-Франциско (6 км от разлома Сан-Андреас) в 1906 г., интенсивность ожидаемых сотрясений составляет VIII — IX баллов по шкале ММ. Если эта интенсивность берется как расчетная для землетрясения, при котором станция должна продолжать работать, то по кривой Неймана (фиг. 1.8) можно установить соответствующее пиковое ускорение, которое составит приблизительно 0,33 g. Эта величина согласуется со значением пикового ускорения в 8 км от очага средней интенсивности (кривая II на фиг. 1.10).

Перед тем как принять окончательное решение о достоверности сейсмологической оценки, бюро лицензий тогдашней Комиссии по атомной энергии указало компании «Пасифик гэс энд электрик», что имеются сомнения по поводу того, можно ли установить активность разрывов, проходящих вблизи выбранного участка под морским дном. Соответственно 3 июня 1972 г. компания «Пасифик гэс энд электрик» взяла назад свою заявку, но решила довести до конца геологические исследования.

**Исследование по программе строительства Аляскинского нефтепровода.** Гораздо большие споры вызвало изучение геологического риска, проведенное в 1970—1974 гг. по проекту Транс-аляскинского нефтепровода. Эта магистраль не относится к самым длинным в мире, но тем не менее это крупный проект, выполняемый в условиях Арктики; трасса пересекает три горных хребта, многие реки и русла временных водотоков, проходит через сейсмически активные области. Нефтепровод рассчитывается на транспортировку 2 млн. баррелей нефти (0,3 млн. т) в день на расстояние 1260 км — от северных берегов Аляски в Валдиз, незамерзающий порт в одной из бухт залива Принс-Вильям (фиг. 1.2).

Проект встретил упорное сопротивление ряда организаций, занимающихся проблемами окружающей среды, на том основании, что нефтепровод может нанести непоправимый ущерб животному миру (например, стадам оленей-карибу) и растительности региона, нарушит экологическое равновесие (вызовет оттаивание вечномёрзлой тундры, загрязнение ее нефтью и т. д.). С другой стороны, существует срочная необходимость

построить эту магистраль, чтобы обеспечить США топливом (эта необходимость теперь оказалась гораздо острее, чем тогда предполагали). Решение о допустимом уровне риска было трудным делом, так как детальных сведений о геологическом строении не было, а плотность населения вдоль трассы нефтепровода была низкой.

С геологической точки зрения нефтехранилища и насосные устройства будут находиться в различных сейсмических условиях; там, где трасса пересекает активные тектонические разрывы, нефтепровод будет испытывать сотрясения, там же могут происходить смещения пород земной коры. При проектировании необходимо также учесть опасность обрушения горных пород, поддерживающих нефтепровод, опасность разжижения грунта, опасность оползней, а также опасность оттаивания поверхностного слоя вечной мерзлоты, приводящего к ухудшению технических характеристик основания и образованию зоны водонасыщенных грунтов над нерастаявшей мерзлотой.

Южный конец нефтепровода у порта Валдиз должен быть оборудован нефтехранилищами, доками и приспособлениями для перекачивания нефти в танкеры. Портовые сооружения необходимо сконструировать так, чтобы они могли противостоять цунами, сейсмическим сотрясениям и пожарам.

Для трассы не было детальных геологических карт, поэтому были проведены полевые исследования с использованием специально выполненной аэрофотосъемки. Были проанализированы имеющиеся сейсмологические данные и установлена частота возникновения землетрясений на разных отрезках трассы. Положение и глубина очагов землетрясений сопоставлялись с общей тектоникой Аляски (фиг. 1.2).

В своей средней части нефтепровод должен пересечь четыре крупных активных разлома: Денали, Макгиннис-Глейшер, Доннелли-Дом и Клируотер-Лейк. В каждом случае конструкция нефтепровода должна обеспечить его сохранность и работоспособность при возможных подвижках по разломам. Длина трех последних разломов не превышает 80 км. По большому правостороннему сдвигу Денали (длиной 1500 км) отмечено многометровое смещение за голоцен, но за последние несколько сотен лет смещение было, очевидно, небольшим. Таким образом, осторожность требует предположить, что здесь может произойти подвижка примерно на 5 м. Это соответствует возможности землетрясения с магнитудой 8,0—8,5 (табл. 1.3). Следовательно, для этого отрезка трассы величина расчетного ускорения грунта должна быть принята большей, чем для других отрезков. В качестве верхнего предела для расчетов следует принять пиковое ускорение на твердом грунте, равное 0,8 g (фиг. 1.10).

После того как вся трасса нефтепровода была разделена на отрезки, для каждого из которых сила ожидаемых сейсмических сотрясений была принята одинаковой, можно было оценить магнитуду расчетного землетрясения на каждом таком отрезке. Например, на 150-километровом участке трассы, проходящем по северному краю сейсмического пояса, который протягивается от залива Кука до города Фэрбенкс (фиг. 1.2), сильнейшее известное землетрясение — это землетрясение 1937 г. (с магнитудой 7,3), эпицентр которого расположен примерно в 50 км к юго-востоку от Фэрбенкса. Максимальная интенсивность (VIII баллов по модифицированной шкале Меркалли) была отмечена в районе с редким тогда населением. Из Фэрбенкса сообщалось только о незначительном ущербе. Полевые геологические работы на 30-километровом участке трассы в районе Фэрбенкса не выявили поверхностного выражения какого-либо активного разрыва.

Ясно, что такие ограниченные исторические данные никак нельзя считать статистически оптимальными, и их трудно использовать для суждения о сейсмическом риске в будущем. Необходимо так или иначе учесть повторяемость землетрясений, предполагаемое расстояние их эпицентров от нефтепровода и вероятную глубину их очагов. Надо обратить также внимание на тип сооружений, которые подвергнутся сотрясениям, на плотность населения, на популяции диких животных. Учтя все это, можно дать предварительную оценку расчетного землетрясения для фэрбенкского участка трассы: его магнитуда (для расчетного срока 100 лет) будет не больше 7,5, а эпицентр может оказаться, скажем, в 20 км от нефтепровода. Из этого, по фиг. 1.10, можно заключить, что на твердых грунтах вблизи нефтепровода пиковое ускорение высокочастотных колебаний с 90%-ной вероятностью будет в интервале от 0,3 до 0,5 g. Среднее пиковое ускорение, которое потребуется учесть в расчетах (если будет решено принять такие строгие меры предосторожности), составит приблизительно 0,40 g.

**Обычные жилые дома.** Жилища людей в сейсмичных районах бывают очень разными: от построек из необожженной глины и домов со стенами набивной конструкции, широко распространенных в Латинской Америке и на Ближнем Востоке, до деревянных каркасных жилищ Новой Зеландии и Калифорнии и легких дощатых домов Японии. Большое число погибших при исторических землетрясениях обычно было следствием как плохой конструкции жилищ, так и плохого качества постройки. Как уже отмечалось (раздел 1.2), гибель многих из 830 тыс. жертв Великого китайского землетрясения 1556 г. связана с обрушением лёссовых пещер, служивших жилищами.

Даже сегодня во всех сейсмически активных странах можно найти жилые дома такой постройки, что они легко разрушаются при землетрясениях. При землетрясении Дашти-Баяз (Иран) 31 августа 1968 г., происшедшем в районе, где и типичные жилые дома, и торговые лавки представляли собой одноэтажные строения из сырой глины без какой-либо опоры, но с массивной выпуклой крышей, было разрушено более 12 тыс. домов, от 7 до 12 тыс. человек погибли и 60 тысяч осталось без крова. В Турции за последние десятилетия очень много людей погибло при землетрясениях вдоль Анатолийского разлома часто из-за того, что в этих районах на крышах деревянных домов, как правило, лежат тяжелые камни, предохраняющие их от сильных ветров. В Калифорнии люди гибли раньше, как правило, из-за того, что строили каменные дома без металлической арматуры. Например, при землетрясении 1906 г. произошло почти одинаковое разрушение домов каменной и кирпичной кладки в городах Сан-Хосе, Лос-Банос и Санта-Роза, причем в последнем было найдено много погибших — 61 человек. В следующем ниже перечне мы укажем некоторые правила, полезные для уменьшения опасности разрушения для типичных небольших частных домов при землетрясении. Применимость этих правил зависит от характера местности и типа домов.

1. Фундаменты и открытые цоколи домов должны иметь прочные поперечные распорки (фото 1.7). Для деревянных каркасных домов очень важна внутренняя обшивка листами фанеры.

2. Необходимо следить за тем, чтобы балки основания и стойки не были повреждены сухой гнилью или термитами.

3. Крыши и перекрытия должны быть настолько легкими, насколько это позволяет климат.

4. Во всех типах оснований должны быть использованы поперечные балки.

5. В каждом доме должен быть по крайней мере один огнетушитель.

6. Санитарное и осветительное оборудование и тяжелая мебель должны быть прикреплены к стенным стойкам.

7. Газовые печи в подвалах и в других местах должны быть прикреплены к стенкам.

8. Все трубы и другие коммуникации в домах (особенно водопровод) должны иметь гибкие соединения с внешними магистралями.

Конечно, специальные инженерные меры предосторожности при строительстве сильно различаются от страны к стране в зависимости от стиля, имеющихся строительных материалов и размеров зданий. В одном из исследований ЮНЕСКО была дана оценка дополнительной стоимости сейсмостойких домов

для одной семьи: в районах со средним уровнем сейсмичности это удорожание составляет около 4%, в районах сильных землетрясений — 10—15%. Такое увеличение стоимости домов может оказаться не всем по карману.

## Список литературы

1. *Adams R. D. and others*, Preliminary Report on the Inangahua Earthquake, New Zealand, May 1968, New Zealand, D. S. I. R., Bulletin **193**, 1968.
2. *Algermissen S. T.*, Seismic Risk Studies in the United States, Fourth World Conf. Earthquake Engineering Chile, 1969.
3. *Algermissen S. T., Perkins D. M.*, A probabilistic Estimate of Maximum Acceleration in Rock in the Contiguous United States, U. S. Geological Survey Report 76—416, 1976.
4. *Anon*, The Great Alaska Earthquake of 1964, Seismology and Geodesy, Committee on the Alaska Earthquake, Washington, D. C., National Academy of Sciences, 1972.
5. *Anon*, Earthquake Guidelines for Reactor Siting, International Atomic Energy Agency, Vienna (available in the United States from Unipub. Inc., P. O. Box 433, New York), 1973.
6. *Anon*, Earthquake Resistant Design Requirements for Veterans Administration Hospital Facilities, Veterans Administration Handbook H-08-8, 1974.
7. *Berringtonhausen W. H.*, Tsunami Reported from the West Coast of South America, Bull. Seism. Soc. Am., **52**, 915—921 1962.
8. *Bolt B. A.*, Duration of Strong Ground Motion, Fifth World Conf. Earthquake Engineering, Rome, 1973.
9. *Bolt B. A.*, Nuclear Explosions and Earthquakes, The Parted Veil, San Francisco, W. H. Freeman, 1975.
10. *Bolt B. A.*, Earthquakes, A Primer, San Francisco, W. H. Freeman, 1977.
11. *Cloud W. K., Perez V.*, Strong Motion Records and Acceleration, Fourth World Conf. Earthquake Engineering, Chile, 1969.
12. *Coffman J. L., Von Hake C. A.*, eds, Earthquake History of the United States, Revised Edition, through 1970, Publication 41-1, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, 1973.
13. *Davison C.*, Great Earthquakes, London, T. Murby, 1936.
14. *Despeyroux J. and others*, The Skopje Earthquake, 1963, UNESCO, 1968.
15. *Gubin I. E.*, Earthquakes and Seismic Zoning, Bull. Int. Institute of Seismology and Earthquake Engineering, **4**, 107—126, 1967.
16. *Gutenberg B., Richter C. F.*, Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, Princeton Univ. Press, 1954. (Имеется русский перевод: *Б. Гутенберг, Ч. Рихтер*, Сейсмичность Земли, ИЛ, М., 1948.)
17. *Hershberger J.*, A Comparison of Earthquake Acceleration with Intensity Ratings, Bull. Seism. Soc. Am., **46**, 317, 1956.
18. *Housner G. W.*, Strong Ground Motion, Chapter 4 in Earthquake Engineering, R. L. Wiegel, ed., N. J., Prentice-Hall, 1970.
19. *Idriss I. M., Seed H. B.*, An Analysis of Ground Motions during the 1957 San Francisco Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., **58**, 2013—2032, 1968.
20. *Jahns R. H., Bolt B. A., Clough R. W., Degenkolb H. J., Leps T. M.*, Report of Seismic Advisory Board to the City Council of Redwood City, 2 volumes, April 1972.
21. *Lawson A. C.*, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission, Washington, D. C., Carnegie Institution, 1908.



22. *Медведев С. В.*, Инженерная сейсмология, Госстройиздат, М., 1962
23. *Mickey W. V.*, Reservoir Seismic Effects, The Military Engineer, July — August 1972.
24. *Milne W. G., Davenport A. G.*, Distribution of Earthquake Risks in Canada, Bull. Seism. Soc. Am., **59**, 729—754, 1969.
25. *Newmark N. M., Rosenblueth E.*, Fundamentals of Earthquake Engineering, N. J., Prentice-Hall, 1971.
26. *Nuttli O. W.*, The Mississippi Valley Earthquakes of 1811 and 1812, Intensities, Ground Motion and Magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am., **63**, 227—248, 1973.
27. *Page R. A., Boore D. M., Joyner W. B., Coulter H. W.*, Ground Motion Values for Use in the Seismic Design of the Trans-Alaska Pipeline System, Washington, D. C., Geological Survey Circular **672**, U. S. G. S., 1972.
28. *Richter C. F.*, Elementary Seismology, San Francisco, W. H. Freeman, 1958. (Имеется русский перевод: *Ч. Рихтер*, Элементарная сейсмология, ИЛ, М., 1963.)
29. *Rothé J. P.*, Fill a Lake, Start an Earthquake, New Scientist, **11**, 75—78, 1968.
30. *Schnabel P. B., Seed H. B.*, Accelerations in Rock for Earthquakes in the Western United States, Bull. Seism. Soc. Am., **63**, 501—576, 1973.
31. *Vitaliano D. B.*, Legends of the Earth, Indiana Univ. Press, 1973.
32. *Whitham K., Milne W. G., Smith V. E. T.*, The New Seismic Zoning Map for Canada, 1970 edition, The Canadian Underwriter, June 15, 1970.
33. *Wiegel R. L.*, ed., Earthquake Engineering, N. J., Prentice-Hall, 1970

# ГЛАВА 2

## ОПАСНОСТЬ

### ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

#### 2.1. Введение

Вулканическое извержение — это одно из самых неистовых, эффектных и внушающих трепет явлений природы. Поэтому неудивительно, что с незапамятных времен вулканы действовали на воображение человека, иногда вызывая в нем ужас, иногда религиозное почитание, иногда эстетическое ощущение красоты и всегда уважение.

Грозные силы, заключенные в вулканах, и очевидная неотвратимость извержений обычно порождали чувство фатальной неизбежности: вулкан поступит так, как ему заблагорассудится, и с ним не поспоришь! Очень, очень редко осмеливались люди испытывать какие-либо способы, чтобы повлиять на поведение вулкана, кроме как жертвоприношения или другие религиозные действия. Однако сегодня мы приходим к убеждению, что есть более эффективные средства, которые можно использовать. Мы уже умеем ослаблять или предотвращать некоторые разрушительные явления, вызванные вулканической деятельностью, а дальнейшее накопление знаний и опыта позволит нам делать еще больше. Более того, мы теперь сознаем, что *должны* научиться избавлять человечество от катастрофических последствий деятельности вулканов.

Миллионы людей живут рядом с действующими вулканами, над этими людьми постоянно тяготеет опасность вулканической



Фото 2.1. Вулкан Майон, Филиппины.

На первом плане—город Легаспи. Вулкан Майон славится как самый симметричный в мире вулканический конус, и он, так же как все другие, таит в себе смертельную угрозу.

катастрофы (фото 2.1), но они и дальше будут жить там. Подсчитано, что за последние 500 лет в результате деятельности более 500 наземных вулканов погибло примерно 200 тыс. человек (см. приложение В). Одни были убиты непосредственно при извержении, другие умерли от голода после уничтожения посевов и гибели скота. Сюда не включено несколько десятков тысяч погибших в результате «приливных волн» (т. е. цунами; см. гл. 3), вызванных вулканическими извержениями. В 1902 г. на острове Мартиника (Малые Антильские острова) вулкан Мон-Пеле за какие-то мгновения полностью уничтожил город Сен-Пьер, погибло около 30 тыс. человек. Если мы хотим избежать таких же, а может быть, и еще более страшных катастроф в будущем, мы должны научиться вовремя предупреждать о готовящейся вспышке вулканической деятельности и должны уметь справляться с результатами этой деятельности.

Мы должны продвинуться еще дальше и научиться прямо использовать вулканы и их энергию. Мы уже заставили работать на себя какую-то часть вулканического тепла в виде природного пара и горячей воды для дешевого производства

электроэнергии и отопления домов, к тому же без загрязнения окружающей среды, но это только очень малая доля всего вулканического тепла, которое мы могли бы использовать.

Хотя в этой главе речь идет в первую очередь об опасной и разрушительной деятельности вулканов, справедливости ради надо сказать, что в прошлом вулканы сделали гораздо больше добра, чем зла. В итоге их надо считать нашими благодетелями. Вулканы создали многие тысячи квадратных километров поверхности суши как на материках, так и в океане в виде океанических островов. Вулканические горы относятся к самым прекрасным созданиям природы и приносят радость и вдохновение многим тысячам путешественников. Среди самых важных, но трудных для человеческого понимания благ, исходящих от вулканов, — атмосфера и водная оболочка Земли, т. е. то, без чего не могла бы существовать и сама жизнь.

Созданные вулканами участки суши не только обширны, но обычно они и очень плодородны, особенно это сказывается в тропиках, где питательные вещества очень быстро выщелачиваются из почвы и выпадающий вулканический пепел восстанавливает ее плодородие. Именно эти плодородные почвы еще более осложняют проблему вулканов, так как они привлекают людей. Так, в Индонезии отмечается тесная зависимость между интенсивностью вулканической деятельности и плотностью сельского населения. Миллионы людей теснятся вокруг подножий действующих вулканов, хотя риск для них вполне очевиден даже без напоминания о том, что только за последние столетия там погибли тысячи людей, а материальный ущерб был огромным. Нельзя найти способ увести людей из этих опаснейших районов, так как урожай, получаемые там на богатых землях, уже имеют жизненно важное значение, и оно становится еще больше в связи с непрерывным ростом мирового населения. Решение проблемы надо искать в том, чтобы научиться жить возле вулкана: предупреждать о времени, характере и месте приближающегося извержения, избегать его воздействия или облегчать его, ускорять восстановление опустошенных земель. Таковы некоторые из практических целей современной вулканологии.

Одна из наиболее важных практических проблем выражается простым вопросом: в каком случае можно считать, что вулкан мертв? Если это действительно *потухший* вулкан, то он больше не опасен, но вулканы могут в течение тысяч лет оставаться «тихими», *дремлющими*, а затем снова возобновить свою деятельность, и часто извержение, знаменующее это пробуждение, бывает чрезвычайно сильным. Некоторые из самых разрушительных извержений связаны с оживлением вулканов, не извергавшихся на протяжении всего исторического времени

и, следовательно, не считавшихся *действующими*. Среди них, например, извержение Везувия в 79 г. н. э., извержения вулканов Ламингтон (1951 г.), Безымянного (1956 г.), Ареналь (1968 г.); все они описаны ниже. Часто говорят, что такое пробуждение вулканов непредсказуемо, но в большинстве случаев оказывается, что люди просто не смогли понять его предзнаменований. Например, всем упомянутым выше извержениям предшествовали многочисленные землетрясения (см. раздел 1.3); были, вероятно, и другие признаки. При условии надлежащего размещения измерительных приборов и при условии бдительной, умелой работы специалистов, интерпретирующих их записи, при наличии имеющихся и накапливающихся знаний все эти извержения можно было, вероятно, предсказать хотя бы в общем виде.

Вулканическая деятельность имеет много общих черт во всем мире, но есть и много различий, влияющих на степень опасности и характер разрушений. Чтобы оценить величину риска и возможные разрушения, а также чтобы охарактеризовать методы, которые можно использовать для их уменьшения, обратим вначале свой взгляд на общую природу вулканической деятельности.

## 2.2. Природа и виды вулканической деятельности

**Что такое вулкан?** Вулкан — это то место, где расплавленные горные породы и (или) газы выходят из недр Земли на поверхность. Одни вулканы извергаются только раз, другие — неоднократно. Твердые продукты извержения выходят на поверхность через жерло и нагромождаются вокруг него, образуя холм или гору, которую тоже называют вулканом. Таким образом, термин «вулкан» имеет два несколько различных значения, но в каждом случае смысл его бывает достаточно очевидным.

Отношение количества газа к количеству изливающейся расплавленной горной породы меняется в широких пределах, и характер извержения зависит в основном от количества газа и от того, насколько легко он высвобождается из расплава. Газ может быть полностью растворен в нем, а может находиться там и в виде пузырьков. В расплаве обычно присутствуют также (во взвешенном состоянии) выделившиеся из него кристаллы различных минералов. Эта смесь расплавленной породы, растворенного газа, газовых пузырьков и взвешенных кристаллов называется *магмой*.

Растворимость газа в магме растет с увеличением давления, и на больших глубинах в недрах Земли весь газ или его большая часть находятся в растворенном состоянии. Магма подни-

мается на поверхность в основном с глубины от 40 до 300 км (см. фиг. 1.4). По мере ее подъема уменьшается давление на нее вышележащих пород, и часть газа начинает выделяться из раствора, образуя пузырьки, сначала маленькие и редкие. При дальнейшем подъеме магмы пузырьки растут, их число увеличивается, и они начинают сливаться.

Газ в пузырьках создает давление, но расширяться они не могут: отчасти из-за всестороннего давления, создаваемого магмой, а отчасти из-за ее вязкости. В конце концов давление газа оказывается достаточно высоким, чтобы разорвать жидкую оболочку, и тогда газ высвобождается; при этом, конечно, происходит взрыв, или вулканическая *эксплозия*. Если всестороннее давление невелико, а магма сравнительно жидкая, то пузырьки газа выходят легко, при этом происходит огромное множество очень мелких взрывов, и магма только слегка разбрызгивается на поверхности. Если же выход газа затруднен и давление внутри пузырьков продолжает увеличиваться и если при этом газа много, то его высвобождение происходит в виде мощного взрыва.

Вулканический взрыв, происходящий у самой поверхности, вызывает своего рода «цепную реакцию», при которой резкое расширение газа распространяется на все более глубокие уровни магматического очага. Поверхностный взрыв выбрасывает в воздух самую верхнюю порцию магмы, что уменьшает вес столба магмы, а значит, и его давление на более глубокие горизонты, позволяя находящемуся там газу резко расширяться. Происходящий при этом взрыв уменьшает вес этой порции магмы и так далее. Таким образом, вулканическая *эксплозия* может оказаться не единичным мощным «выстрелом», а длительным неистовым извержением газа, смешанного с магмой. Как правило, такое извержение состоит из серии пароксизмов, каждый из которых продолжается от нескольких секунд до нескольких минут, перемежаясь с периодами затишья длительностью от минут до нескольких часов или даже суток; но при некоторых крупных извержениях отдельные пароксизмы продолжают несколько часов.

Положение осложняется тем, что не весь газ, участвующий во взрывах, выделяется непосредственно из магмы. Часть его представляет собой пар внешнего происхождения, возникающий тогда, когда поднимающаяся магма приходит в соприкосновение с водой либо на поверхности, либо в приповерхностных породах (фото 2.2), а также когда вода получает доступ к горячим затвердевшим породам внутри вулкана. В сильнейших *эксплозиях*, происшедших в 1924 г. на вулкане Килауэа (остров Гавайи), не участвовали ни магма, ни вулканический газ — взрывы были вызваны только тем, что грунтовые воды



Фото 2.2. Лавовые фонтаны и лавовый поток вдоль трещины, которая прошла у самого края деревни Капохо (остров Гавайи) 14 января 1960 г.

Темное облако, поднимающееся от земли в правой части снимка, — это пар с частицами пепла, образовавшийся при соприкосновении магмы с неглубоким горизонтом грунтовых вод. Большая часть деревни и около 400 га обрабатываемых земель позднее были уничтожены растекшейся лавой.

проникли из окружающих пород в горячие трещины, открывшиеся в вулкане. В других случаях, если даже происходит излияние большого количества магмы, такой «внешний» пар может полностью изменить характер извержения. Если жидкая базальтовая магма просто достигает поверхности, то при извержении происходит сравнительно спокойное фонтанирование жидкой лавы и излияние лавовых потоков. Если же такая жидкая базальтовая магма соприкасается с водами океана, как при извержении вулкана Капелиньюш (Азорские острова, 1957 г.) и

вулкана Суртсэй (Исландия, 1963 г.), то возникают сильнейшие взрывы и на землю выпадает ужасающий ливень из брызг магмы. В обоих указанных здесь случаях, как только вулканический конус вырос достаточно высоко и оградил жерло от морской воды, взрывы прекратились и сменились весьма спокойным фонтанированием лавы.

При эксплозивном извержении жидкая лава распадается на клочья, и они выбрасываются в воздух, причем в одних случаях выбрасываются только одни они, в других (как, например, при эксплозиях Килауэа в 1924 г.) — только обломки древних, твердых пород, а во многих случаях — и то, и другое. Выбрасываемый материал, будь то обломки твердой породы или брызги жидкой магмы, сразу выпадает обратно на землю (фото 2.3) или же уносится ветром на разное расстояние, иногда на сотни и даже на тысячи километров. Этот материал называют *пирокластическими* выбросами (буквально — обломки огня) или, короче, *тефрой* (пепел, зола); последний термин введен недавно (взят из работ Аристотеля). Обломки песчаной размерности и более мелкие называют вулканическим пеплом или вулканической пылью; обломки диаметром от 2 до 60 мм называют *лапилли* (от латинского *lapillus* — камешки); обломки крупнее 60 мм — вулканическими *бомбами* или глыбами. Бомбы — куски магмы, выбрасываемые в жидком состоянии; глыбы — угловатые куски твердой породы.

Некоторые бомбы принимают в воздухе округлую или веретенообразную форму. При сильных взрывах бомбы и лапилли выбрасываются достаточно высоко и успевают остыть и затвердеть до такой степени, что сохраняют свою форму и после удара о землю. Однако при более слабых взрывах они обычно еще не успевают затвердеть и, ударяясь о землю, расплющиваются или даже слипаются, образуя так называемые *конусы разбрызгивания*. Многие бомбы и лапилли бывают очень неправильной формы и в них так много пустот, оставленных пузырьками газа, что они похожи на губки. Такие неправильные губкообразные обломки размера бомб или лапиллей называются вулканическим *шлаком* — по их сходству со шлаком или золой, образующимися в печи. Следует, однако, подчеркнуть, что ни вулканический пепел, ни вулканический шлак не являются продуктами горения. *Пемзой* называется вулканический шлак, переполненный пустотами и поэтому такой легкий, что не тонет в воде. И пемза, и другие виды вулканического шлака — это затвердевшая магматическая пена.

От эксплозивных извержений резко отличаются извержения *эффузивные*, при которых бывает мало взрывов и на поверхность выходит преимущественно жидкая магма, называемая *лавой*. Она изливается из жерла и стекает по склонам, образуя





Фото 2.3. Район в 4 км к западу от вершины вулкана Ареналь (Коста-Рика). Поверхность сильно изрыта воронками от вулканических бомб, падавших в мягкий слой вулканического пепла при извержении 1968 г. В результате выпадения тефры с деревьев (на заднем плане) были сорваны листья и мелкие ветви.

*лавовые потоки* (этот материал, застывший и превратившийся в твердую породу, также называют лавой или лавовыми потоками). Выделяют три главных типа лавовых потоков, хотя имеются и промежуточные типы, и множество разновидностей.

*Лава пахоэхоз* имеет сравнительно гладкую или слегка волнистую поверхность, сморщенную, как складки ткани или кольца каната. Потоки лав пахоэхоз образуются, как правило, при движении жидкой лавы под застывшей коркой по естественным каналам, возникающим в результате постепенного отверде-

вания, идущего снаружи внутрь, когда внешние части потока движутся медленнее, чем внутренние.

*Лава аа* имеет поверхность, состоящую из очень грубых, острых, зазубренных и комковатых обломков, похожих на куски обожженного кирпича. Под этими обломками находится слой массивной породы. В активном (движущемся) лавовом потоке этому слою соответствует текучая тестообразная магма, несущая на себе груз твердых запекшихся обломков. Поток лав аа питается в основном рекой жидкой лавы, текущей по дневной поверхности как бы между двумя дамбами, которые эта река сама и строит, часто переливаясь через край. Эту разницу в механизме формирования лав пахоэхоэ и аа очень важно знать при попытках воздействия на лавовые потоки (этот вопрос обсуждается в одном из следующих разделов).

Третий тип — *глыбовая лава*. По общей текстуре и характеру образования она напоминает лаву аа, но обломки, составляющие ее поверхность, имеют довольно гладкие грани в виде правильных многоугольников и не похожи на острые ребристые шипы.

В целом магма, из которой образуется глыбовая лава, более вязкая, чем та, что образует лавы пахоэхоэ и аа, поэтому потоки глыбовой лавы толще и короче. Потоки лав пахоэхоэ и аа обычно имеют мощность от 2 до 7 м, а в длину протягиваются на десятки километров. Толщина потоков глыбовой лавы часто составляет 15—40 м, а иногда несколько сотен метров; длина их редко превышает 10 км. Потоки лав пахоэхоэ и аа могут двигаться очень быстро. На Гавайских островах обычная их скорость около 300 м/ч, а некоторые потоки движутся со скоростью несколько километров в час. Потоки глыбовых лав обычно продвигаются за день всего на несколько метров.

Некоторые другие типы лав, такие, как подушечные лавы и гиалокластиты, характерны для подводных извержений, не представляют никакой или почти никакой опасности для людей и не рассмотрены в этой книге.

Лавовые потоки движутся так же, как и любая другая жидкость, и соответственно их продвижение подчиняется рельефу, так что если мы знаем, где лава выйдет на поверхность, то можем предсказать, в каком направлении она потечет. Однако из-за ее вязкости и способности быстро застывать образуются частые запруды, лава «выходит из берегов» и даже резко меняет русло.

Более вязкая лава вместо того, чтобы течь от жерла, высоко нагромождается над ним, образуя так называемый *вулканический купол* с крутыми склонами. По мере роста этого купола его внешние части обычно растрескиваются, глыбы легко

отделяются, скатываются вниз и образуют длинные осыпи *брекчий обрушения*. Эти осыпи иногда закрывают более прочную часть купола и придают ему форму усеченного конуса. Купола чаще всего растут в кратере на вершине вулкана, но могут образоваться и на его склоне. Сами по себе купола обычно людям не опасны, но часто с ними связаны смертоносные палящие лавины, о которых сейчас пойдет речь, и, следовательно, появление активного вулканического купола надо считать предупреждением об этой угрозе. Кроме того, купола наиболее характерны для зрелого возраста вулканов и указывают на то, что в магматическом теле под вулканом увеличилась вязкость и, вероятно, возросло содержание газа. Поэтому даже неактивные купола надо считать признаком опасности сильнейших эксплозий.

*Палящие лавины* (glowing avalanches) раньше называли *раскаленные тучи* (от французского nuées ardentes), а теперь иногда используют эквивалент этого названия *палящие тучи*. Их отличительная особенность — громадное, быстро растущее облако пыли, днем черное, а ночью светящееся тусклым красным светом. Теперь мы, однако, знаем, что главное в этом явлении — не облако, а катящаяся под ним лавина раскаленных добела лавовых глыб, песка и пыли. Палящие лавины могут двигаться со страшной скоростью и пройти много километров. В некоторых случаях их скорость превышала 150 км/ч. Движение лавины в общем подчиняется рельефу, и она мчится по долинам водотоков, но вследствие большой скорости и инерции она может взобраться на несколько сотен метров по вертикали, если ее путь преграждает склон холма или изгиб борта долины. Такое поведение лавины указывает на ее большую подвижность, которая обусловлена тем, что составляющие ее блоки и твердые частицы несущейся над ней тучи погружены в расширяющийся газ, и это почти устраняет трение между обломками во время движения. Часть этого газа — захваченный при движении лавины воздух, расширяющийся при нагревании раскаленными обломками. Однако во многих случаях это частично или даже в основном тот газ, который все еще остается между самими обломками. Палящие лавины возникают при различных условиях, рассмотренных в одном из последующих разделов.

*Пепловые потоки* очень похожи по своей подвижности на палящие лавины, и причина такой высокой подвижности, по-видимому, та же самая. Когда вязкая магма приближается к дневной поверхности и достигает ее, в магме может произойти отделение газа в виде множества мелких пузырьков, которые расширяются и превращают магму в своего рода пену — в пемзу. Дальнейшее расширение газа просто вызывает распад этой

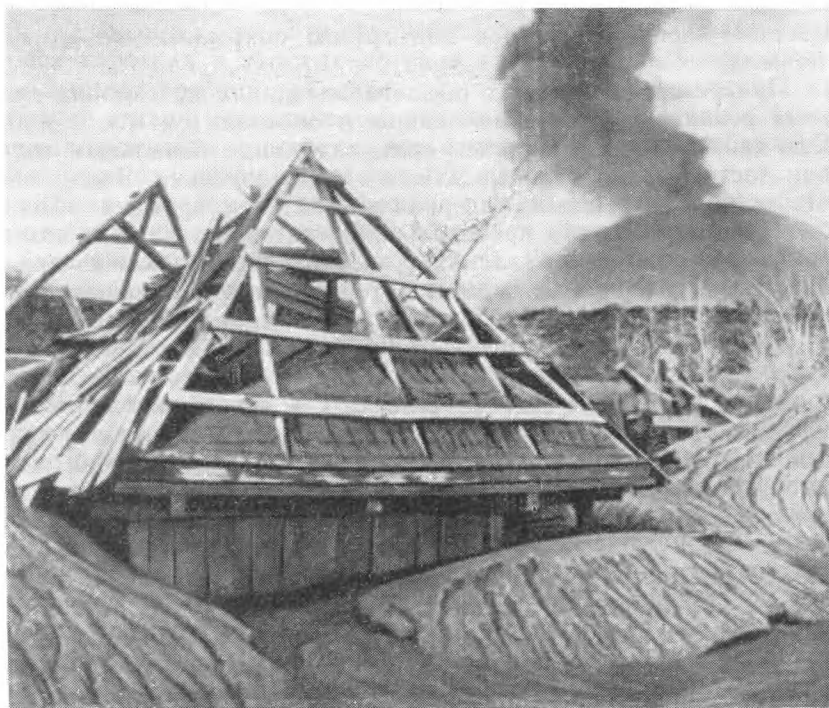


Фото 2.4. Дом на окраине деревни Парикутин (Мексика), засыпанный пеплом в октябре 1944 г.

На заднем плане справа — вулкан Парикутин.

пены на отдельные лоскутки той жидкой пленки, которая раньше разделяла пузырьки. В облаке расширяющегося газа каждый такой жидкий лоскуток быстро затвердевает и становится угловатым кусочком стекла.

В результате образуется аэрозоль, состоящий из газа с частицами очень горячего стекла (пепла) и со случайно сохраняющимися кусками пемзы (см. фото 2.4). Эта туча очень тяжелая, потому что она несет много твердых обломков, а в некоторых случаях, вероятно, еще и потому, что в газе содержится большая доля двуокиси углерода. В результате туча как бы сползает вниз по склону и под действием собственного веса растекается по поверхности земли. При больших извержениях образуются тучи, которые могут преодолевать расстояния до 300 км, причем очень быстро, и в конце своего огромного пути они бывают еще такими горячими, что когда частицы пепла оседают на землю, они слипаются между собой, а внутри этой

массы — крепко спекаются под грузом покрывающего их материала.

При резких подвижках рыхлого материала на склонах вулкана возникают каменные лавины и оползни (см. гл. 4 и 6). Они движутся под действием силы тяжести, а начальным толчком часто бывают сильные дожди и землетрясения. Ввиду того что обильный рыхлый материал на склонах вулкана обычно бывает эксплозивного происхождения, каменные лавины возникают чаще всего на вулканах с эксплозивным типом извержений. Если содержание воды в материале такой лавины увеличивается, она становится грязевым потоком.

*Вулканические грязевые потоки (лахары)* — это, как показывает само их название, смесь твердых обломков, иногда горячих, но чаще всего холодных, с водой. Как и каменные лавины, эти потоки чаще всего возникают на склонах эксплозивных вулканов, где много незакрепленного обломочного материала. Они стекают вниз под действием силы тяжести, и их путь подчиняется топографии склона. В зависимости от крутизны склона и от вязкости грязевого потока его скорость бывает различной и доходит до 90 км/ч; некоторые потоки проходят расстояние до 160 км. Грязевые потоки имеют различное происхождение; этот вопрос освещен в одном из последующих разделов.

Как указывалось раньше, эксплозивный характер извержения связан главным образом с вязкостью выходящей на поверхность магмы и с количеством содержащегося в ней газа. Вязкость является главным фактором, определяющим тип лавовых потоков. Как вязкость, так и содержание газа тесно связаны с химическим составом магмы. В общем случае вязкость магмы возрастает с увеличением содержания кремнезема. Лавы пахоэхэ и аа имеют типично базальтовый состав, они бедны кремнеземом и сравнительно обогащены железом и магнием, тогда как глыбовые лавы обычно представлены андезитами или еще более кислыми породами.

В некоторых районах вулканы содержат магмы более кислого состава, чем в других местах; поэтому извержения в этих районах происходят более эксплозивно, и чаще там образуются толстые потоки и купола глыбовой лавы, а не тонкие потоки лав пахоэхэ и аа. Так, лавы вулканов, окружающих Тихий океан (например, вулканов Каскадных гор, Анд, Японии, Филиппин и Индонезии), имеют в той или иной мере кислый состав и извергаются в виде эксплозий в отличие от спокойных извержений на Гавайских островах и в других преимущественно базальтовых областях. Кроме того, глубинные очаги магмы, питающие вулканы, обычно испытывают со временем изменение состава, и способная извергаться магма обогащается

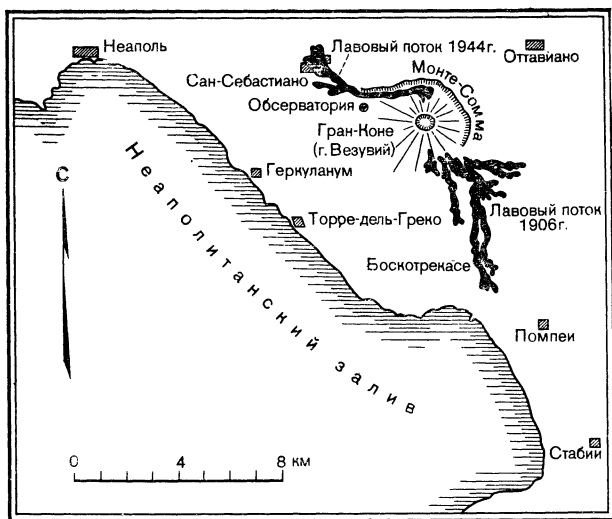
кремнеземом и газом. Эти изменения отражаются в образовании более коротких и толстых потоков и куполов глыбовой лавы, присутствие которой указывает на то, что вулкан находится на поздней стадии магматической эволюции и, следовательно, здесь может произойти мощное эксплозивное извержение с образованием палящих лавин и грязевых потоков.

Таким образом, и химический состав, и физический облик продуктов прошлых извержений служат указанием на то, что можно ожидать от вулкана в будущем. Уже по одной этой причине необходимо проводить тщательное геологическое изучение всех вулканов в тех районах, где они могут представлять опасность для людей.

**Выпадение тефры.** В 79 г. н. э. города, располагавшиеся вокруг Неаполитанского залива, были излюбленным местом отдыха богатых римлян. В западной части побережья (на месте нынешнего города Резина) на пологом склоне гигантской конической горы лежал город Геркуланум, а южнее, у юго-восточного подножия горы, располагался город Помпеи. Еще в 5 км к югу, в начале полуострова Сорренто, находился город Стабии (см. фиг. 2.1). Коническая гора известна теперь как вулкан Везувий, но его современная форма сильно отличается от той, какой она была до 79 г.

Сегодня «Гран-Конс» — большой конус Везувия — окаймлен лугоколючевым хребтом, который называется Монте-Сомма; но в 78 г. н. э. и раньше склоны горы имели правильную форму и высоко воздымались, образуя единый конус. На довольно плоской вершине находился кратер — с крутыми стенками, сильно заросший. Люди догадывались, что это вулкан, но за всю долгую историю жизни римлян, а до них еще и этрусков не осталось упоминаний о его извержении, так что люди всегда считали его потухшим. Но как и многие другие «мертвые» вулканы, это был затаившийся убийца!

Начиная примерно с 63 г. в окрестностях горы отмечались частые землетрясения (см. раздел 1.3). Обладая нашими современными знаниями, мы распознали бы, возможно, признаки приближающегося извержения, но весной 79 г. никто ничего такого не знал. Долгий сон Везувия прекратился внезапно — 24 августа. Об этом рассказал Плиний Младший в письмах к Тациту, римскому историку. Хотя Плиний Младший излагал в своих письмах в первую очередь обстоятельства смерти своего дяди, известного естествоиспытателя Плиния Старшего, эти письма содержат изумительно четкое повествование об извержении Везувия и обычно считаются первым научным описанием вулканического извержения — первым документом науки



Фиг. 2.1. Карта окрестностей Везувия.

Показаны лавовые потоки 1906 и 1944 гг. и расположение городов, уничтоженных при извержении 79 г. н. э.

вулканологии. Таким образом, и это неудивительно, история вулканологии начинается с трагедии.

В 79 г. Плиний Старший командовал одним из римских флотов, стоявшим в Мизенуме (теперь мыс Мизено) на северо-западе Неаполитанского залива. Его сестра и племянник жили вместе с ним. Около 13 часов 24 августа сестра обратила его внимание на огромную тучу, поднимавшуюся на востоке. Туча имела форму итальянской сосны — пинии: стройный тонкий «ствол», поднимавшийся почти вертикально, растекался вверх в широкую, почти плоскую «крону». (Сегодня мы сравнили бы эту тучу с «грибом» атомного взрыва.)

Преисполненный жаждой научного познания, Плиний приказал немедленно снарядить корабль, который доставил бы его на место, откуда он смог бы ближе увидеть происходящее. Он предложил племяннику поехать с ним, но мальчик был сильно увлечен своими занятиями, к большому счастью для нас, иначе отчет об извержении никогда не был бы написан! Когда Плиний уже был готов отправиться в путь, он получил послание от друзей, живших у подножия Везувия. Друзья просили о помощи. Изменив свой план, Плиний приказал, чтобы его боевые галеры вышли в море и спасли людей, живущих в городах по берегу залива, а сам направился прямо к вулкану. По мере приближения на корабль во все возрастающем количестве стал

сыпаться горячий пепел, кусочки пемзы, а затем обрушился целый ливень «черных кусков раскаленного камня».

Его продвижение было остановлено тем, что море внезапно отступило от берегов. (Теперь мы знаем, что такое отступление моря, вызванное поднятием берега и соседних частей морского дна, сопровождает почти все извержения Везувия.) Не сумев добраться до старого берега у подножия Везувия, Плиний повернул на юго-восток и поплыл к Стабиям, где находился его друг Помпониан. Последний, чувствуя беду, уже погрузил свое имущество на стоявший там корабль и готов был бежать из этих мест, но ветер дул с моря и корабль не мог отойти от берега. Помпониан встретил Плиния «в величайшем страхе».

Пытаясь, очевидно, успокоить Помпониана и других, Плиний искупался, поужинал и удалился спать. Пепел и пемза продолжали сыпаться, и во дворе дома его накопилось столько, что вскоре Плиний не смог бы уже выбраться оттуда. Поэтому его разбудили, и было решено бежать на открытое место, привязав на головы подушки для защиты от падающих обломков пемзы. Хотя уже настал день, было темно, как в самую темную ночь. Добравшись до берега, они обнаружили, что волны все еще слишком высоки и выйти в море нельзя. Плиний — он был очень тучен — прилег отдохнуть, но, как пишет его племянник, «...языки пламени, вырвавшиеся из клубов серы, разметали его спутников и принудили его подняться. С помощью двух слуг он встал, но вдруг упал замертво...». Племянник полагает, что Плиний задохнулся, и это вполне возможно, учитывая, что на людей, страдающих астмой, серные газы оказывают очень сильное действие; но столь же возможно, что он умер от рокового сердечного приступа. Только через три дня мрак несколько рассеялся, и тогда смогли найти его тело.

В Стабиях выпало столько пепла и обломков пемзы, что дворы домов были почти полностью засыпаны. Ближе к вулкану, в Помпеях, обломки были несколько крупнее, и их слой достиг толщины около 3 м. Город был целиком погребен. Погребен был и Геркуланум, но это произошло иначе, о чем будет рассказано позже. Большинству из 20 тыс. человек, живших в Помпеях, удалось спастись. Немного найдено остатков лошадей или повозок, и похоже, что большинство людей бежали на ранних стадиях извержения. Сохранились останки около двух тысяч человек: иногда скелеты, а часто удивительно четкие слепки тел и одежды в окружающем вулканическом пепле. Как они умерли? Кто-то из них был раздавлен крышей, рухнувшей под тяжестью насыпавшегося на нее пепла, другие не смогли выйти из засыпанных домов и погребов. Некоторые задохнулись, так как если при этом и был какой-то доступ воздуха, то в нем уже не осталось кислорода, некоторые умерли, прижимая



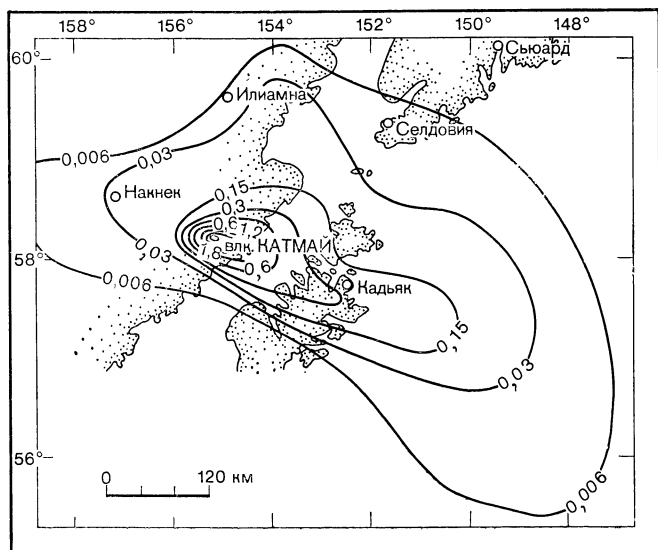
к лицу руки или куски ткани, как бы загораясь от едкого дыма. Нижние 2,5 м отложений тефры состоят главным образом из кусочков пемзы размером от 5 до 15 мм, и после отложения этой пемзы из нее могло выделиться столько газа, что люди умерли от удушья. Свидетельств пожара мало: пепел и обломки пемзы, пролетевшие достаточно большое расстояние по воздуху, редко бывают такими горячими, чтобы вызвать огонь.

Когда извержение закончилось и мрак рассеялся, оказалось, что вся вершина горы исчезла. На ее месте была громадная яма шириной 3 км, которую мы называем *кальдерой* (кальдера по определению — это кратер с поперечником более 1,5 км). В материале, выброшенном при извержении, настолько мало обломков пород бывшей верхней части горы, что совершенно ясно, что вершина не разлетелась при взрыве на куски: извержение привело к удалению жидкой магмы, поддерживавшей вершину, и та провалилась. Через 93 года произошло другое извержение, затем на протяжении последующих веков их было еще много, и в результате внутри кальдеры постепенно вырос современный конус Везувия.

Многие из тех явлений, которые описаны в Помпеях, наблюдались и при других извержениях. В июне 1912 г. чудовищной силы извержение произошло на Аляске, на горе Катмай и около нее. Помимо хорошо известного результата этого извержения — пеплового потока, заполнившего долину, которая называется теперь Долиной Десяти Тысяч Дымов (она описана ниже), — более 16 км<sup>3</sup> пепла и пемзы было выброшено в воздух и выпало затем каменным дождем на окружающие земли и на океан. Вблизи вулкана толщина слоя пепла превысила 15 м; в Кадьяке — в 160 км к юго-востоку — слой пепла достиг толщины около 3 м (см. фиг. 2.2).

Извержение началось после полудня 5 июня, а утром 6 июня жители Селдовии (в 240 км от вулкана) слышали несколько взрывов. Самая мощная часть извержения началась около 13 часов 6 июня и продолжалась два с половиной дня. Крупнейшие взрывы произошли около 15 и 23 часов 6 июня и в 23 часа 7 июня; их слышали в Джуно, на расстоянии 1200 км.

Довольно сильное извержение продолжалось несколько недель, а более слабые взрывы происходили время от времени в течение нескольких месяцев. Около 17 часов 6 июня в Кадьяке увидели черную тучу, надвигающуюся с северо-запада; слышались необычные раскаты грома, сверкали молнии. Туча росла, и к 18 часам 30 минутам она совершенно затмила дневной свет. Пепел падал всю ночь, и к 9 часам 7 июня образовался слой толщиной 10 см. Радиопередатчик на катере береговой охраны «Маннинг», находившемся в кадьякском доке,



Фиг. 2.2. Карта толщины (в метрах) слоя пепла, выпавшего при извержении вулкана Катмай (Аляска) в 1912 г. [33].

нельзя было включить из-за сильнейших электростатических разрядов, а радиостанция на берегу была испорчена молнией. (Такие нарушения радиосвязи обычны при эксплозивных извержениях.) Капитан «Маннинга» писал, что на берегу все ручьи и колодцы были занесены пеплом, и воду для жителей пришлось доставлять на «Маннинге» и еще на одном судне.

Днем, после передышки, продолжавшейся несколько часов, пепел начал падать снова; к 13 часам стало так темно, что видимость упала до 15 м, а к 14 часам наступила непроглядная тьма. Весь остаток дня и все следующее утро падала такая густая пыль, что зажженную лампу не было видно на расстоянии вытянутой руки; временами появлялся запах серы и было слышно, как с окрестных холмов срываются лавины пепла. Ощущались частые землетрясения; население городка было в панике. Людям оказывалась помощь на борту «Маннинга» и в одном из сараев, находившихся рядом с причалом. В 14 часов 30 минут 8 июня пепел стал падать реже, небо стало красноватым и постепенно видимость улучшилась. 9 июня люди смогли разойтись по домам.

Выпавший в Кадьяке пепел образовал слой толщиной 25 см и заглушил всю мелкую растительность. Из-за того что трава была уничтожена, скот пришлось вывезти, а вернуть его удалось только через 2 года, когда возродились пастбища.

Крупные деревья выжили. На хвойные деревья тяжесть выпавшего пепла оказала немного большее действие, чем нормальный груз зимнего снега, и они быстро стряхнули с себя большую часть нагрузки. Широколиственные же деревья, как правило, ломались под тяжестью пепла.

Обычный результат эксплозивных извержений — это загрязнение источников воды падающим пеплом. При извержении вулкана Ирасу (Коста-Рика) в 1963 г. тонкие частицы пепла, взвешенные в речной воде, засорили фильтры водопроводной станции города Сан-Хосе. Пепел, смываемый с улиц города, забил стоки, что вызвало в тот дождливый сезон местные наводнения.

На картах распределения пепла и пемзы при извержениях Везувия в 79 г. и Катмая в 1912 г. (фиг. 2.2) хорошо видно, какое влияние оказывает направление ветра. Во время извержения Везувия большая часть пепла сносилась на юго-восток; на северном склоне горы выпадение было небольшим. Пепел Катмая двигался главным образом на восток-юго-восток. На острове Кадьяк его выпало около 30 см, а на таком же расстоянии с другой стороны от вулкана вдвое меньше. Совершенно ясно, что направление ветра является важнейшим фактором, определяющим ущерб от падающего пепла в каждой данной точке. То же самое наглядно проявилось, когда извергался Спер — другой аляскинский вулкан. Извержение началось около 5 часов утра 9 июля 1953 г. Взрыв произошел не на вершине горы (выс. 3375 м), а в боковом жерле, на высоте 2100 м. Образовалось грибовидное облако высотой 15—20 км, и пепел выпал в Анкоридже, в 130 км к востоку. В Анкоридже слой пепла имел толщину от 3 до 7 мм, а к западу от горы пепла было совсем мало.

Поскольку направление ветра обычно бывает различным в разные сезоны и часто в верхних слоях атмосферы оказывается не таким, как в нижних, количество выпадающего пепла и причиняемый им ущерб зависят в каждой данной точке от того, в какое время года происходит извержение, и от силы извержения, т. е. от того, на какую высоту выбрасывается пепел: на высоту 12 км и более или только в нижние слои атмосферы. Все эти факторы необходимо учитывать, предсказывая возможный ущерб от выпадения пепла при извержении каждого отдельного вулкана.

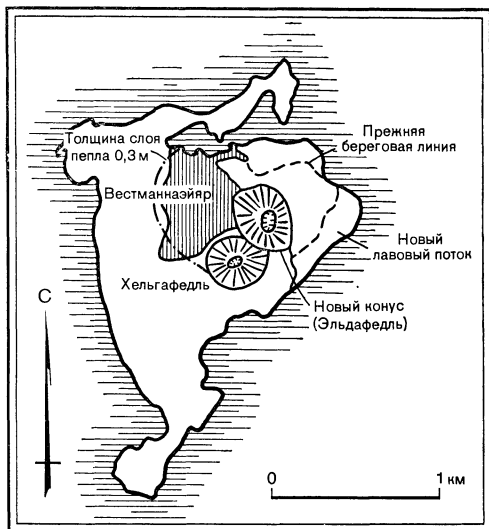
Падение бомб и глыб обычно происходит только на склонах самого вулкана и в его ближайших окрестностях, а наибольший ущерб вызывается гораздо более обширным выпадением пепла. Однако иногда значительные разрушения связаны и с выбросами крупных обломков. Примером этого служит извержение вулкана Ареналь (в Коста-Рике) в 1968 г., когда падаю-

щие глыбы сбивали крупные ветви с деревьев и проламывали крыши домов на расстоянии более 3 км от вулкана. Падая на слой мягкого пепла, глыбы образовывали в нем ударные кратеры, причем большинство из них имело размер 3—10 м, но некоторые более 30 м в поперечнике. Глыбы обычно разбивались при ударе, особенно те, которые создавали большие кратеры, так что позднее можно было найти только мелкие обломки. Возникший после извержения ландшафт с оспинами сотен кратеров напоминал лунную поверхность (фото 2.3).

Описанные выше извержения были особенно мощными; пепел выбрасывался высоко в атмосферу и разносился ветром по большой площади. Но выпадение пепла и шлака может причинить большой вред и при менее сильных извержениях. Два примера этого — извержение Парикутина (в Мексике) в 1943—1952 гг. и извержение вулкана Эльдафедль на острове Хеймаэй (у южного побережья Исландии) в 1973 г. Разрушения были связаны как с выпадением пепла и шлака, так и с лавовыми потоками, но мы коснемся здесь только первого, а лавовые потоки рассмотрим в следующем разделе.

Хеймаэй — один из островов группы Вестманнаэйяр — полностью вулканического происхождения. В 1963—1967 гг. в результате подводных извержений в 20 км к юго-западу от острова Хеймаэй в океане образовался новый остров Суртсэй и рядом — группа временных островков, но последнее извержение на самом Хеймаэе было около 5 тыс. лет назад, когда выросла коническая гора, известная под названием Хельгафедль. В последние годы город Вестманнаэйяр, занимающий северную часть острова Хеймаэй (фиг. 2.3), стал одним из важнейших исландских рыболовецких портов. Рано утром 23 января 1973 г. в нижней части северного склона горы Хельгафедль раскрылась трещина и из нее ударили струи расплавленной лавы; цепочка фонтанов лавы протянулась более чем на 1 км. Вскоре, однако, извержение сосредоточилось на коротком отрезке этой трещины и стало более эксплозивным. Пепел и бомбы выбрасывались в воздух на несколько тысяч метров и нагромождались вокруг жерла, создавая новый конус. За три недели этот конус вырос до высоты более 200 м и размером мог поспорить с Хельгафедлем. Первый взрыв произошел прямо на краю Вестманнаэйяра, при этом много пепла и шлака было выброшено в западном направлении и упало на город (см. фото 2.7). Раскаленные бомбы вызвали пожары. Нарастающий слой пепла полностью скрыл под собой дома восточной части города, крыши домов прогнулись под нагрузкой. Сам по себе пепел был довольно легким, но тяжесть возросла, когда он напитался дождевой водой, и его пришлось сбрасывать с крыш, чтобы те не обрушились.

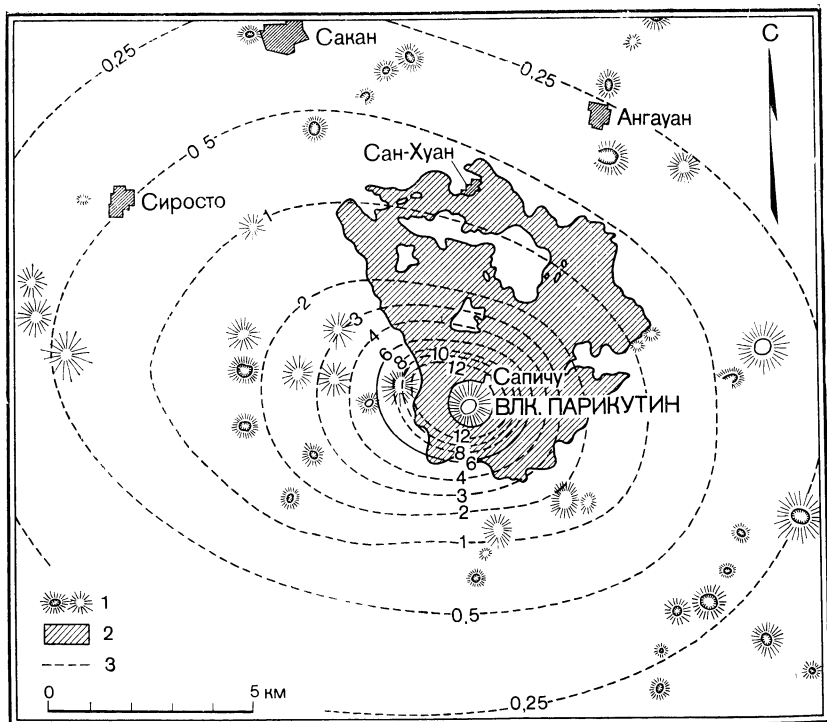
Большинство вулканических извержений продолжается только несколько дней или недель, при этом направление ветра обычно меняется мало, и пепел откладывается в основном в каком-то одном секторе, отходящем от вулкана. В отличие от этого извержение Парикутина продолжалось 9 лет, ветер в течение этого долгого времени менялся много раз, и в результате пепел распространился довольно равномерно (фиг. 2.4). Извержение началось 20 февраля 1943 г. на пашне у подножия древнего вулкана Танситаро. К 6 марта было выброшено около 80 млн. м<sup>3</sup> пепла, лапиллей и бомб, в среднем по 6 млн. м<sup>3</sup> в



Фиг. 2.3. Карта острова Хеймаэй у южного побережья Исландии [40].

Показаны вулканический конус и лавовый поток извержения 1973 г., а также расположение города и гавани Вестманнаэйяр.

день, но затем извержение тefры уменьшилось до 76 тыс. м<sup>3</sup> в день. Вокруг жерла вырос шлаковый конус высотой 370 м, а у его основания разлились лавовые потоки. Пепел доверху засыпал дома окрестных селений, крыши обрушились (фото 2.4), но самым интересным было воздействие вулкана на растительность. На расстоянии 3—5 км от жерла, там, где толщина слоя пепла была больше метра, погибли даже самые высокие деревья; на большем расстоянии крупные деревья выжили, но мелкая растительность была задущена. Скот пришлось перегнать на другие площади, но все же несколько тысяч животных погибло: отчасти от недостатка кормов из-за уничтожения пастбищ, а отчасти от засорения пищеварительной системы в результате того, что скот поедал траву, покрытую вулканическим пеплом. Серьезной причиной было и истирание зубов при пережевывании такой травы до такой степени, что животное не



Фиг. 2.4. Карта, показывающая толщину (в метрах) отложений пепла вокруг вулкана Парикутин (Мексика) в октябре 1946 г. и распространение лавовых потоков в августе 1967 г. [36].

Новый конус Парикутина окружен множеством старых шлаковых конусов, которые отмечают жерла прежних извержений. 1—шлаковые конусы; 2—лавовые потоки Парикутина; 3—изолинии толщины слоя пепла (в метрах).

могло больше есть. И еще одним следствием извержения Парикутина была гибель плантаций сахарного тростника к западу от вулкана: не от самого пепла, а от нашествия вредителей, вызванного тем, что пепел уничтожил хищных насекомых, поедавших этих вредителей.

Изредка бывает так, что пепел содержит много ядовитых веществ и это может причинить серьезный ущерб. Например, пепел, выброшенный при извержении вулкана Ирасу (Коста-Рика) в 1963—1965 гг., обладал такой кислотностью ( $\text{pH} > 4$ ), что это вызвало кислотные ожоги растений и коррозию металлических предметов. При некоторых исландских извержениях, таких, как извержения Геклы в 1947 и 1970 гг., тысячи травоядных животных погибли от отравления фтором, содержавшимся в пепле. Фтор пристает к поверхности частиц пепла,

вероятно, в виде фтористоводородной кислоты, а пепел в свою очередь оседает на траве и на других растениях. Эксперименты, проведенные исландцами, показали, что если содержание фтора в сухой траве будет всего лишь  $250 \text{ млн}^{-1}$ , то это за несколько дней погубит пасущихся там овец. К счастью, фтор постепенно смывается дождями и пастбища восстанавливаются; так, при извержении 1970 г. луга вновь стали безопасными примерно через 6 недель.

Эффект может оказаться даже более отдаленным. В определенных районах Северного острова Новой Зеландии овцы болели так называемой лесной болезнью, которая, как оказалось, представляет собой отравление кобальтом, поглощаемым с растительностью, выросшей на обогащенных кобальтом пепловых отложениях. Проблему удалось решить только удалением овец с территории, сложенной этим особым видом пепла.

В 1911 г. на Филиппинах произошло извержение вулкана Тааль; при этом погибло 1300 человек. Такое же извержение, хотя, к счастью, не столь катастрофическое, произошло в 1965 г. Вулкан Тааль расположен на острове крупного одноименного озера, в 60 км к югу от Манилы. Извержение 1965 г. началось 28 сентября в 2 часа ночи довольно редкими взрывами; раскаленные бомбы и шлак взлетали высоко в воздух, вокруг жерла вырос шлаковый конус. Примерно в 3 часа 25 минут извержение внезапно усилилось, так как воды озера получили доступ к раскаленному докрасна жерлу вулкана и образовалось громадное количество пара. Огромные тучи пара, несущие пепел, поднялись на высоту 16 км или больше, а ветер отнес тонкий пепел на расстояние до 80 км, причем выброшенный материал был представлен главным образом обломками древних пород, слагающих остров. Вокруг основания вертикального столба извержения возникли кольцевые расширяющиеся тучи, которые с ураганной скоростью обрушились на поверхность острова, на окружающее озеро и на его отдаленные берега. В километре от вулкана эти нагруженные пеплом тучи сломали или вырвали с корнем все деревья, а на протяжении следующего полукилометра обращенная к вулкану сторона деревьев была сильно повреждена песком и древесина была сточена на глубину до 15 см, хотя на другой стороне кора сохранилась в целости. Следов обугливания не было, а во внешней части этой площади деревья были залеплены грязью, т. е. температура пронесшегося там шквала была ниже точки кипения воды. По мере того как уменьшалась скорость распространяющихся от центра туч, откладывался пепел; на расстоянии 1 км от жерла образовались дюны высотой 2,5 м, а в 5 км от жерла — слой толщиной более 30 мм. Эти расширяющиеся в стороны тучи похожи на те, которые расходятся от основания грибообразного облака

атомного взрыва, и тоже называются *базисной волной* (base surge). Они типичны для сравнительно низкотемпературных взрывов, возникающих при участии внешней воды, и наблюдались при извержениях в океане, например при извержениях вулканов Суртсей и Капелиньюш, а также при извержении Килауэа в 1924 г.

Что можно сделать, чтобы уменьшить ущерб, причиняемый выпадением тefры? Кое-какие меры здесь уже упоминались. Следует сбрасывать пепел с крыш, чтобы они не рухнули под его тяжестью, особенно когда пепел насыщается во время дождей водой. Для защиты дыхательных путей от пыли можно использовать кусок влажной ткани, прижимая его к носу и рту. Чтобы не обломились ветви фруктовых и других деревьев, надо с них стряхивать пепел; если пепла уже столько, что он может убить большие деревья, то некоторые из них можно спасти, раскапывая пепел вокруг их стволов. Поверхностные источники воды могут оказаться загрязненными пеплом, но воду можно в значительной мере очистить с помощью простых матерчатых фильтров, например привязав мешочек к водоразборному крану; однако следует запастись как можно большим количеством воды в самом начале извержения, так как потом в воде может оказаться слишком много кислот, выделяющихся из пепла. Стоки, забитые пеплом, надо срочно расчищать, чтобы предотвратить наводнения во время сильных дождей, часто сопровождающих извержения. Скот следует удалить с пастбищ, чтобы животные не истирали пеплом свои зубы. Самолеты и другие машины надо оборудовать противопылевыми фильтрами.

Базисная волна имеет много общего с палящими лавинами и пепловыми потоками, о которых говорится дальше; вероятно, мало что можно сделать, чтобы уменьшить связанные с ней потери, кроме как заблаговременно предупредить население и эвакуировать его из района, где может пройти базисная волна.

Когда извержение уже началось, сама по себе эвакуация может оказаться очень трудным делом, так как при этом резко ухудшается видимость. Даже с мощными фонарями бывает невозможно увидеть что-либо вне помещения на расстоянии более метра. В таких условиях людям лучше всего, вероятно, оставаться в домах (обычно несколько часов), пока видимость не улучшится, совершая при необходимости только короткие вылазки, чтобы очистить крыши и водостоки. Ввиду того что может нарушиться водоснабжение, необходимо как можно раньше запастись в домах водой, которой хватило бы на несколько дней.

Ущерб, наносимый выпавшим пеплом сельскохозяйственным землям, обычно кратковременный. Почву, покрытую тонким слоем пепла, можно вспахать; при этом, как правило, земля



удобряется и в ее состав добавляются легко усваиваемые растениями питательные вещества. На пепловых отложениях обычно образуется твердая корка; плуг разрушает ее и помогает всходам пробиться. В некоторых местах при расчистке садов приходилось убирать отложения пепла и пемзы толщиной несколько метров, почва же оказывалась неповрежденной.

Очень важным фактором, влияющим на скорость восстановления опустошенной земли, является климат. Во влажных теплых тропиках растительность восстанавливается очень быстро. Там, где толщина слоя пепла составляет всего несколько сантиметров, семена и споры прорастают сквозь него спустя несколько месяцев. Если же более толстый слой пепла убил всю мелкую растительность, а с крупных деревьев ободрана листва и мелкие ветви, но сами деревья не погибли, то первые листья появляются, как правило, также через несколько месяцев. Даже там, где пепел настолько глубок, что убито все живое, растения отвоевывают эту площадь удивительно быстро. Спустя год после великого извержения Кракатау (1883 г.) на покрытых толстым слоем пепла остатках вулкана местами уже росла трава, а еще через два года там насчитывалось 26 видов растений; к 1924 г. почти всюду там был густой лес. В более холодных и сухих районах восстановление идет медленнее, но тем не менее может оказаться довольно скорым. Метровый слой пепла выпал при извержении Катмая в 1912 г. в районе Рашен-Анкориджа (40 км к восток-юго-востоку от вулкана), и мелкая растительность была полностью уничтожена. Казались мертвыми и ольховые рощи, но через год те деревья, которые находились на склонах, обращенных к вулкану, дали от корней новые ростки, а на противоположных склонах деревья покрылись зеленой листвой.

Крупнейшее извержение вдоль трещины Лаки (Исландия, 1783 г.) проявилось главным образом излиянием потоков очень жидкой базальтовой лавы и обычно считается лавовым извержением. Однако оно было гораздо более эксплозивным, чем большинство извержений этого типа, очевидно, потому, что поднимающаяся лава встречала на своем пути неглубокие грунтовые воды и воду озер. В результате происходили взрывы пара и образовалось около  $0,3 \text{ км}^3$  тонкого пепла, который покрыл всю Исландию и был перенесен ветром через северную часть Атлантического океана в Великобританию и Норвегию. Этот пепел вызвал гибель многих травоядных животных. Смесь огромного объема выделившегося серного газа и тонкого пепла образовала голубоватый туман, который также окутал почти всю страну, причинил серьезный ущерб зерновым и кормовым культурам и привел к голоду и бескормице. Ко всем этим бедам туман так ухудшил видимость, что рыбаки не могли выходить

в море. Следствием была гибель половины поголовья коров, трех четвертей поголовья овец и лошадей. Население острова сократилось на пятую часть.

**Лавовые потоки.** На протяжении истории человечества лавовые потоки уничтожили большое количество материальных ценностей, созданных людьми, но редко уносили их жизнь: эти потоки продвигаются медленно, поэтому люди и животные успевают уйти от них. В 1950 г. один управляющий фермой, желая удостовериться в том, что его стадо вне опасности, сам попался в западню между двумя лавовыми потоками Мауна-Лоа (остров Гавайи) и должен был идти к побережью, где его подобрала береговая охрана и отвезла в безопасное место. Если бы никто не пришел ему на выручку, он мог еще остаться в живых, подождав несколько дней, пока лавовые потоки остынут настолько, что он смог бы пересечь их; однако при других обстоятельствах: если бы потоки оставались активными и постепенно распространились на разделяющую их территорию — он мог и погибнуть. Перебраться через широкие активные потоки лав аа бывает трудно или невозможно — отчасти из-за сильной расщеченности их поверхности и из-за излучаемого ими тепла, но еще более из-за того, что нагретый над потоком воздух чересчур разрежен, и человек, которому и так очень трудно преодолевать такую неровную поверхность, может потерять сознание или вообще умереть от недостатка кислорода. Возможно, некоторые люди погибли именно так. В 1823 г., когда поток очень жидкой лавы, изливавшейся из нескольких жерл на юго-западном склоне вулкана Килауэа, с большой скоростью надвигался на одну прибрежную деревню, большинство жителей успели убежать в безопасное место, но, как гласит предание, некоторые старики и малые дети не могли бежать быстро и погибли.

Таким образом, в отношении лавовых потоков задача состоит не столько в спасении человеческих жизней, сколько в защите имущества и в том, чтобы научиться в кратчайшее время делать поверхность потока пригодной для сельского хозяйства.

Чтобы привести пример разрушений, связанных с лавовыми потоками, снова обратимся к нашему классическому вулкану — Везувия. После того как в 172 г. н. э. начал расти новый конус Везувия, лавовые потоки неоднократно наводили на виноградники и селения, располагавшиеся в нижней части склонов этой горы, причем одним из крупнейших таких эпизодов было извержение 1906 г. В начале 1905 г. расплавленная лава занимала внутри конуса высокое положение, почти доходя до краев кратера. Вес столба жидкой лавы, возвышавшегося на 1340 м над уровнем соседнего Неаполитанского

залива, оказывал сильное распирающее действие на стенки конуса. По этой ли причине или вследствие тектонических движений, связанных со смещениями в более глубоких частях земной коры, но в мае конус треснул, и на его северо-западном склоне, в 120 м ниже кромки кратера, образовались жерла, откуда в течение 10 следующих месяцев изливались лавовые потоки, не причиняя серьезного вреда.

4 апреля 1906 г. открылись новые жерла на том же уровне, но на юг-юго-восточной стороне конуса. Конус раскалывался дальше; к полуночи открылись жерла в 530 м ниже кромки кратера, и из них полились огромные потоки лавы. Происшедший при этом быстрый отток магмы из центрального канала привел к понижению давления в более глубоких частях магматического очага, что позволило новым и новым объемам газа выделяться из раствора, и сила извержения у вершины вулкана резко увеличилась. Когда стенки кратера обрушились, от вулкана расползлись тяжелые черные тучи и на конус выпал дождь вулканического пепла.

Утром 6 апреля открылась еще одна цепочка жерл, теперь уже в 730 м ниже вершины, и лава полилась по юг-юго-восточному склону конуса, причем вблизи жерл она текла узким стремительным потоком со скоростью более 16 км/ч, а ниже поток расползался вширь и замедлялся, так что его фронт продвигался только на несколько метров в час. Медленно, но неминуемо лава типа аа наступала на виноградники и дома, занимавшие нижнюю часть склонов горы (см. фиг. 2.1). Селение Казабьянка и значительная часть района Боскотрекасе подверглись полному разрушению, и лава достигла окраин Торре-Аннунциата, в 3 км к западу от Помпей. Лава была несколько более вязкой, чем типичные лавы гавайских вулканов Килауэа и Мауна-Лоа, но все же она была такой текучей, что заполняла даже незначительные понижения, разделяясь на потоки и вновь соединяясь, как протоки извилистой реки, и оставляя острова неповрежденной земли. Глубина потока достигала 7 м, и лава залила дома вплоть до второго этажа (фото 2.5), проникая в окна и двери. Некоторые дома были сдвинуты и раздавлены, но другие только наполнились лавой, а их сравнительно непрочные каменные стены не разрушились. Такое малое давление, оказываемое потоками жидкой лавы на препятствия, является важным фактором, который надо иметь в виду при попытках изменить направления потока способами, описанными ниже.

Еще одно крупное извержение Везувия случилось в 1944 г. Тогда вулкан как бы встал на сторону немцев и обрушил на аэродромы союзников град вулканических бомб, при этом лавовый поток направился на северо-запад, в Атрио-дель-Ка-



Фото 2.5. Лавовый поток на улицах Боскотрекасе во время извержения Везувия в 1906 г.

Напор лавы был недостаточно силен, чтобы сдвинуть стены каменных домов (фото Т. А. Джаггара).

валло, между современным действующим конусом и амфитеатром Монте-Соммы (краем древней кальдеры), а оттуда к городу Сан-Себастиано, который уже раньше, в 1872 г., едва не был задет лавовым потоком. Поведение потока было почти таким же, как в 1906 г.

Лавовые потоки Этны также приносят большие разрушения. Здесь будут упомянуты только два из многих примеров. Обширная депрессия Валле-дель-Бове на восточном склоне Этны (фиг. 2.5) — это крупный обрушившийся кратер древнего вулкана, частично погребенный более молодыми отложениями Этны. Многие лавовые потоки попадают именно в эту долину, но в 1928 г. при извержении на северо-восточном склоне Этны лавовый поток пошел севернее Валле-дель-Бове, уничтожая



Везувия в 1906 г., и оказывала большее давление на препятствия, так что стены домов (непрочной каменной кладки) были, как правило, опрокинуты и раздавлены потоком.

Еще более сильное извержение Этны произошло в 1669 г. на южном склоне горы. Лава двигалась на юг, уничтожая посевы, сады и деревни, и дошла до стен древней феодальной крепости Катания. Стены держались несколько дней, при этом лава нагромождалась возле них, и часть потока обошла крепость и направилась к Ионическому морю. Однако в конце концов слабый участок стены не выдержал, лава двинулась в город и уничтожила некоторые его части, причем большинство зданий было сдвинуто и разрушено, но более прочные строения устояли и были погребены лавовым потоком. Современный уровень земли у входа в замок Орсини (средневековый бастион с толстыми прочными стенами) — это уровень бывшего второго этажа, но помещения первого этажа сохранились и используются до сих пор. Основание замка покрыто слоем лавы толщиной 9—12 м.

Во время длительного извержения Парикутина, упомянутого ранее, лавовые потоки растекались вокруг конуса и в итоге залили леса и обрабатываемые земли площадью более 2400 га (см. фиг. 2.4); они полностью уничтожили селение Парикутин и частично — Сан-Хуан-Парангарикутиро, где лава залила старую каменную церковь до уровня крыши среднего нефа (фото 2.6). Небольшое количество лавы проникло внутрь церкви через окна и двери, но стены не были раздавлены, и внутренние помещения остались в основном свободными. И снова приходится удивляться, до чего слабо давила лава на стены!

С начала документированной истории Гавайских островов, т. е. с первых десятилетий XIX в., лавовые потоки вулкана Мауна-Лоа покрыли площадь более 650 км<sup>2</sup>; почти вся эта земля не обрабатывалась, но около 100 км<sup>2</sup> использовалось как пастбища. В 1926 г. лава залила рыбацкую деревню Хоопулоа, а один из потоков извержения 1950 г. уничтожил часть деревни Лаупахоэхэ. Незначительное количество разрушений (помимо уничтожения пастбищ) связано с тем, что ко времени этих извержений использовалась только небольшая часть земли; однако в последние годы доля площади, используемой для различных целей (а не только для животноводства), значительно возросла, и при будущих извержениях надо ожидать гораздо большего ущерба.

За тот же период вулкан Килауэа, родственник вулкану Мауна-Лоа, покрыл лавой только около 120 км<sup>2</sup>, но причинил гораздо больший ущерб, что связано с большей освоенностью земель. Лавовые потоки извержения 1955 г (фиг. 2.6) покрыли около 440 га обрабатываемой земли залили 10 км

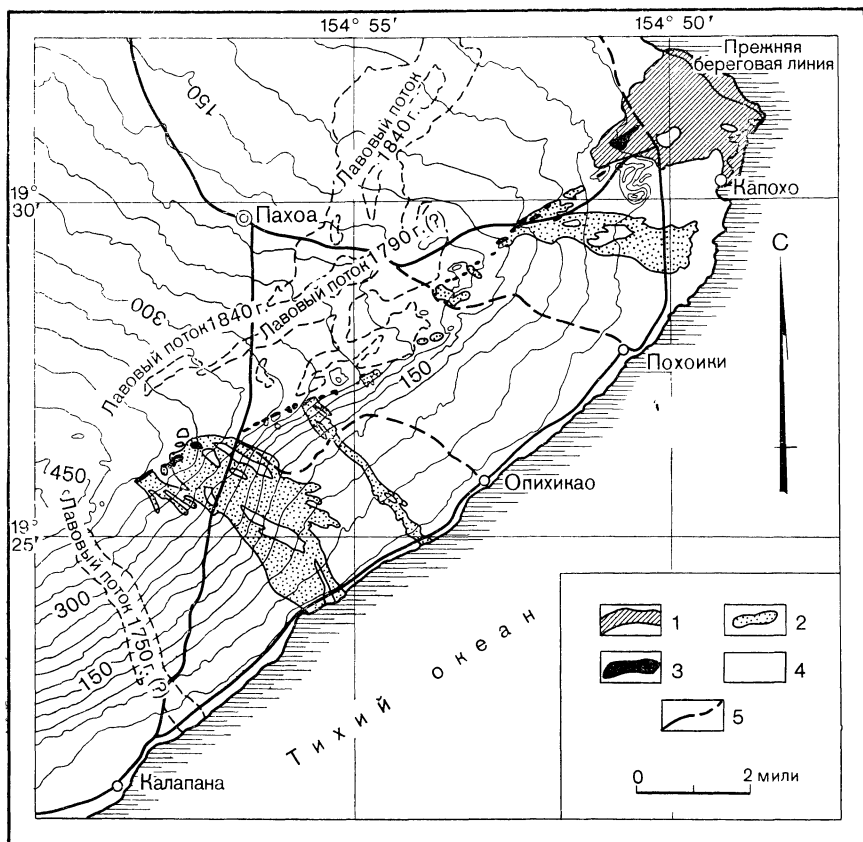


Фото 2.6. Башни кафедрального собора Сан-Хуан-Парангарикутиро, выступающие над неровной («рваной») поверхностью потока глыбовой лавы, июль 1945 г., Мексика.

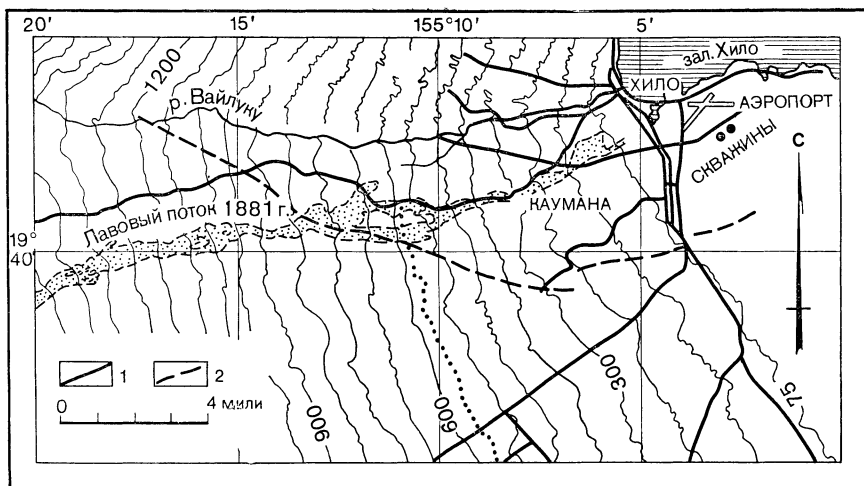
Здание погребено лавой выше перекрытия среднего нефа. На заднем плане слева — вулкан Парикутин, из которого излился этот лавовый поток.

общественной дороги и уничтожили 17 домов. Лавовый поток 1960 г. покрыл около 120 га обрабатываемой земли, уничтожил одно рыболовецкое хозяйство, здание школы, несколько домов на побережье и большую часть деревни Капохо. Ни при каком из этих извержений человеческих жертв не было, и благодаря своевременному предупреждению удалось спасти большую часть движимого имущества, включая такие тяжелые вещи, как большие складские холодильники. Самое последнее по времени разрушение, вызванное лавовыми потоками, было на острове Хеймаэй, где лава залила восточную часть города Вестманнаэйяр (фото 2.7).

Крупнейшее лавовое извержение исторического времени — это извержение 1783 г. в Исландии, упоминавшееся ранее. Лава одного этого извержения покрыла площадь 560 км<sup>2</sup>, уничтожив несколько крестьянских хозяйств. Но даже это извержение кажется небольшим по сравнению с настоящими «лавовыми наводнениями» доисторических времен. Потоки, в результате накопления которых образовались огромные лавовые равнины, такие, как плато Колумбия на востоке штата Вашингтон







Фиг. 2.7. Карта, показывающая город Хило (остров Гавайи), лавовый поток 1881 г. и места расположения барьеров, предложенных для отвода будущих лавовых потоков от города и гавани [14].

1 — барьер, предложенный в 1937 г.; 2 — барьер, предложенный в 1950 г. Сечение рельефа через 75 м., за нуль принят средний уровень моря.

**Способы воздействия на лавовые потоки.** Однако на некоторые лавовые потоки меньшего размера воздействовать все-таки можно. Предложены и до некоторой степени проверены три различных способа такого воздействия. Два из них выдвинуты для защиты города Хило (остров Гавайи), находящегося прямо на пути вероятных будущих лавовых потоков Мауна-Лоа (фиг. 2.7). Город построен на доисторических лавах этого вулкана. В 1852, 1855, 1899, 1935 и 1942 гг. лавовые потоки из жерл северо-восточного склона Мауна-Лоа двигались в направлении Хило, а в 1881 г. поток действительно вошел в район окраин современного города. Вероятность того, что какой-нибудь будущий поток уничтожит город (или его часть) и порт, велика, и крайне желательно, чтобы были предприняты все возможные шаги к тому, чтобы избежать такой катастрофы.

Один из предлагаемых способов — *бомбардировка* потока высоко на склоне горы, с тем чтобы заставить лаву растекаться там, где это не причинит серьезного вреда, и отвести новые порции лавы от наступающего фронта потока, вынуждая его остановиться.

Три различных условия способствуют тому, что бомбардировка может достичь нужного результата. Как указано раньше, оформившийся поток пахоэхоэ питается лавой, текущей в основном под твердой кровлей по трубе. Если прямо на эту трубу

сбросить тяжелые бомбы, это может дать два результата. Во-первых, кровля над трубой может быть местами разбита, ее обломки запрудят трубу, лава там выльется на поверхность и тем самым будет отведена от фронта потока, находящегося ниже по склону. Во-вторых, сильное взбалтывание жидкой лавы в трубе взрывами бомб может нарушить газовое равновесие в лаве, она превратится в лаву типа аа, и движение по трубе остановится из-за большей вязкости такой лавы. Этот метод был опробован в 1935 г. на потоке, продвигавшемся в сторону Хило (см. фиг. 2.7), и хотя результат был не вполне убедительным, он все же несколько обнадеживал. Главную питающую трубу удалось закрыть, и лава вылилась на ненаселенную территорию в верхней части склона вулкана. Расплавленная лава продолжала вытекать из трубы ниже по склону, и фронт потока продолжал наступать, но большая часть питающей лавы была отведена, и движение фронта почти сразу же замедлилось, а через 6 дней после бомбардировки поток остановился окончательно. Через короткое время прекратилось и само извержение, и, к сожалению, были сделаны заявления, что это произошло в результате бомбардировки, хотя это и неверно, но все-таки можно считать, что бомбардировки остановили продвижение фронта потока к Хило.

Бомбардировка потоков лав аа предлагается, исходя из несколько иных соображений. Многократное переполнение русла открытой лавовой «реки», питающей поток аа, приводит к образованию по «берегам» этой «реки» естественных дамб, которые часто держат поверхность текущей лавы на несколько метров выше кровли потоков с обеих сторон. Если разрушить дамбу в том месте, где уровень лавы высок, то лава здесь выльется наружу и произойдет местное лавовое «наводнение»; одновременно уменьшится количество лавы, продолжающей течь по руслу «реки», и в результате движение фронта потока замедлится или прекратится. Эффект может быть усилен также и за счет того, что еще до разрушения дамбы взрывы бомб вызовут сильное взбалтывание лавы в «реке», произойдет локальное увеличение вязкости и русло «реки» будет частично или полностью закупорено. Бомбардировка потока лав аа была опробована при извержении Мауна-Лоа в 1942 г. Наилучшая цель для эффективной бомбардировки была выбрана во время рекогносцировочного облета площади, и хотя бомбардировщикам из-за густой облачности пришлось бомбить другое, менее благоприятное место, тем не менее отчасти опыт удался. Дамба была разрушена, жидкая лава вылилась из русла, образовав новый поток, который стал двигаться по склону сбоку от первого и в конце концов соединился с ним в нескольких километрах ниже места бомбардировки. Вскоре после этого наступление

фронта главного потока заметно замедлилось. Вероятно, временное уменьшение притока лавы привело к увеличению ее вязкости и замедлению движения потока.

Таким образом, опыт, проведенный в 1942 г., показал и возможность успешного применения этого метода при благоприятных условиях и некоторые ограничения его использования. При извержениях видимость часто бывает плохой из-за туч и дыма, и это не всегда позволяет бомбить наиболее подходящие цели (хотя в наше время эта трудность частично устранена, так как используются совершенные приборы наведения). Успешное отведение лавы зависит также от того, насколько благоприятен рельеф. Соседняя часть склона должна быть такой, чтобы лава отошла от прежнего потока или по крайней мере не влилась в него снова. Если поток продвигается по хорошо выработанной долине, глубина которой больше толщины потока, отвести лаву невозможно.

Интересно отметить, что первая попытка отвести поток лавы была предпринята на склонах Этны в 1669 г. Поток двигался в сторону Катании, и группа жителей, накрывшись для защиты от жары мокрыми коровьими шкурами, пыталась отвести поток по руслу, которое они кирками и лопатами прокопали в его стенке. Вначале они добились успеха. Лава потекла по этому искусственному руслу и двинулась по новому пути; тем самым уменьшилось количество лавы, наступавшей на Катанию. Однако тот новый путь, по которому потекла лава, вел ее к городу Патерно, и несколько сотен его разъяренных жителей вооружились и прогнали катанцев. Прорытый канал закупорился, и лава продолжала надвигаться на Катанию. Эта попытка указывает на необходимость учитывать и то, что любой отвод лавы направляет ее на те земли, которые при обычных условиях не были бы ею залиты; это может привести к серьезным правовым затруднениям.

Третья возможность — бомбить стенки конуса у самого жерла; этот способ пока не испытан. Возможность его успешного использования связана с тем, что конус обычно содержит озеро очень жидкой лавы, находящееся значительно выше окружающей поверхности земли и несколько выше начала активного лавового потока, а также с тем, что стенки конуса обычно тонкие и не очень прочные. Если эти стенки разрушить путем бомбардировки, то жидкая лава выльется из озера на соседнюю площадь, лишив поток или большую часть потока поступления новой лавы. Так произошло само собой, без бомбардировки, при извержении 1942 г. Один из авторов этой книги (Г. Макдоналд) наблюдал тогда в течение долгих часов жерла лавовых потоков, находясь в каких-нибудь двухстах метрах от основания конуса. Фонтаны лавы, бившие из кратера, поднимались до вы-

соты около 50 м, лава мощными волнами выливалась из кратера в «реку», питающую лавовый поток. В 20 км ниже по склону фронт потока медленно продвигался в сторону Хило. Внезапно стенка конуса начала распадаться на куски, и наружу вылилось большое количество лавы, вынудив наблюдателя быстро отступить на более высокое место. Когда уровень лавового озера в кратере понизился, уменьшение нагрузки на магму, находящуюся в выводном канале, привело к тому, что высота фонтанов быстро возросла примерно до 200 м, и в то же самое время сильно уменьшился приток лавы в питающую «реку». Уровень поверхности лавы в «реке» резко упал, и поток полз уже не так быстро. В течение нескольких часов наступление фронта потока сильно замедлилось, а спустя несколько дней он остановился совсем. Таким образом, бомбардировка представляется нам средством, способным при благоприятных условиях отвести сравнительно тонкие потоки жидкой лавы, такие, как потоки Мауна-Лоа и Килауэа. Однако сомнительно, принесет ли она успех в случае более толстых потоков, например потоков глыбовой лавы многих континентальных вулканов, или в случае настоящих лавовых «наводнений», таких, как на плато Колумбия. Кроме того, нелишне еще раз подчеркнуть, что успешное отведение лавы возможно только при благоприятном рельефе! Бесплезно было бы пытаться с помощью бомбардировки спасти деревню Капохо в 1960 г., потому что некуда было повернуть поток лавы. Вероятно, столь же бесполезна была бы такая попытка и в Вестманнаэйаре в 1973 г.; с другой стороны, бомбардировка вполне могла бы спасти деревню Хоопулоа в 1926 г. и когда-нибудь она может спасти Хило.

Другой путь борьбы с лавовыми потоками — сооружение *искусственных барьеров*: не плотин, которые задерживали бы лаву, а стен, которые заставили бы ее свернуть с первоначального курса и направили бы поток на ту площадь, где он принесет меньший ущерб, как это предлагал Джаггар для защиты Хило. Обстановка в районе Хило особенно благоприятна для использования отводящих барьеров. Рельеф там таков, что потоки, угрожающие городу, могут подойти к нему только по сравнительно узкому коридору, так что барьеры можно построить заранее, не дожидаясь извержения, с уверенностью, что они отсекут любые потоки, могущие причинить ущерб Хило. Предложенное Джаггаром расположение барьеров показано на фиг. 2.7. Барьеры можно соорудить с помощью бульдозеров, используя разбросанные там тяжелые каменные глыбы. Высота стен, предлагавшихся Джаггаром, должна быть различной в зависимости от местных условий и составлять в среднем около 12 м; по более поздней оценке была бы достаточной высота 8—9 м. Русло, создаваемое этими барьерами, рассчитано на лавовый поток

шириной около 1 км. Предполагают, что объем лавы, изливающейся в первые часы крупнейших извержений Мауна-Лоа, больше, чем тот, который может вместить в себя русло такого размера, но столь мощные излияния продолжаются недолго и происходят высоко на склоне горы, на расстоянии многих километров от мест, где предлагается строить барьеры, так что весьма маловероятно, что объем лавы, которая достигнет этих барьеров, будет хотя бы сравним с объемом таких излияний. Все исторические лавовые потоки на любом участке, указанном для сооружения барьера, имели объем, легко уместившийся в рассчитанном русле.

Более серьезное возражение — это возможность того, что второй язык лавового потока может дойти до барьера по верхней стороне более раннего потока. Если русло, образованное барьером, будет уже заполнено, то барьер и более ранний поток вместе создадут плотину, которая преградит путь следующему потоку, но если объем последнего будет достаточно большим, лава перельется через плотину и продолжит свой путь по склону. Хотя такая возможность рисуется четко, все же мала вероятность того, что два крупных потока достигнут барьера в такой последовательности уже на расстоянии нескольких километров от предполагаемых жерл. Очевидно, барьеры не гарантируют защиту, но они обещают значительный успех при благоприятных обстоятельствах, таких, как в районе Хило.

Проект строить барьеры все еще не вышел из разряда просто предложений, но у нас имеется множество свидетельств того, что, как уже было показано на предыдущих страницах, сравнительно тонкие лавовые покровы оказывают слабое давление на препятствия. Известны примеры, когда обычная свободно стоящая каменная стена выдерживала натиск лавового потока, причем лава нагромождалась перед стеной и в конце концов переливалась через нее, не сдвинув ее с места. Стены, построенные для других целей и совсем не рассчитанные на то, чтобы быть барьерами против лавы, такие, как городские стены Катании, тем не менее успешно отводили лавовые потоки в течение длительного времени. При извержении Килауэа в 1955 г. для отвода потоков были в спешке насыпаны бульдозерами стены, и, хотя они были малы и плохо размещены, они все-таки оказались в какой-то мере спасательными. Стены, построенные около Капохо в 1960 г. (фото 2.2), предназначались не для отвода потоков, а больше для того, чтобы поднять уровень естественного гребня к югу от потока и ограничить течение лавы одной широкой долиной, предотвращая тем самым ее распространение к югу, на другие населенные площади и в район жизненно важного маяка. Как вода переливается через недостаточно высокую плотину, так и лава в конце концов перетекла через загради-

тельные стены, но это, несомненно, сильно уменьшило количество лавы, двигавшейся к югу, и тем самым уменьшило размер разрушений. Лава все же дошла до бетонных стен основания маяка и остановилась всего в нескольких метрах от самой башни, совсем небольшого количества лавы не хватило для ее уничтожения; маяк остался цел и продолжает работать до сего времени. Более того, через некоторое время после того, как лава впервые прикоснулась к стенам маяка, они успешно стали выполнять роль отводных барьеров.

Опыт постройки стен в 1960 г. и их поведение позволили нам сделать ряд важных выводов. В частности, выяснилось, что стены должны иметь широкое основание и пологие склоны и что они должны быть построены из тяжелого материала — стены, построенные из шлака, представляли собой печальное зрелище. Если материал стены менее плотен, чем жидкая лава, то лава прорывает себе путь под этой стеной или сквозь нее, поднимая и унося на себе легкий материал. Если основание стены слишком узко, то все сооружение может быть сдвинуто лавой. Пологий скат, обращенный к центру извержения, обеспечивает то, что лава наваливается на основание стены, придавливает его и уменьшает возможность смещения стены. Пологий обратный скат обеспечивает небольшую скорость течения лавы через стену, уменьшая или устраняя опасность размыва стены.

Как и в случае бомбардировок, важнейшее значение имеет местный рельеф: никакой барьер не сможет отклонить поток, если рельеф не способствует этому.

За пределами Гавайских островов делалось мало попыток использовать барьеры или дамбы для отведения лавы. Несколько лет назад в Японии, в понижении края кальдеры Осима, была построена каменная стена, чтобы предотвратить излияние лавы через это понижение на деревню, расположенную ниже по склону, но до сих пор лава еще не достигала этой стены.

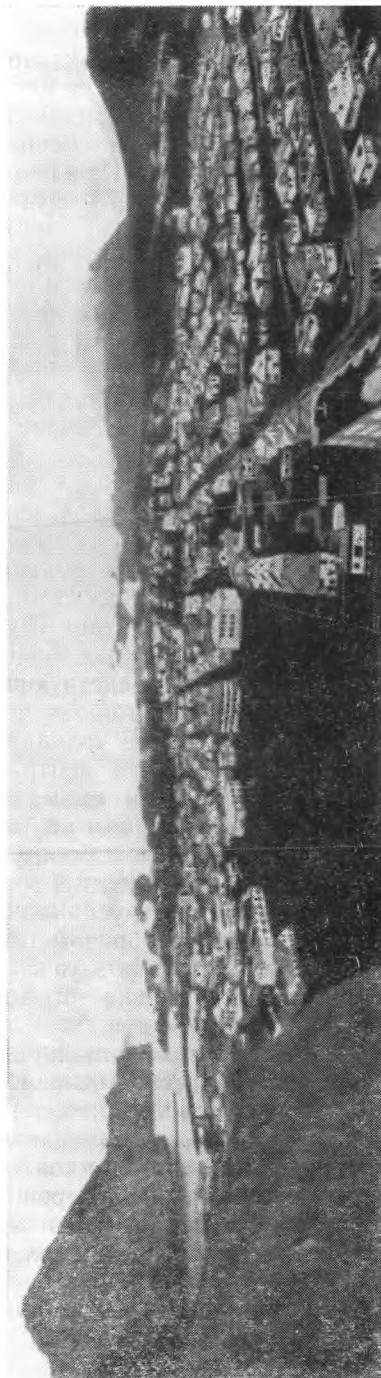
Могут ли отводные барьеры противостоять лавовым потокам большой толщины, остается пока неизвестным. Было бы совершенно нереально думать о постройке барьеров высотой 30 м и более, т. е. той же высоты, что и многие потоки глыбовой лавы. Однако опыт показывает, что барьер не должен быть той же высоты, что и поток, чтобы отвести его. Например, при извержении 1955 г. большой поток лавы подошел под углом к старой железнодорожной насыпи и был отведен ею, что спасло деревню Капохо от возможного уничтожения. Насыпь была высотой 2—3 м. Хотя кровля потока возвышалась над насыпью на целых 5 м, лава не перетекала через нее, если не считать отдельных глыб, отвалившихся от передней кромки потока. Движение потока подчинялось движению его нижней жидкой части, которое в свою очередь направлялось насыпью. Однако помимо того, что

потоки глыбовой лавы более толстые, они и более вязкие. У нас еще не было случая увидеть поведение таких потоков при их соприкосновении со специально построенными барьерами. Когда представится такая возможность, надо будет провести эксперименты, так как вполне возможно, что даже толстые вязкие потоки можно направлять с помощью сравнительно низких отводных барьеров.

При извержении Килауэа в 1960 г. интересный эксперимент был проведен в деревне Капохо, когда медленно наползавшая лава уничтожала дом за домом и при этом, конечно, возникали пожары. Чтобы предотвратить распространение огня на другие дома и на окружающую растительность, надо было постоянно держать наготове пожарные машины и команды пожарных, но большую часть времени они не работали. В этой обстановке главный пожарный Эдди Бенто решил испытать то, что за последние десятилетия предлагалось уже много раз, хотя почти всегда с иронической усмешкой, а именно обливать фронт наступающей лавы из пожарного шланга и смотреть, что получится. Идея была встречена издевательским хохотом и даже была осуждена местными властями, но Бенто настоял на своем, и тут оказалось, что даже сравнительно небольшое количество воды дает таки результат. В отдельных местах удавалось сдерживать наступление края потока на протяжении нескольких часов, что позволяло вынести мебель и другие вещи из находившегося под угрозой дома или даже передвинуть сам дом. И не насмешек был достоин Эдди Бенто, а самой высокой похвалы за свою решительность и фантазию, за свою любознательность.

Эта идея дала свои плоды во время извержения на острове Хеймаэй в 1973 г. (фото 2.7). Виднейший исландский вулканолог Сигурдур Тораринссон писал (в личном письме): «...метод обливания лавы водой с помощью насосов (900 л/с), примененный с целью замедлить движение лавы, остановить или изменить ее направление, по инициативе и под руководством Т. Сигургейрссона, профессора физики Исландского университета, используется теперь очень широко и дает замечательные результаты... Использование водяных насосов сыграло важную роль в защите города Вестманнаэйяр».

**Грязевые потоки.** Когда говорят «грязь», то обычно представляют себе что-то мешающее, неприятное, но едва ли опасное; однако за последние несколько столетий грязь, стекающая со склонов, уничтожила больше материальных ценностей, чем любое другое вулканическое явление, и унесла тысячи человеческих жизней. Грязевые потоки надо считать главным после выпадения тефры элементом вулканической опасности.



Фиг. 2.7. Лавовый поток, наступающий на восточную часть города Вестманнаэйяр на острове Хеймаэй. Исландия, в начале мая 1973 г.

Вверху слева — лава, заливающая гавань. У правого края снимка — доисторический шлаковый конус Хельгафедль, а слева от него — конус, образовавшийся при извержении 1973 г. На первом плане — толстый слой шлака и пепла покрывает попавшую в кадр часть города, но большая часть крыш уже очищена.



При извержении Везувия в 79 г. н. э., когда Помпеи были погребены под слоем пепла, Геркуланум был погребен грязевыми потоками, возникшими в результате сильных дождей на верхних частях склонов вулкана, покрытых мощными пепловыми отложениями. Обломочный материал, отложенный грязевыми потоками, затвердевает почти как бетон. Из-за этого раскопать развалины Геркуланума оказалось гораздо труднее, чем Помпеи; кроме того, Геркуланум был погребен глубже.

Опять же, когда говорят «грязь», обычно представляют себе тонкозернистый материал. Большинство грязевых потоков действительно содержит значительную долю тонкообломочного материала, но в них много и угловатых глыб размером часто больше 30 см, а некоторые глыбы бывают размером в несколько метров. Нередко грубый материал преобладает над мелким, причем соотношение размеров обломков зависит от исходного материала. Грязевые потоки сметают и вбирают в себя все, что попадает на их пути, и часто они содержат много органического материала: от листьев до целых стволов деревьев, иногда даже трупы животных или людей. Здесь рассмотрены только те грязевые потоки, которые прямо связаны с вулканической деятельностью; о других грязевых потоках рассказывается в гл. 4.

Главная причина того, что грязевые потоки так часто возникают на вулканах, — это изобилие рыхлых обломков горных пород, покрывающих обычно склоны действующих вулканов; обломки смешиваются с текущей водой и образуют грязь. Большинство вулканических грязевых потоков холодные, но бывают и горячие; обычно они химически почти нейтральны, однако иногда сильно насыщены кислотами и вызывают серьезные ожоги. Движение грязевых потоков целиком обусловлено силой тяжести, и их скорость зависит в основном от крутизны склона, по которому они движутся, и от вязкости самой грязи, но важны также и такие факторы, как размеры русла и неровность поверхности. Вязкость зависит главным образом от соотношения твердого материала и воды; некоторые потоки состоят преимущественно из воды, в других содержание твердого материала доходит до 95%.

На более крутых верхних склонах вулканических конусов деятельность грязевых потоков сводится в основном к размыву; однако на более пологих склонах у основания конуса и дальше движущийся поток теряет скорость и начинает откладывать материал. В конце концов вся масса обломков откладывается в виде слоя толщиной обычно в несколько метров. Целые фермы и деревни были погребены такими грязевыми массами (фото 2.8). Из-за того что потоки имеют на крутых склонах большую скорость (до 100 км/ч), они часто распространяются на расстояние несколько километров по пологим склонам, прилегающим к

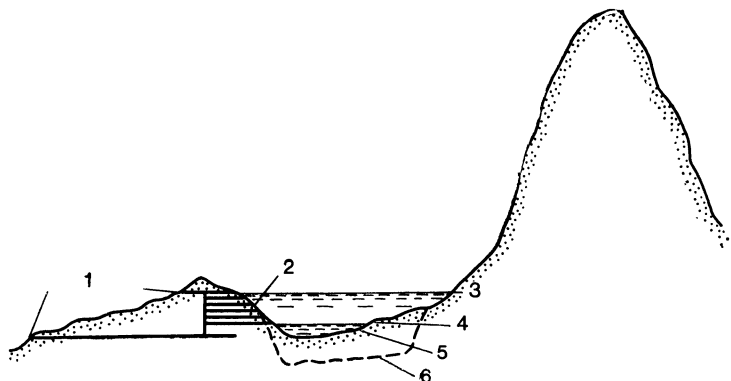


Фото 2.8. Церковь в Кагсауа, Филиппины, погребенная до кровли нефа грязевым потоком с вулкана Майон (на заднем плане) в 1814 г.

Рассказывают, что жители деревни искали спасения в этой церкви и все погибли.

вулкану; когда же они соединяются с горными реками, то преодолевают расстояния до 300 км.

Любое явление, при котором большая масса воды поступает на покрытый плащом обломков склон вулкана, может вызвать грязевой поток. Лучше всего это видно в случае внезапного выброса воды из кратерного озера. Из-за низкой проницаемости тефры на многих вулканических конусах дождевая и талая вода проходит через нее медленно и накапливается в кратерах, образуя там озера, содержащие иногда многие миллионы кубических метров воды: например, максимальный объем озера Крейтер (в Орегоне)  $800 \text{ км}^3$ . Взрыв, возникающий под таким озером, может выбросить значительную часть его воды на склон горы. Вулкан Келуд (на Яве) делал это несколько раз, и образовавшиеся при этом грязевые потоки причинили большой ущерб сельскохозяйственным землям и унесли много человеческих жизней. Так, в 1919 г. грязевые потоки, возникшие при эксплозивном выбросе воды из кратерного озера, уничтожили около  $200 \text{ км}^2$  крестьянских земель и привели к гибели примерно



Фиг. 2.8. Схематический разрез через систему туннелей, прорытых на вулкане Келуд (Ява) для понижения уровня воды в кратерном озере и уменьшения опасности разрушительных грязевых потоков при будущих извержениях [41].

1 — выходы туннелей; 2 — система туннелей; 3 — поверхность озера в 1927 г.; 4 — уровень озера в 1950 г.; 5 — дно кратера перед извержением 1951 г.; 6 — дно кратера после извержения 1951 г. Вертикальный масштаб преувеличен приблизительно втрое.

5000 человек. Чтобы избежать повторения такой катастрофы, голландские специалисты прорыли серию туннелей с тем, чтобы понизить уровень озера и уменьшить его объем с 65 до 3 млн. м<sup>3</sup> (фиг. 2.8). Замысел оказался настолько успешным, что при таком же извержении в 1951 г. больших грязевых потоков не возникло и погибло только 7 человек.

Однако при извержении 1951 г. были разрушены входные части туннелей, а глубина кратера увеличилась примерно на 10 м (фиг. 2.8). Нижний туннель починили, но к тому времени, когда озеро наполнилось до этого уровня, его объем был уже 40 млн. м<sup>3</sup>, и это снова создало серьезную опасность катастрофических грязевых потоков. Индонезийское правительство распорядилось проложить новый туннель на более низком уровне, но этот туннель немного не был доведен до самого озера в расчете на то, что просачивание воды в туннель будет достаточным для понижения уровня озера. Из-за низкой проницаемости конуса этот расчет не оправдался, и при следующем извержении, в 1966 г., грязевые потоки снова покрыли огромные площади обрабатываемой земли и унесли сотни человеческих жизней. Были предприняты запоздалые меры, и в 1967 г. был построен на меньшей высоте новый туннель, который снова сильно понизил уровень воды, накапливающейся в озере.

Грязевые потоки Келуда были холодными, а вот другой яванский вулкан Галунгунг, выбросив в 1822 г. воду из своего кратера, образовал кипящий грязевый поток объемом 30 млн. м<sup>3</sup>,

который прошел 65 км. Количественных данных о причиненных им разрушениях не найдено.

Эксплозии пара на острове Уайт (Новая Зеландия) выбросили в 1914 г. массу оползневого обломочного материала, смешанного с грязью со дна мелкого кратерного озера; в результате образовался горячий грязевый поток, который уничтожил часть серного завода и убил 11 человек.

В 1817 г. вулкан Кавах-Иджен (остров Ява) выплеснул свое кратерное озеро, и возник поток кислотной грязи, причинивший ужасающие разрушения. Через несколько лет голландские инженеры проложили через самую низкую часть кромки кратера канал, чтобы озеро не превышало свой нижний уровень, и тем самым уменьшили риск повторения такой катастрофы.

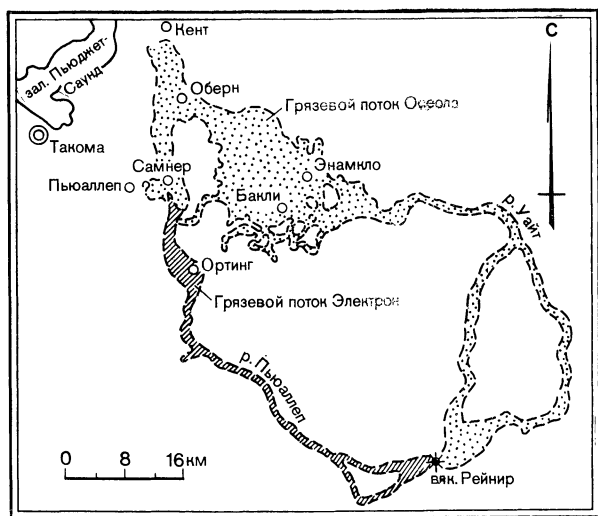
Внезапный спуск кратерного озера не обязательно происходит в результате взрывного выброса, а может быть просто следствием обрушения стенок, ослабленных взрывами, деятельностью газов или оползнями. Непосредственным толчком к обрушению может быть и землетрясение, как в случае с вулканом Келуд в 1875 г.

Быстрое таяние льда и снега просто под действием тепла и дождей также может дать на склонах вулкана избыток воды и вызвать образование грязевых потоков. Такие потоки возникали из талых вод ледников на склонах горы Шаста (Калифорния) в 1926 и 1931 гг. Выброшенный в воздух пепел охлаждается в атмосфере и редко (если вообще когда-либо) достигает земли таким теплым, чтобы вызвать сколько-нибудь значительное таяние льда и снега. Однако слой пепла на поверхности льда или снега приводит к большему поглощению солнечного тепла и ускорению таяния, что может вызвать наводнения и грязевые потоки. Так возникли в 1956 г. при извержении вулкана Безымянного (на Камчатке) грязевые потоки со склонов соседних вулканов: Ключевской Сопки и вулкана Зимины. Паллящие лавины, пепловые и лавовые потоки, проходящие по поверхности слоя снега и льда или лавовые потоки, прорывающие себе путь под этим слоем, приводят к столь быстрому и обильному таянию, что это тоже может вызвать образование грязевых потоков. При извержении Безымянного (описано в разделе 2.3) снег растаял почти полностью, и хлынувшая вода создала грязевый поток, который прошел 100 км. В 1915 г. небольшой лавовый поток излился из кратера вулкана Лассен-Пик (в Калифорнии) и растопил снежное поле; возникшие при этом грязевые потоки прошли путь в 50 км. К счастью, тогда они не причинили серьезного ущерба, но теперь, в связи с ростом населения этой области, особенно на площади Национального парка Лассен, такие потоки вполне могут привести к гибели многих людей. В 1963 г. лавовый поток у вершины

вулкана Вильяррика в Чили растопил лед и снег и создал грязевые потоки, которые уничтожили поля и деревню у подножия вулкана. В 1877 г. точно такой же грязевой поток с верхней части склона эквадорского вулкана Котопахи прошел расстояние в 300 км со средней скоростью 27 км/ч и нанес большой ущерб деревне, расположенной в 240 км от места своего образования.

Несколько иным было катастрофическое наводнение, вызванное таянием снегов на склонах вулкана Руапеху (в Новой Зеландии) в декабре 1953 г. На вершине Руапеху в большом внешнем кратере располагается внутренний конус, в котором в свою очередь находится кратерное озеро. Извержение, происшедшее в 1945 г., выплеснуло из него почти всю воду, но одновременно надстроило борта конуса на 6—8 м, и в последующие годы дожди и тающий снег сделали уровень озера еще выше, чем раньше. Пространство между внутренним конусом и кромкой внешнего кратера заполнилось льдом. Когда вода переполняет озеро, она стекает через расщелину в кромке внутреннего конуса. В течение последних десятилетий эта вода текла на юг и пробила себе туннель через лед и выливалась в истоках одного из ручьев, образующих реку Вангаэху. В конце 1953 г., когда вода достигла уровня расщелины и стала течь из нее, что-то (может быть, растрескивание тающего льда) вызвало подвижки, которые привели к обрушению части стенки внутреннего конуса, и хлынувшая вода еще больше размывала эту стенку и расширила туннель. Вырвавшись к реке Вангаэху, вода понеслась по ней в виде крутого вала высотой до 6 м, собирая рыхлый обломочный материал и превращаясь в грязевой поток. Плотная жидкая масса ударила в железнодорожный мост и часть его унесла с собой, что привело к крушению экспресса Веллингтон — Окленд, при котором были уничтожены локомотив и несколько вагонов и погибли 154 человека.

При изучении вулкана Рейнир (в штате Вашингтон) было установлено, что имеющиеся там отложения оставлены доисторическими грязевыми потоками, которые образовались в результате разбрызгивания лавы при эксплозиях пара и быстрого увеличения объема талых вод, когда лавовые потоки двигались по льду, снегу или по очень влажной земле. Было ли это связано с таянием ледников или нет, но некоторые из доисторических грязевых потоков вулкана Рейнир имели огромные размеры. Объем потока Электрон, который сошел со склонов горы только около 500 лет назад, составляет примерно 150 млн. м<sup>3</sup>; более древний грязевый поток Осеола имеет объем 1,9 млрд. м<sup>3</sup>. Оба потока прошли большое расстояние по низменности у залива Пьюджет-Саунд, и, случись это в наши дни, ущерб был бы колоссальным (фиг. 2.9).



Фиг. 2.9. Карта распространения грязевых потоков Осеола (возраст 5000 лет) и Электрон (возраст 500 лет), образовавшихся на склонах вулкана Рейнир (штат Вашингтон) [4].

Некоторые грязевые потоки образуются в результате того, что палящие лавины или пепловые потоки смешиваются с горными реками. В 1929 г. палящие лавины вулкана Санта-Мария (в Гватемале) соединились с реками и превратились в грязевые потоки, прошедшие затем путь в 100 км. В районе вулкана Мерапи (центральная Ява) такие же грязевые потоки, но меньшего размера, образовавшиеся из палящих лавин и горных рек, причинили громадный ущерб сельскохозяйственным землям и унесли много человеческих жизней.

Лавины другого происхождения также могут создавать грязевые потоки. Например, в 1888 г. низкотемпературная эксплозия пара на вулкане Бандай (в Японии) разорвала боковую стенку вулканического конуса, и верхняя часть этой стенки обрушилась. Породы были уже частично переработаны вулканическими газами и превратились в глину. Из раздробленного материала рухнувшей стенки возникла лавина; она понеслась вниз, смешалась с водой горных рек и образовала грязевые потоки, которые погребли деревни и убили 400 человек.

Грязь может образоваться и в воздухе, при соприкосновении выброшенного пепла с дождевыми тучами. Падая на землю, она иногда покрывает растительность таким плотным слоем, что ломаются сучья деревьев; иногда сползает широкими «простынями» со склонов вулкана и соседних холмов. Подобное наблюдалось во время извержения Ирасу (в Коста-Рике) в 1963 г.

Подавляющее большинство вулканических грязевых потоков образуется в результате сильных дождей, выпадающих на покрытые обломочным материалом склоны эксплозивных вулканов. Иногда дождь возникает при конденсации пара в облаках вулканического газа, но как правило он имеет обычное атмосферное происхождение, особенно в тропиках, где проливные дожди, например во время муссонов, часто влекут за собой грязевые потоки. Количество материала, отложенного грязевыми потоками вокруг основания многих тропических вулканов, огромно. По сути дела, в окрестностях многих из них трудно найти что-либо иное, кроме отложений грязевых потоков и перемытого материала из них. Большая часть материала грязевых потоков образуется из рыхлых, неконсолидированных отложений тефры на горных склонах, но иногда, например при извержении Майона в 1968 г., он представляет собой продукт размыва отложений палящих лавин.

Выпадение большого количества пепла сильно уменьшает проницаемость поверхностного слоя и увеличивает сток дождевых вод, что время от времени вызывает наводнения и грязевые потоки. Обычно на поверхности тефры очень быстро проходит цементация и образуется тонкая корка, еще более непроницаемая, чем сам пепел, и большая часть дождевой воды сразу же стекает с нее. Однако под этой коркой тефра еще рыхлая, и там, где корка ломается, интенсивно развиваются процессы эрозии. Это было хорошо видно во время размыва склонов вулкана Ирасу в 1963—1964 гг., когда подрезание такой корки привело к быстрому регрессивному росту оврагов. За короткое время в русла ручьев поступило (частично за счет оползания их бортов) большое количество обломочного материала, что послужило причиной образования грязевых потоков. 9 декабря 1963 г. во время бури, сопровождавшейся проливным дождем, возник очень жидкий, состоящий примерно на 65% из воды, грязевый поток, который промчался 11 км по долине Рио-Ревентадо до окраин города Картаго. Причиненный им ущерб составил более 3,5 млн. долл., было уничтожено 300 домов, более 20 человек погибло.

Тефра, превращаемая сильными дождями в грязевые потоки, не обязательно бывает «свежей», недавно выпавшей. Отдельные участки южного склона Мауна-Лоа, выступающие, как острова, среди молодых лавовых потоков, сложены вулканическим пеплом, имеющим возраст порядка сотен или тысяч лет и мощность до 15 м. Пепел частично превращен выветриванием в глину и может вбирать в себя воду. Во влажном состоянии он сильно *гиксотропен*: пока находится в покое, он совершенно прочен, но если его потрясти, теряет связность и течет, как жидкость (см. гл. 4). Весной 1868 г. во время длительных дож-

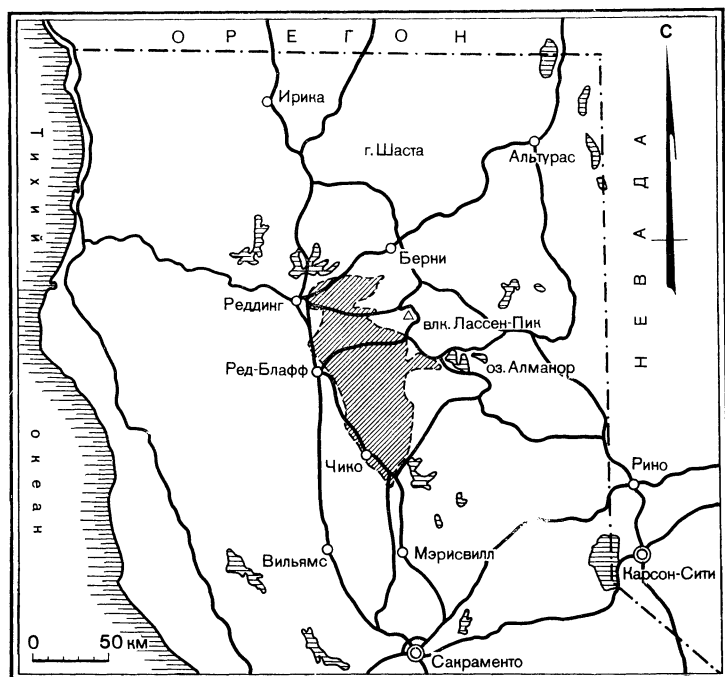
дей пепел полностью пропитался водой, а 2 апреля разразилось сильнейшее землетрясение. Пепел превратился в жидкую грязь, которая быстро потекла по горным склонам, образовав два грязевых потока: один длиной более 1 км, другой — 3 км длиной, 0,5 км шириной. Они залили одну деревню, похоронив под собой около 500 домашних животных и 31 человека.

В доисторические времена в некоторых вулканических районах не раз возникали громадные грязевые потоки. Например, вдоль восточной границы Йеллоустонского национального парка, в горах Абсарака (США), поле отложений таких потоков имеет площадь 11 тыс. км<sup>2</sup>, а их мощность достигает местами 2000 м. Эти отложения сформировались 40 или 50 млн. лет назад, гораздо раньше, чем находящиеся поблизости лавовые потоки и огромные обрушившиеся кальдеры плато Йеллоустон. Несколько моложе отложения крупных грязевых потоков на западном склоне Сьерра-Невады (формация Мертен), покрывавшие когда-то площадь 31 тыс. км<sup>2</sup>. Только 3,5 млн. лет назад образовалась так называемая Тосканская формация — пачка слоистых отложений грязевых потоков, занимающая площадь 5 тыс. км<sup>2</sup> в северной Калифорнии (см. фиг. 2.10). Несомненно, что некоторые из потоков, отложивших такое количество обломочного материала, образовались одним из описанных выше способов, однако имеются данные о том, что многие грязевые потоки возникли при смешивании твердых обломков с водой, выбрасываемой непосредственно из вулканических жерл. Если это произойдет в будущем, то могут возникнуть грязевые потоки гораздо большего объема, чем виденные до сих пор.

Среди наиболее интересных и наименее изученных причин возникновения грязевых потоков важное место занимают наводнения (см. гл. 7), сопровождающие начало некоторых извержений. Наводнения, связанные с извержением Мон-Пеле в 1902 г., кратко описаны в следующем разделе. Их нельзя считать результатом сильных дождей или выброса воды из кратерного озера. При извержении Геклы (Исландия) в 1947 г. со склонов этой горы стекло около 3 млн. м<sup>3</sup> воды, что вызвало переполнение окрестных рек и ручьев. Кьяртанссон, тщательно изучивший это явление, пришел к выводу, что такое количество воды не могло быть результатом дождей или таяния снега. Может быть, это грунтовые воды, выгоняемые из горных пород вулкана паром или другими вулканическими газами при подъеме магмы?

Что можно сделать для того, чтобы уменьшить разрушения, причиняемые грязевыми потоками? Вероятно, некоторые из них можно отводить от особенно важных площадей с помощью специальных барьеров точно так же, как и лавовые потоки. Другие потоки, особенно очень крупные, отвести таким способом, по-видимому, не удастся. Кроме того, многие грязевые потоки





Фиг. 2.10. Схема распространения грязевых потоков Тосканской формации в северной Калифорнии [11].

проходят по хорошо разработанным долинам, которые гораздо глубже, чем сами потоки. И опять же: либо рельеф должен быть подходящим, либо отвести поток невозможно. Небольшие грязевые потоки можно, вероятно, задерживать плотинами. Такая попытка была сделана у подножия вулкана Келуд, но резервуары быстро наполнились, и грязевые потоки, лишь незначительно уменьшив скорость, продолжали свой бег по долине, уничтожая деревни и убивая их жителей. Более крупные водохранилища-ловушки могут, конечно, задерживать большее количество материала, и путь многих грязевых потоков удастся, очевидно, полностью преградить плотинами, например, такими, какие уже существуют в разных районах США. Однако результаты изучения вулканической опасности в Каскадных горах штатов Вашингтон и Орегон указывают на угрозу другого рода. При внезапном попадании крупного грязевого потока в наполненное водохранилище столь же большой объем воды выплеснется из него через плотину и может вызвать разрушительное наводнение в нижней части долины; возможно также,

что это повлечет за собой такой сильный размыв основания плотины, что она не выдержит, и тогда наводнение будет еще более катастрофическим. Чтобы его предотвратить, надо заблаговременно понижать уровень водохранилища, как только появляется прямая угроза попадания в него грязевого потока. Это в свою очередь означает необходимость прогноза возникновения грязевых потоков в данном районе.

Около некоторых индонезийских деревень насыпаны холмы, на которые жители бегут от грязевых потоков; однако уже для того, чтобы люди успели забраться на безопасную высоту, их надо предупредить о приближающемся потоке заранее. Снова мы имеем здесь дело с проблемой прогноза. Была сделана попытка установить тепловые датчики в верхней части склонов вулкана Мерапи на острове Ява, чтобы они сообщали о возникновении горячих грязевых потоков или палящих лавин, но эти датчики работали не очень хорошо и в лучшем случае могли дать предупреждение лишь за несколько минут до беды, и, конечно, они никак не предупреждали о холодных грязевых потоках.

Сравнительно просто предсказать вероятный путь многих грязевых потоков, потому что они движутся по долинам; другое дело — предсказать время их возникновения. Вероятно, самое большее, что можно сделать, это изучить условия, благоприятствующие их образованию, и оповещать население об их угрозе. Толстый покров рыхлый тефры, который может превратиться в результате сильных дождей в текучую грязь; активные купола или лавовые потоки, которые могут растопить снег и вызвать потоки талых вод; особые условия, при которых горячие или холодные лавины могут сорваться в долины рек и ручьев, — за всем этим надо внимательно следить. Некоторые грязевые потоки, такие, как в начале извержения Мон-Пеле в 1902 г., вероятно, предсказать нельзя, но все-таки бывает возможно предсказать само извержение, с которым они могут быть связаны. Необходимо иметь в виду, что грязевые потоки могут возникнуть на начальной, да и на более поздней стадии любого извержения эксплозивного вулкана.

**Прорывы ледниковых вод.** Здесь уже упоминались наводнения и грязевые потоки, образующиеся при таянии ледников на вулканах Вильяррика и Котопаху, но они выглядят незначительными по сравнению с настоящими потоками, которые возникают при вулканических извержениях, происходящих под некоторыми ледниками Исландии. На протяжении нескольких часов такие «ледниковые прорывы» могут быть более многоводными, чем крупнейшие реки мира. Некоторые прорывы ледника Мирдальс (Мирдальсйёкулдур), вызванные извержениями покрытого им

вулкана Катла, выносят более 92 тыс. м<sup>3</sup> воды в секунду, а общий объем прорвавшейся воды может быть больше 6 км<sup>3</sup>!

Любой из тех нескольких исландских вулканов, которые покрыты ледниками, может вызвать такие прорывы ледниковых вод, но чаще всего это происходит у вулканов Катла и Гримсветн (закрытого ледником Ватна, или Ватнайёкудль). Оба они находятся в центральной части южной Исландии. Потоки ледниковых вод выносят и откладывают огромные массы песка и отчасти более грубого материала, и именно с ними связано образование обширных «песчаных равнин», характерных для южной Исландии. Эти потоки причиняют большой ущерб крестьянским хозяйствам и в прошлые годы унесли много человеческих жизней. Теперь жертв стало меньше, так как исландские специалисты научились предсказывать прорывы Гримсветна, хотя прорывы, связанные с деятельностью Катлы, предсказывать пока, как правило, не удается. Причина состоит в том, что талые воды Катлы остаются в камере, полностью закрытой льдом, а на Гримсветне таяние захватывает всю толщу льда и в углублении ледника появляется озеро. В обоих случаях объем воды растет до тех пор, пока она не начинает слегка приподнимать лед; после этого она выливается из-под края ледника. Следя за увеличением глубины озера Гримсветн, можно предсказать, когда накопится столько воды, что она поднимет лед и хлынет из-под него. Уровень этого озера растет с постоянной скоростью, а таяние связано главным образом не с настоящими извержениями, а с выходом горячего газа из жерл, находящихся подо льдом. Предполагается, что именно быстрый спуск озера, в результате которого понижается давление на находящиеся под ним скопления магмы, и вызывает извержения, сопровождающие обычно прорывы ледниковой воды. Если на вулкане Катла таяние происходит в результате настоящих извержений лавы подо льдом, то об опасности ледникового прорыва можно узнать заранее, используя сейсмические методы, которые позволяют выделить землетрясения, характерные для готовящегося извержения; если же таяние происходит в основном под действием выделяющегося горячего газа, без настоящего извержения, то предупредить об опасности прорыва, по-видимому, невозможно.

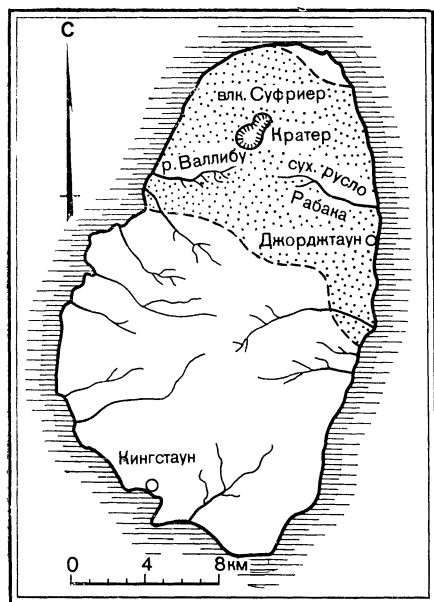
**Палящие лавины.** 1902 год был бедственным для Карибского района и соседних областей. Сильное землетрясение 18 января причинило ущерб на обширной площади у Кесальтенанго и вдоль Тихоокеанского побережья Гватемалы, а 17 апреля еще более сильный толчок разрушил Кесальтенанго и соседнюю деревню и принес новые потери всему району. Погибло около 1000 человек. Катастрофа достигла высшей точки примерно

20 апреля, когда на острове Мартиника началось извержение вулкана Мон-Пеле. 7 мая произошло извержение вулкана Суффриер на одном из соседних островов — острове Сент-Винсент. Погибло более 2000 человек. 10 мая произошло извержение вулкана Исалько в Сальвадоре; человеческих жертв не было, но серьезно пострадали кофейные плантации. В июле начал извергаться после 40 лет бездействия вулкан Масая в Никарагуа. Наконец, 24 октября произошел взрыв вулкана Санта-Мария в Гватемале, после которого в нижней части склона осталась воронка шириной более километра и глубиной 250 м, а на землю вокруг вулкана лег толстый слой пепла.

Вулканы Суффриер и Мон-Пеле, расположенные недалеко друг от друга, породили смертоносные палящие лавины, но это произошло по-разному. Приводимое здесь краткое описание должно показать это различие и охарактеризовать те извержения, которые можно ожидать от этих и подобных им вулканов в будущем.

Название «Суффриер» (по-французски *souffrière* — место, где добывают серу) дано нескольким вулканам, выделяющим сернистые газы. Суффриер на Сент-Винсенте — это конус на северном конце острова, сложенный частично тефрой, а частично лавовыми потоками (фиг. 2.11); средняя крутизна его склонов составляет всего лишь 15°. В результате одного из доисторических извержений вершина конуса была уничтожена; образовалась большая кальдера, как при извержении Везувия в 79 г. н. э., и, как в случае Везувия, при более поздних извержениях внутри кальдеры вырос новый конус, на вершине которого находится сдвоенный кратер. Более крупный (он же и более древний) южный кратер образовался, возможно, при извержении 1718 г., а кратер, расположенный севернее, при извержении 1812 г. В начале 1902 г. в южном кратере было озеро глубиной более 150 м; кромка кратера возвышалась над поверхностью озера примерно на 300 м.

Последнее достоверно известное проявление активности Суффриера отмечено в 1812 г., когда в результате эксплозивного извержения образовалась громадная туча тефры, на склоны вулкана обрушилась большая масса пепла и погибло около 75 человек. Небольшое излияние лавы в глубине кратерного озера происходило, возможно, в 1880 г. В апреле 1901 г. начались землетрясения, некоторые из них достигали значительной силы, но в июле толчки прекратились, и все было спокойно до апреля 1902 г., когда землетрясения возобновились. К счастью, это сейсмическое предупреждение было правильно понято, и к началу мая большинство обитателей западного склона вулкана, почувствовав угрозу, перебрались в южную часть острова. На другой стороне вулкана люди не придали землетрясениям большого значения: возможно, отчасти потому, что землетрясения



Фиг. 2.11. Карта острова Сент-Винсент, Малые Антильские острова, показывающая положение вулкана Суфриер и область, опустошенную при его извержении в 1902 г. [8].

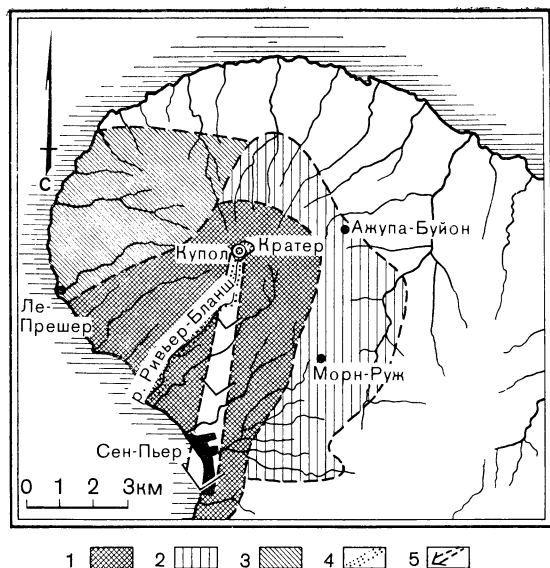
были здесь слабее, но отчасти потому, что люди думали, что если извержение и произойдет, то оно будет таким же, как в 1812 г., и большая часть пепла и вулканического газа будет отнесена северо-восточным пассатом на юго-запад.

5 мая было замечено, что в кратерном озере изменился цвет воды: из зеленовато-синей она стала коричневатой-желтой и бурлила, очевидно, от поднимавшегося газа. Днем 6 мая в озере произошел небольшой взрыв пара, за ним последовали другие, вначале с интервалом в один-два часа, но затем частота и сила взрывов увеличились, а утром 7 мая они уже шли почти непрерывно; туча пара и пепла поднялась в воздух на 10 тыс. м. Те немногие люди, которые еще оставались на западном склоне, видели ее и все поспешно бежали оттуда. Однако и в это время большинство людей, находившихся на восточном склоне, не чувствовали опасности, возможно, потому, что вершина горы была скрыта пассатными облаками, за исключением нескольких человек, которые около 13 часов дня попытались перебраться через сухое русло Рабака на юг, и увидели, что оно превратилось в стремительный поток горячей грязи глубиной 15 м. Такой же поток неся в это время и на другой стороне вулкана по руслу реки Валибу. Едва ли можно сомневаться в том, что эти мощные потоки были вызваны эксплозивным выбросом воды из кратерного озера.

Извержение все усиливалось, и около 14 часов с горы ринулась громадная туча газа и пепла, сверкавшая в неярком свете пасмурного дня огненно-красными и пурпурными бликами и обрамленная с боков и сверху облаками пара от кипящей кругом воды. Со стороны было видно, что туча скрыла всю гору. Она пронеслась по всем склонам горы, ломая деревья или вырывая их с корнем, опрокидывая стоявшие на ее пути стены, уничтожая дома и вызывая пожары. За несколько минут была опустошена почти вся северная треть острова. Более 1500 человек погибло, хотя удивительно большому количеству людей удалось спастись в погребах или в прочных каменных домах. Оставшиеся в живых (многие из них почти совсем не пострадали) описывают проход палящей тучи как внезапное ощущение сильного жара и невыносимого удушья, которое продолжалось, к счастью, всего несколько минут. Эта туча представляла собой лавину раскаленного пепла с примесью более крупных обломков. Т. Андерсон и Дж. Флетт (британские вулканологи, исследовавшие спустя короткое время результаты этого извержения) сделали вывод, что лавина образовалась вследствие обильного выпадения на склоны вулкана пепла из тучи, возникшей при вертикально направленном взрыве; теперь мы считаем, что большая подвижность лавины была обусловлена присутствием расширяющегося газа между частицами пепла.

На острове Мартиника, находящемся в 160 км от острова Сент-Винсент, расположен вулкан Мон-Пеле. Он образует северный конец острова. Как и вулкан Суфриер, конус Мон-Пеле имеет неоднородное строение и сложен слоями как лавы, так и тефры; на вершине его также располагается двойной кратер (фиг. 2.12), а в более древнем кратере — небольшое озеро Лак-де-Пальмист. Юго-западнее, в более молодом кратере, до 1902 г. также было небольшое озеро Этан-Сек, обычно сухое. Оба кратера располагались в более обширной чашеобразной котловине, представляющей собой, вероятно, остаток обрушившейся кальдеры. С трех сторон стенки молодого кратера поднимались круто, но на юго-западе V-образное ущелье вело через стенку кратера к началу долины реки Ривьер-Бланш. Такой рельеф в большой степени обусловил характер последовавших событий. Долина Ривьер-Бланш круто спускается на юг-юго-запад, а затем, примерно в 1,5 км от кратера, резко поворачивает (и это особенно важно!) на запад. Другие долины расходятся от вершины горы радиально. В 6 км к югу от кратера лежал город Сен-Пьер — один из самых веселых и процветающих городов Карибского бассейна, где главным занятием населения был экспорт рома.

Последнее (перед 1902 г.) извержение Мон-Пеле было в 1851 г., когда пепел и шлак выпали на склоны горы, не причинив



Фиг. 2.12. Карта вулкана Мон-Пеле, расположенного на северном конце острова Мартиника [10].

Показаны путь лавящей лавины 8 мая 1902 г., путь палящей тучи, уничтожившей город Сен-Пьер; показаны также области, опустошенные при пароксизмах 8 мая и 30 августа, и другие площади, покрытые во время извержения пеплом. 1—область, опустошенная 8 мая; 2—область, опустошенная 30 августа; 3—область, погребенная под слоем принесенного ветром шлака и пепла; 4—путь палящей лавины 8 мая; 5—направление движения палящей тучи, сопровождавшей лавину 8 мая и уничтожившей город Сен-Пьер.

большого вреда. Новое извержение началось примерно 20 апреля и вначале представляло собой довольно слабые выбросы пепла и шлака, в результате чего в кратере Этан-Сек постепенно вырос небольшой конус. В течение следующей недели северо-восточный пассат проносил над Сен-Пьером на юго-запад пепел и сернистые газы, пугая некоторых жителей и всем доставляя неприятности. Когда извержение слегка усилилось, птицы стали падать на улицы города мертвые от удушья; многие жители бежали в безопасную южную часть острова, но многие остались, а многие пришли в город из деревушек, находившихся ближе к вулкану. Общее население города осталось примерно на уровне 30 тыс. человек. Почему люди остались? В основном, по-видимому, по политическим причинам: были назначены важные выборы и каждый должен был находиться в своем избирательном округе. Правительство настаивало на том, чтобы жители оставались в городе и могли бы голосовать, а комиссия, назначенная губернатором для исследования извержения, пришла к выводу, что оно проходит так же, как в 1851 г., и не представляет непосредственной угрозы для Сен-Пьера. Такая уверенность оказалась ошибкой. Чтобы успокоить жителей, сам губернатор занял свою резиденцию в Сен-Пьере. Покинуть ее он уже никогда не смог.

В конце апреля и в первые дни мая уровень воды в Ривьер-Бланш очень сильно колебался. 29 апреля и 1 мая это был ревущий поток, 2 мая русло было почти сухое, а 3 мая река

снова стала стремительной и полговодной, причем, насколько это известно из рассказов и наблюдений, наводнение не было вызвано какими-нибудь необычно сильными дождями. Река оставалась такой и утром 5 мая, а вскоре после полудня в кратере произошел мощный взрыв; грязная вода, остававшаяся в озере Этан-Сек, была выброшена в верховья реки, и огромный поток горячей черной грязи, рванувшийся вниз по долине, полностью залил сахарный завод, который находился в устье реки; несколько человек погибло. В следующие два дня вздулись все ручьи, стекавшие с горы, и в нескольких долинах образовались грязевые потоки. Причина их появления остается неясной; едва ли они связаны только с дождями, так как необычно сильных дождей не было. Озеро Лак-де-Пальмист не было затронуто извержением, а Этан-Сек в первые дни извержения представляло собой озерко шириной около 200 м и глубиной всего в несколько метров. Объем его явно был недостаточен, чтобы вызвать наводнение даже одной Ривьер-Бланш, не говоря уже о других речных долинах.

А люди все еще жили в Сен-Пьере! 8 мая в 7 часов 50 минут чудовищной силы взрывы потрясли вулкан, и в стратосферу поднялся гигантский черный столб. В тот же самый момент другая туча устремилась почти горизонтально на юго-запад через ущелье в стене кратера. Разрастаясь и покрываясь клубами пара, она понеслась по долине Ривьер-Бланш. Ее возникновение видели с кораблей, находившихся в гавани Сен-Пьера, но наблюдать ее пришлось недолго, так как меньше чем через 2 минуты она обрушилась на город, пройдя свой путь со скоростью больше 160 км/ч, и в следующие несколько минут почти все 30 тыс. жителей были уже мертвы (фото 8.1).

Взрывная волна была значительно мощнее, чем на Сент-Винсенте. Ее воздействие описано следующим образом [13]:

«Каменные стены толщиной 1 м были опрокинуты и разбиты на куски, большие деревья вырваны с корнем, 130-миллиметровые пушки сдвинуты со своих лафетов, а 3-тонная статуя отброшена на 4 м от постамента. С оставшихся деревьев были сорваны листья и ветви, а на многих деревьях на стороне, обращенной к вулкану, кора была содрана и на голом стволе остались борозды, выпавшие струями песка. В гавани большинство судов было перевернуто и затонуло, некоторые были уничтожены огнем. Остались только два судна. Большинство из тех немногих людей, кто остался в живых после этой трагедии, находились на этих двух судах или были сброшены в воду с кораблей, которые потом затонули; почти все они получили страшные ожоги. Часто рассказывают, что в самом городе в живых остался только один человек — заключенный, находившийся в каземате, где было только одно крошечное окно, глядевшее в



сторону, противоположную вулкану. В действительности уцелели человека четыре: двое из них оказались у самого края тучи, а другие остались живы по какой-то странной случайности — все вокруг них погибли. Оставшиеся в живых мало что могли рассказать о взрывной волне, кроме того, что вдруг наступила кромешная тьма; что тучи горячей пыли, смешавшись с водой, превратились в обжигающую грязь; что короткое время был сильный жар и ощущение непреодолимого удушья. То первоначальное сильное повышение температуры, которое было связано с самой взрывной волной, продолжалось, по-видимому, совсем недолго, самое большее несколько минут.

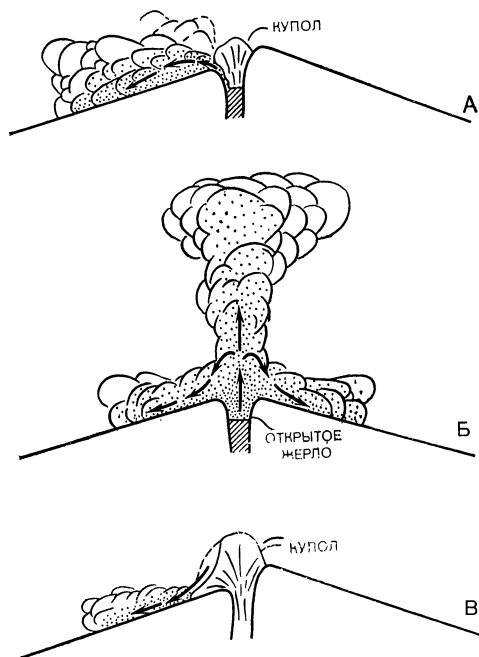
Увечья и раны, вызвавшие смерть, ужасны. Во многих случаях подлинной причиной смерти было, вероятно, вдыхание раскаленного газа. Тела сильно обожжены, в том числе и тела оставшихся в живых. Со многих силой взрывной волны сорвана одежда, на других одежда осталась и даже не обгорела, хотя на теле под ней оказались жестокие ожоги. Ткани тел растянуты, и во многих случаях разошлись черепные швы. Увечья похожи на те, которые бывают при резком нагреве до такой температуры, когда вода в человеческом теле превращается в пар, но ткани не воспламеняются (из-за недостаточной температуры или из-за кратковременности нагревания).

Температуру самой взрывной волны оценить трудно. Значительная часть города сгорела, и высокую температуру можно частично объяснить пожарами, вызванными горением сотен тысяч литров рома, хранившегося на складах. Но температура была достаточной, чтобы воспламенились деревянные палубы судов, стоявших в гавани, в тех местах, где скапливалась горячая пыль, а в тех частях города, где обширных пожаров не было, температура все же была такой высокой, что размягчились стеклянные предметы. Обычно считают, что температура взрывной волны в момент ее выхода из кратера была около  $1000^{\circ}\text{C}$ , а температура тучи, пронесшейся над городом, была все еще между  $700$  и  $1000^{\circ}\text{C}$ . Толщина слоя пыли, оставленной тучей в городе, составляла в среднем всего лишь около  $30$  см.

Разрушение города было почти полным. Мало что осталось, кроме разрушенных каменных стен, скрученных листов железной кровли и других металлических обломков».

Туча, которая произвела такое опустошение в Сен-Пьере, была всего лишь сорванной верхушкой палящей лавины, спускавшейся по долине Ривьер-Бланш. Когда лавина достигла крутого изгиба долины на запад, она повернула и понеслась дальше по руслу к морю (фиг. 2.12), но клубившаяся над ней пылевая туча поднялась у этого изгиба по склону долины и пошла дальше, прямо на город.

Извержение не прекращалось весь 1902 г. и продолжалось в 1903 г. Было еще несколько палящих лавин, но теперь вулканологи находились рядом и были готовы изучать их. Некоторые лавины прошли по тому же пути, что и 8 мая, несколько лавин спустилось и по другим склонам. Французский вулканолог Лакруа сделал вывод, что громадные лавины, срывавшиеся по руслу Ривьер-Бланш, возникали не вследствие падения огромных масс тефры, которая выбрасывалась более или менее вертикально, а в результате взрывов, направленных в стороны под



Фиг. 2.13. Схемы образования различных типов палящих лавин [13].  
А — пелейский тип,  
Б — суфриерский тип,  
В — меропийский тип

небольшим углом через ущелье в стенке кратера. Такое направление взрывов объяснялось тем, что в жерле вулкана образовалось препятствие — купол из вязкой лавы, которая начала нагромождаться в самом начале извержения. Этот купол мешал вертикально направленным взрывам, но между ним и ложем кратера было слабое место, где и возникал канал, направлявший взрывы латерально (фиг. 2.13, А). Вывод Лакруа был подтвержден наблюдениями, выполненными Перре при таком же извержении Мон-Пеле в 1929 г. Таким образом, мы имеем два механизма образования палящих лавин: латерально направленный взрыв, когда возникает то, что обычно называют пелейским типом палящих лавин, и массивное выпадение

материала после вертикально направленного взрыва, в результате чего образуется лавина суффриерского типа (фиг. 2.13, Б).

Палящая лавина, возникшая на склонах Суффриера в 1902 г., отличалась от лавин Мон-Пеле более низкой температурой тучи, меньшей скоростью, что в свою очередь обусловило меньшую силу взрывной волны и меньшую разрушительность. На склонах Суффриера возникло сравнительно мало пожаров, причем они чаще начинались от молний, а не из-за высокой температуры тучи. Многие прочные постройки уцелели, и много людей на опустошенной площади осталось в живых. Лавины спустились по всем склонам горы одновременно, а не были ограничены каким-то одним сектором. Сравнительно низкая скорость, всего 30—50 км/ч, была результатом того, что движущей силой была только сила тяжести, а склоны горы были очень пологи, тогда как лавины Мон-Пеле получали добавочный толчок полого направленного взрыва и срывались по крутым склонам верхней части долины Ривьер-Бланш.

Палящие лавины вулкана Хибокхибок (Филиппины, 1951 г.) были похожи на лавины Мон-Пеле. В 1949 г. в кратере начал расти купол, который в конце концов распространился через понижение в стенке кратера на верхнюю часть склона горы. Возникшая 4 декабря 1951 г. палящая лавина (фото 2.9), которая унесла 500 человеческих жизней на окраинах города Мамбахао, образовалась главным образом в результате полого направленного взрыва, вырвавшегося наружу у основания купола. Однако здесь, как и на Мон-Пеле, сработал и другой механизм: взрывы выносили материал купола, тем самым подкапывая его верхнюю часть, которая затем обрушилась. Это тот механизм, посредством которого возникает палящая лавина так называемого мерапийского типа (фиг. 2.13, В).

На вулкане Мерапи (центральная Ява) несколько куполов образовали цепочку, которая протягивается через вершинный кратер сложно построенного конуса, причем последний купол выходит за край кратера на внешний склон горы. По мере роста этого купола его внешняя часть становится неустойчивой и дробится на куски; иногда обрушиваются крупные глыбы, которые соскальзывают по склону, постепенно разваливаясь на все более мелкие обломки. Эта горячая масса становится — в результате высвобождения газа из обломков и (или) нагревания воздуха между ними — очень подвижной и превращается таким образом в стремительную палящую лавину (фиг. 2.14). Такие же лавины возникли в результате обрушения фронтальных частей толстых лавовых потоков на крутых склонах вулканов Фуго (в Гватемале) и Исалько (в Сальвадоре).

Палящие лавины вулкана Ламингтон (Новая Гвинея), опустошившие во время извержения 1951 г. площадь около

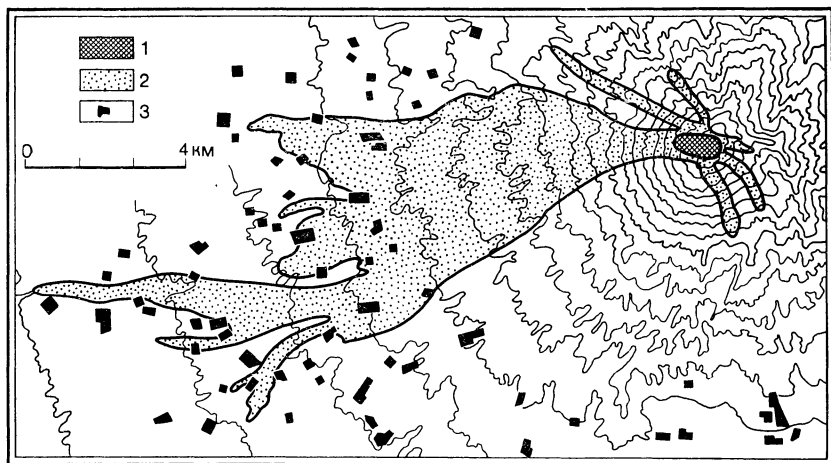


Фото 2.9. Палящая лавина, несущаяся мимо города Мамбахао (на переднем плане) по нижней части склона вулкана Хибокхибок, Филиппины, 4 декабря 1951 г.

Во время этого извержения под палящими лавинами погибло более 500 человек, живших близ Мамбахао.

230 кв. км и унесшие почти 3000 человеческих жизней, были того же типа, что на Сент-Винсенте, точно так же, как и лавины вулканов Майон на Филиппинах (1968 г.) и Ареналь в Коста-Рике. Палящие лавины Майона спускались по долинам со скоростью около 100 км/ч, а там, где они смешивались с текущей водой, возникали грязевые потоки. Площадь, опустошенная лавинами Ареналья, составила только около 13 км<sup>2</sup>, но были уничтожены две деревни и погибло не менее 78 человек. От выпадения пепла и разброса глыб пострадала более обширная площадь.

Ввиду того что небольшие палящие лавины спускаются по долинам, можно было бы воздействовать на их движение посредством отводных барьеров вроде тех, которые предложены для лавовых потоков. Однако высокая скорость лавин позволит им легко преодолеть такие барьеры, и некоторое «выплескивание» материала лавины, даже материала ее нижней части,



Фиг. 2.14. Карта вулкана Мерапи (центральная Ява) [18, 19].

Показаны площадь распространения палящих лавин 1930 г. и многочисленные деревни, рассеянные в нижней части склонов вулкана. 1 — купола; 2 — палящие лавины 1930 г.; 3 — деревни.

кажется почти неизбежным; никакой барьер нельзя сделать таким высоким, чтобы он смог отвести идущую над лавиной тучу раскаленной пыли. Большая масса ее будет продолжать движение, как та туча, которая уничтожила Сен-Пьер, пройдя над высоким хребтом, отделявшим город от долины Ривьер-Бланш. Очевидно, от палящих лавин барьерами защититься нельзя.

Некоторые палящие лавины можно было бы задержать в речных долинах плотинами водохранилищ, но, как и в случае грязевых потоков, уровень воды в водохранилище должен быть очень низким, чтобы не произошло выплескивания воды и не возникло разрушительное наводнение в нижней части долины. Неизвестно, как поведет себя плотина под действием взрывов пара, которые будут возникать при соприкосновении горячих обломков с водой, но это нельзя упускать из виду. Даже подойдя к большому водохранилищу, лавина, вероятно, не остановится у его верхнего конца, а образует подвижную полужидкую смесь, которая будет нестись дальше (частично по дну озера), пока не достигнет плотины. Понижение уровня воды в водоемах для задержания палящих лавин должно производиться заблаговременно, и опять-таки важнейшее значение здесь имеет прогноз.

Поистине единственной защитой от возможных палящих лавин является их предсказание и эвакуация людей из областей, которые предположительно будут поражены этими лавинами. Опасность возникновения лавин мерапийского типа делается

очевидной, когда на склоне вулкана появляется активный купол или толстый лавовый поток. Когда купол находится в кратере, лавина меропийского типа возникнуть не должна, но возможна лавина пелейского типа, особенно если одна часть стенки кратера ниже, чем другие. В обоих случаях можно с большой уверенностью предвидеть, по какому пути пойдут лавины, следуя по существующим долинам. Лавины сен-винсентского (суффриерского) типа, по-видимому, особенно трудно предсказать, и в этом случае надо полагаться на предсказание извержения в целом и на сведения о прошлом поведении вулкана, так как вулкан, порождавший лавины в прошлом, даст их, вероятно, и в будущем. По всей видимости, вулканы, долгое время находившиеся в покое и начавшие подавать признаки пробуждения, должны вызывать особую тревогу, так как первое извержение после долгого молчания бывает, как правило, очень мощным, хотя извержения большой силы не обязательно возникают после долгого покоя.

Восстановление для сельского хозяйства земель, покрытых отложениями палящих лавин, может оказаться трудным делом из-за большого количества крупных глыб. Если лавина принесла немного крупных обломков, то используется примерно такая же обработка, как в случае пепловых отложений. Как и вулканический пепел, материал лавин будет плодородным (когда из него выщелочится избыток кислот) благодаря, как правило, большому содержанию в нем легко разлагающегося стекла. Очевидно, скорость возрождения растительности сильно зависит от климата: в теплом влажном климате Карибского региона отложения лавин 1902 г. на склонах Суффриера снова покрыты теперь буйной растительностью.

**Пепловые потоки.** По механике своего движения пепловые потоки похожи на палящие лавины. По сути дела, между пепловыми потоками и лавинами суффриерского типа четкой разницы нет. Главное (если не единственное) различие состоит в том, что пепловые потоки образуются при менее эксплозивных извержениях и главным образом в результате излияния материала из жерла, а не вследствие выпадения из вулканической тучи. Несомненно, однако, что иногда вертикальный выброс материала связан с образованием пепловых потоков, а простое переливание через край жерла при некоторых извержениях порождает палящие лавины суффриерского типа; такие лавины возникали во время извержения самого Суффриера в 1902 г.

Извержение пепловых потоков обычно происходит из трещинных жерл; расширяющаяся суспензия, в которой обломки вулканического стекла находятся в газовой пене, быстро растекается во все стороны. Движение пепловых потоков

направляется силой тяжести, поэтому потоки подчиняются рельефу и стремятся течь по долинам, но благодаря своей высокой скорости они могут и забираться на довольно крутые склоны. Вследствие своей высокой текучести они приобретают, останавливаясь, почти горизонтальную поверхность.

Все сказанное о поведении пепловых потоков почти полностью основано на дедукции, так как мы никогда не видели активных пепловых потоков. Только один или два таких потока излились в историческое время, и это произошло в ненаселенных районах; если кто-то их и видел, то не остался в живых после извержения. Высокая скорость этих потоков и их смертоносный характер не позволяют рассчитывать на то, что когда-либо удастся наблюдать их с близкого расстояния.

Единственный несомненный исторической пепловый поток возник во время извержения вулкана Катмай в 1912 г. В начале извержения в верхней части долины, проходящей западнее Катмая, открылись трещины и из них потекла большая масса пепла, который спустился по долине на расстояние около 20 км, причем менее чем за 20 часов извергся материал общим объемом 11 км<sup>3</sup>. К концу извержения на одном участке образовался низкий пепловый конус, а внутри его вырос купол, позднее получивший название Новарупта. Отложения пеплового потока заполнили долину, причем толщина их составила десятки метров. Поверхность этих отложений образовала почти плоское новое дно долины. Несколько лет никто не посещал эти места, но когда, наконец, туда попал Р. Григгс, он увидел, что дно долины дымится несчетным количеством фумарол, которые, как потом было доказано, возникли в результате соприкосновения грунтовых вод с горячей внутренней частью отложений. Григгс назвал это место Долиной Десяти Тысяч Дымов.

Некоторые пепловые потоки изливаются из концентрических трещин близ вершин больших вулканических конусов; обычно при этом излияние очень большого объема материала связано с обрушением вершины конуса и образованием крупной кальдеры. В качестве примера можно упомянуть вулкан Асо в Японии, однако есть множество других примеров, в том числе пепловые потоки, связанные с обрушением вершины вулкана Ме-зама (в Орегоне) и образованием кальдеры Крейтер-Лейк. Это извержение описано в разделе 2.3. Такие же потоки возникли и при извержении вулкана Безымянного на Камчатке в 1956 г. (также описано ниже); возможно, что потоки Безымянного надо считать еще одним историческим примером настоящих пепловых потоков.

В прошлом же громадные пепловые потоки изливались в разных частях земного шара. Они образовали большую часть Риолитового плато острова Северный Новой Зеландии, слагают

обширные области Армении и еще бóльшие площади вокруг озера Тоба на Суматре. Пепловый поток Номлаки в северной Калифорнии прошел, очевидно, не менее 100 км, а в южной Неваде и в соседних районах Юты некоторые потоки прошли еще большее расстояние. Отложения отдельных потоков имеют мощность более 100 м, а объем некоторых пепловых потоков превышает 1000 км<sup>3</sup>. Спекание пепла в потоках может происходить при температуре не ниже 535 °С, а так как даже на краях потоков материал находится в спекшемся состоянии, значит, он не сильно остывал при движении, т. е. оно происходило, следовательно, с очень большой скоростью. Подсчитано, что потоки вытягивались на расстояние до 300 км, вероятно, всего лишь за 2—3 часа.

Очень высокая скорость и большой объем многих пепловых потоков делают безнадежными попытки защититься от них или воздействовать на них. Единственная возможность избежать в будущем связанных с ними человеческих жертв в малонаселенных районах — это предсказывать извержения и эвакуировать людей, находящихся в опасной области. Однако дать такой прогноз будет чрезвычайно трудно, потому что мы не знаем пока, на какие именно особые признаки надо обращать внимание, и это не удастся узнать без наблюдения нескольких пепловых потоков. Успокаивает только то, что они случаются очень редко, и в историческое время не отмечено ни одного действительно крупного потока, так что можно надеяться, что они будут возникать столь же редко и в ближайшем геологическом будущем.

Поверхность отложений пепловых потоков сделать пригодной для сельского хозяйства, очевидно, так же легко, как поверхность отложений пепловых выбросов, и даже легче, чем поверхность, образованную палящими лавинами, так как пепловые потоки несут меньше крупных обломков; до сих пор, однако, еще никому не приходилось осваивать такую поверхность. Здесь возникают другие проблемы: большая рыхлость этих отложений и высокая водопроницаемость, из-за которой корни растений могут остаться без воды; кроме того, такая поверхность будет очень легко размываться, забивая местные водотоки большим количеством обломочного материала.

**Вулканические газы.** Львиная доля всего газа, выделяемого вулканами, приходится на водяной пар, но вместе с ним в различных пропорциях выделяются и другие газы; среди них главные: двуокись углерода (углекислый газ) CO<sub>2</sub>, окись углерода CO, серные газы SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, сероводород H<sub>2</sub>S, хлористый водород HCl и фтористый водород HF. Все эти газы при значительной концентрации вредны для растений и животных. Некоторые газы приносят вред даже при очень небольшом их содержании. Сер-



нистый и серный ангидриды, соединяясь с водой, образуют соответственно сернистую и серную кислоту. С подветренной стороны от дымящих жерл часто образуется туман, состоящий из аэрозоля кислот.

Газы могут выделяться через главное эруптивное жерло (или через несколько жерл) вулкана, но часто они выходят и через сравнительно узкие отверстия, через которые никогда не извергались ни лава, ни пепел. Отверстия, через которые выделяется только газ, называются *фумаролами*, а о самом процессе выхода газа без извержения лавы или тefры часто говорят как о фумарольной деятельности. Обычно фумарольная деятельность продолжается в течение нескольких недель, месяцев или лет после окончания извержений лавы или тefры. Фумаролы, выделяющие серные газы, называются *сульфатарами*, а низкотемпературные фумаролы, выделяющие много  $\text{CO}_2$  (иногда  $\text{CO}$ ), — *мофеттами*. Газы выделяются лавовыми и пепловыми потоками либо по всей их поверхности, либо в виде четко локализованных фумарол.

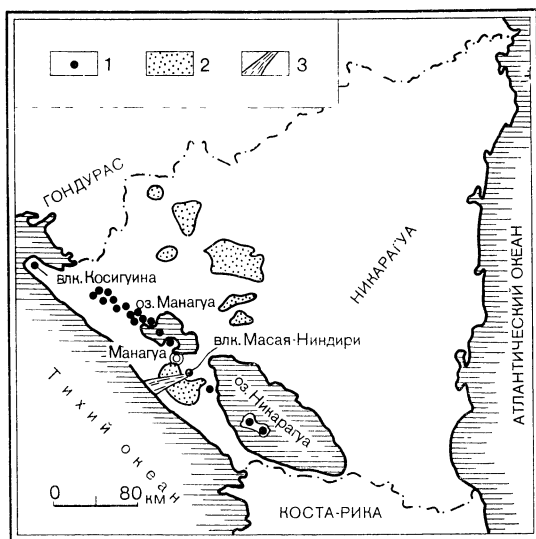
Кислотные газы вредны и для растительности, и для металлов. Когда ветер относит такие газы в сторону от вулкана, повреждается листва и опадают плоды; это может вызвать полное оголение и гибель растений. Там, где среди вредных газов преобладают серные, их воздействие на листву очень похоже на то, как действуют на нее дым металлургических заводов или сильный городской смог.

Вулкан Масая-Ниндири в Никарагуа — сложный двойной конус с несколькими кратерами. За последнее столетие было несколько периодов, каждый по несколько лет, когда одно из жерл в кратере Сантьяго выделяло много водяного пара и серных газов, которые держались над кратером в виде большого облака. Вулкан располагается в центральной впадине Никарагуа, его высота всего лишь около 700 м. К западу от него находится возвышенность, и кофейные плантации поднимаются по ней на высоту несколько большую, чем вершина вулкана. Ветры относили газовое облако на запад, и оно захватывало полосу шириной 5—8 км (фиг. 2.15), внутри которой на площади примерно 150 км<sup>2</sup> плантациям причинялся ущерб на сумму в десятки миллионов долларов; страдали также посевы пшеницы и других зерновых культур вплоть до самого Тихого океана. Проволочные изгороди, телефонные провода и металлическое оборудование на плантациях и на цементном заводе у побережья повреждались кислотами. Точно такой же ущерб был нанесен плантациям кофе и других культур к западу от вулкана Ирасу в Коста-Рике.

При извержении Катмая в 1912 г. в Сьюарде и Кордове, соответственно в 400 и 575 км от вулкана, выпал кислотный дождь, вызвавший ожоги на коже людей и повредивший как раститель-

ность, так и металлы. У мыса Спенсер, на удалении 1100 км, под действием газов потускнели медные предметы. Медленно смещаясь на юг, уже через месяц, газы достигли Ванкувера, и кислотные дожди повредили вывешенную для просушки одежду. Уже упоминалось об отравлении животных при извержениях Геклы фтористоводородной кислотой, прилипшей к частицам вулканического пепла.

Самые коварные из вулканических газов —  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , так как они невидимы и не имеют запаха. Окись углерода вызывает побеление и опадение листвы и отравление животных. Двуокись углерода не оказывает серьезного действия на растения, но может вызвать удушье у животных, так как углекислый газ тяжелее воздуха и иногда образует скопления в понижениях



Фиг. 2.15. Карта Никарагуа, показывающая расположение вулкана Масая (Масая-Ниндири) и район, которому был причинен ущерб вулканическими газами [32].

1 — действующие или дремлющие вулканы; 2 — районы возделывания кофе; 3 — область, наиболее пострадавшая от вулканических газов.

рельефа. Если в небольшой долине имеется мофетта, то при определенном направлении ветра может накопиться углекислый газ, и попавшие туда животные и даже люди могут задохнуться. Такие «ущелья смерти» известны на склонах некоторых индонезийских вулканов, а одно такое ущелье существовало раньше в горах Абсарока в Вайоминге. При извержении Геклы в 1947 г. двуокись углерода образовала в лощинах такие газовые «озера», и попавшие туда овцы гибли от удушья; люди же не пострадали, так как их головы были выше поверхности слоя  $\text{CO}_2$ . При недавнем извержении вулкана Эльдафедль углекислый газ и отчасти угарный ( $\text{CO}$ ) и серный газы скапливались в подвалах домов Вестманнаэйяра, и один человек погиб от газов. Это единственная жертва извержения.

Можно привести бесчисленное множество других примеров ущерба, причиненного газами растениям и людям. Что можно предпринять, чтобы уменьшить или устранить вредное действие газов? Предложены различные способы химической обработки пострадавших растений, нейтрализующей действие газов; некоторые из них испытаны экспериментально. Наиболее перспективным пока представляется способ распыления извести, создающий защитный слой на листьях. Будет ли этот способ практически применим, пока не ясно. В таких областях, как западная возвышенность Никарагуа, часто идут сильные дожди, которые будут смывать известь с листьев; потребуется частое распыление, и стоимость его будет высока, хотя, возможно, и не чрезмерно.

Обычные противогазные маски, такие же, как на многих промышленных предприятиях, вероятно, могут обеспечить надлежащую защиту людей, попавших на короткое время в облако вулканического газа. В большинстве случаев в таком облаке содержится достаточно воздуха, годного для дыхания, при условии удаления или нейтрализации вредных газов. В случае отсутствия масок некоторую защиту дает прижатая к лицу тряпка, смоченная водой, а лучше — слабой кислотой, например уксусом или мочой. Когда в лощинах или подвалах скапливаются тяжелые газы, то воздуха уже становится недостаточно для дыхания, и газовая маска бесполезна, если только она не снабжена автономным запасом воздуха. Зная о возможности скопления в том или ином месте тяжелого газа, можно предупредить людей об этом и тем самым избежать многих несчастных случаев.

Вероятно, самая интересная попытка воздействовать на вулканические газы была предпринята у вулкана Масая-Ниндири. Начиная с 1924 г. газ, выходящий из кратера Сантьяго, причинял большой ущерб кофейным плантациям, и их владельцы наняли двух немецких инженеров, чтобы те попытались закрыть жерло на дне кратера и направить газ по трубе к стенке кратера, где из газа можно было бы делать серную кислоту. В начале 1927 г. инженеры установили около километра труб диаметром 1 м и были готовы соединить их с жерлом с помощью огромной опрокинутой воронки. Но жерло представляло собой продолговатую трещину, и, чтобы приспособить ее к размеру воронки, инженеры предложили завалить ее часть булыжником, который предстояло добыть путем разрушения стенок кратера динамитом. Взрывы были надлежащим образом проведены, но результат был не тот, какой ожидался. Обрушилась вся поверхность кратера, причем значительная его часть провалилась примерно на 120 м! Большая часть трубы была уничтожена. Жерло оказалось в общем закрыто, и выделение газа сократилось до четверти прежнего количества. Изменив свое намерение, ин-

женеры взорвали другую часть стены кратера, чтобы полностью закрыть жерло, и выделение газа прекратилось.

Период, когда не было выделения газа, продолжался 19 лет, но в 1946 г. открылось новое жерло, и снова вулкан стал дымить, повреждая кофейные деревья. Опять были предложены различные решения этой проблемы, в том числе постройка крупной дымовой трубы высотой 250 м, чтобы вывести газ достаточно высоко в воздух и направить его над возвышенностью, где он уже не смог бы причинить вреда. Другое предложение состояло в том, чтобы сбросить в кратер атомную бомбу и тем самым закрыть жерло. Сотрудник Геологической службы США Р. Уилкоккс изучил положение и отверг идею о большой трубе ввиду неустойчивости основания, на котором ее надо было бы строить, и ввиду того, что в любое время положение газового жерла может измениться, что сделает трубу бесполезной. Атомная бомба была исключена из-за риска атмосферного распространения радиоактивного материала. С другой стороны, проведя небольшой взрыв или сбросив в кратер обычные бомбы, можно было бы закрыть жерло и остановить выход газа, как это было сделано в 1927 г., и, хотя через некоторое время жерло почти наверняка откроется снова, можно было бы рассчитывать на временное облегчение. В 1953 г. в кратер были сброшены две среднего размера бомбы, однако без сколько-нибудь заметного результата.

Для разработки общих проблем воздействия на вулканические газы и понижения их вредного воздействия требуются дальнейшие большие усилия.

### 2.3. Извержения-катаклизмы

Конусы больших континентальных вулканов обычно сложены чередующимися слоями тефры и лавы. Они называются *сложными вулканами*. Обычно в конце их развития происходят крупные эксплозивные извержения, когда выбрасываются многие кубические километры стекловатого пепла и пемзы, образующихся при застывании магмы, вынесенной из-под вулкана. Извержение такого большого количества магмы лишает вулкан опоры, и в результате часто происходит обрушение верхней части конуса и образование кальдеры.

Извержение Везувия в 79 г. н. э., во время которого смерть настигла Плиния Старшего, было именно такого типа, и такие извержения теперь часто называют *плинианскими*. Это самые мощные проявления вулканизма, и, следовательно, они могут вызвать катастрофические последствия. Извержение может состоять в основном или полностью из вертикального выброса пепла и пемзы, которые могут выпасть на площади во многие

тысячи квадратных километров, но обычно оно сопровождается палящими лавинами, пепловыми и грязевыми потоками, а лавовые потоки отсутствуют или имеют незначительные размеры. Эти извержения очень опасны, они несут с собой крупные разрушения разного рода. Здесь кратко описываются некоторые такие извержения.

**Озеро Крейтер, 5000 лет до н. э.** Озеро Крейтер в Орегоне представляет собой результат плинианского извержения. Оно располагается в кальдере размером 8—10 км и глубиной 1130 м, образовавшейся на вершине сложного вулкана около 7 тыс. лет назад. Перед извержением коническая гора, известная теперь как гора Мезама (гора Скотт), поднималась до высоты примерно 3900 м над уровнем океана. На поздней стадии развития этого вулкана на склонах конуса образовались концентрические трещины, по ним поднялась очень вязкая магма и возник ряд крутых куполов и толстых лавовых потоков — нынешние горы Хилмен, Граус-Хилл, Ляо-Рок и Раггет-Крест. Затем наступил период спокойствия, длившийся сотни или тысячи лет. Реки и ручьи прорезали склоны конуса глубокими долинами, а во время оледенения образовались ледники, которые, спускаясь по долинам, перепахали их и превратили из V-образных в U-образные (в поперечном сечении). Очевидно, облик горы был очень похож на современный облик вулкана Рейнир, только ледники занимали большую площадь.

Были ли какие-нибудь признаки того, что эта мирного вида гора будет извергаться снова? Возможно, у вершины появились фумаролы, и вероятно, что подземные толчки потрясали окружающую местность в течение нескольких дней или даже нескольких лет до катастрофы, но мы этого не знаем. Однако мы точно знаем, что период спокойствия окончился неистовым катаклизмом.

Извержение началось довольно слабой эксплозивной деятельностью с фонтанами пепла и пемзы, но его мощь быстро увеличилась, огромная туча тефры поднялась в воздух на высоту многих километров и, гонимая ветром, распространилась на громадные расстояния. Пепел выпал даже на территории Альберты и Британской Колумбии, а ближе к вулкану, на площади 13 тыс. км<sup>2</sup>, его толщина была больше 15 см (фиг. 2.16). Когда извержение достигло своей кульминации, по долинам устремились огромные лавины раскаленного пепла и пемзы. Они прошли путь до 60 км (фиг. 2.17) и протаскивали куски пемзы размером 2 м на расстояние до 30 км. Таяние льда и снега на склонах горы должно было вызвать переполнение рек и ручьев, а из воды, смешавшейся с пеплом и пемзой, образовались, очевидно, грязевые потоки. Общий объем выброшенного материала

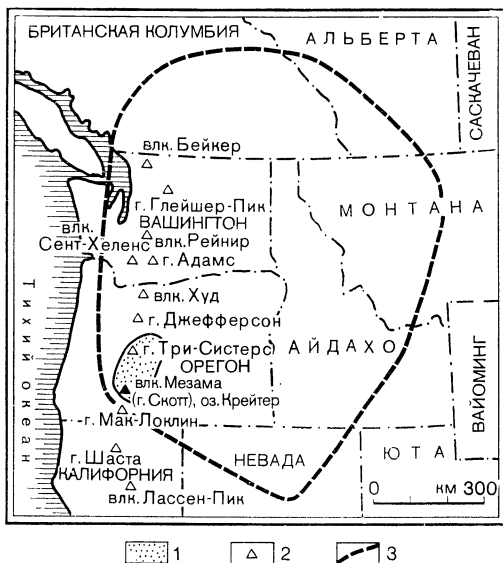


Рис. 2.16. Карта, показывающая расположение крупных вулканов Каскадных гор (штаты Вашингтон, Орегон и Калифорния) и область, покрытую пеплом при гигантском извержении вулкана Мезама (гора Скотт) около 5000 лет до н. э. [39].

1 — область, покрытая слоем пепла и пемзы толщиной более 15 см; 2 — крупные вулканы; 3 — приблизительная граница пепловых отложений;

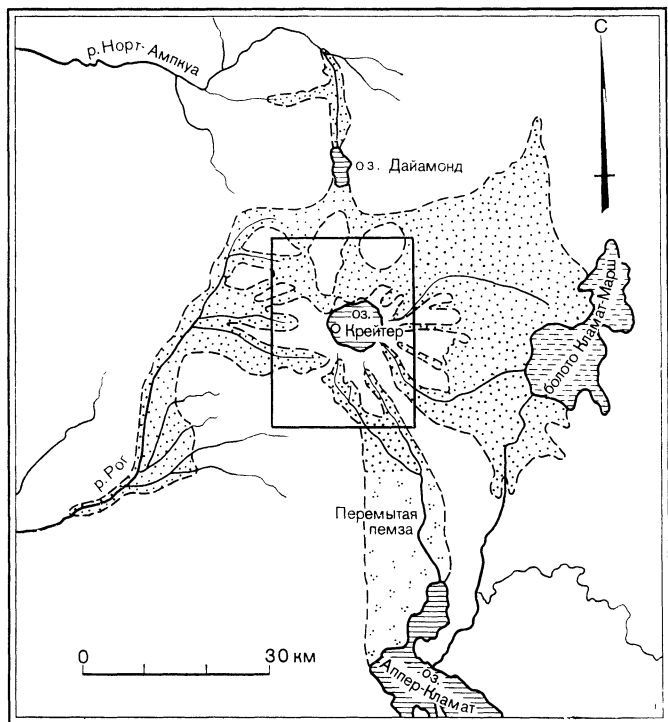
50—70 км<sup>3</sup>; удаление такого большого количества магмы привело к обрушению вершины горы и образованию кальдеры.

По аналогии с такими же событиями, происходившими в историческое время, можно предполагать, что все это гигантское извержение заняло, вероятно, всего несколько дней. После этого в кальдере накопилась дождевая и талая вода и образовалось озеро, а при нескольких сравнительно слабых извержениях появились лавовые потоки и шлаковый конус острова Уизард.

Вулкан Мезама был только одним из нескольких крупных вулканических пиков, располагающихся в ряд вдоль хребта Каскадных гор от южной Канады до северной Калифорнии (фиг. 2.16). Другие вулканы из этой цепочки вполне могли извергаться таким же образом, опустошая огромные территории.

**Вулкан Безымянный, 1956 г.** Безымянный — это один из вулканов Ключевской группы центральной Камчатки; до 1956 г. не было сведений о его извержениях, и он настолько не привлекал внимания, что остался «без имени». Это умеренных размеров сложный вулкан, выросший около более древнего купола, причем в кратере, лежащем между ними, располагается небольшой более древний конус. К востоку открывается глубокое ущелье, ведущее в долину реки Сухой Хапицы.

С 29 сентября 1955 г. начались землетрясения, очаги которых находились под древним вулканом; постепенно их частота



Фиг. 2.17. Карта окрестностей озера Крейтер (штат Орегон), показывающая размещение отложений палящих лавин, возникших при извержении вулкана Мезама (гора Скотт) около 5000 лет н. э. [35].

Прямоугольник в центре — территория Национального парка Крейтер-Лейк.

увеличивалась, вплоть до 22 октября, когда в поселке Ключи (24 км от вулкана) было записано около 1300 толчков. В этот день начались слабые и умеренные взрывы; к 9 ноября в Ключах отложился слой пепла толщиной 6 мм. В середине ноября извержение усилилось, облако пепла было выброшено на 5 км от вулкана и сместилось на восток за пределы суши. 17 ноября было так темно, что в Ключах пришлось зажигать свет в домах, а машины ходили с включенными фарами, но в конце ноября извержение резко ослабло и активность вулкана сохранялась на низком уровне до марта 1956 г.

30 марта в 17 часов 11 минут произошел ужасающей силы взрыв. Вулкан «выстрелил» плотную черную струю, которая понеслась на восток под углом 30—40° к горизонту и быстро достигла высоты более 30 км, а через 15 мин другой взрыв выбросил тучу пепла на высоту 43 км. В Ключах наступила непроглядная тьма, и в течение следующих трех с половиной часов

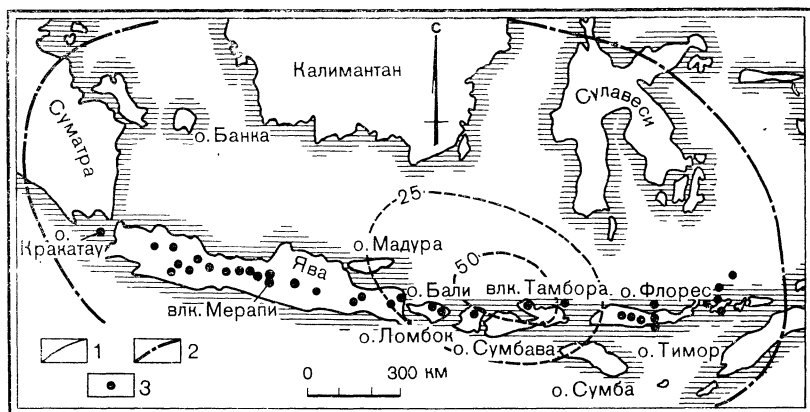
там отложился слой пепла толщиной 20 мм. Наблюдательный пункт, оборудованный в 10 км от вулкана, был полностью уничтожен (к счастью, в это время там никого не было); в 24 км от вулкана деревья диаметром до 25 см были срезаны под корень; в 30 км была полностью содрана кора на обращенной к вулкану стороне деревьев, а сухие стволы загорелись. В 10 км к востоку от вулкана толщина слоя выпавшего пепла была 50 см, в 30 км — 25 см.

Появление эксплозивной тучи сопровождалось потоками пепла и обломков пемзы; эти потоки четко показывают, что существует постепенный переход между пепловыми потоками и палящими лавинами суфриерского типа. Самый большой поток спустился через ущелье в долину Сухой Хапицы, прошел по ней 16 км, смешался там с текущей водой и превратился в грязевой поток, который затем соединился со множеством других грязевых потоков, образовавшихся на соседних склонах, и прошел по долине еще 80 км. Отложения лавин покрыли площадь 60 км<sup>2</sup> слоем толщиной до 50 м. Когда тучи рассеялись, оказалось, что вершина горы исчезла.

Ослабленная вулканическая деятельность продолжалась весь 1956 год. Несмотря на исключительную мощь извержения вулкана Безымянного, человеческих жертв, согласно сообщениям, не было: отчасти по удачному стечению обстоятельств, но главным образом потому, что окружающая территория была почти необитаемой. Подобное извержение в более населенном районе вызвало бы гибель огромного числа людей.

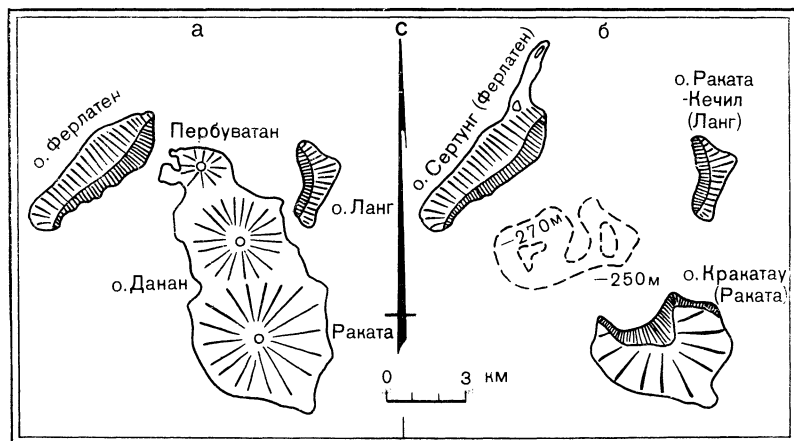
**Тамбора, 1815 г.** Извержение вулкана Тамбора, расположенного на острове Сумбава в 400 км восточнее Явы (фиг. 2.18), обычно считается величайшей эксплозией нескольких последних веков. Как и в случае вулкана Мезама, взрыв сопровождался образованием кальдеры. До 1812 г., когда в его кратере началась слабая эксплозивная деятельность, не было сведений об извержениях этого вулкана и он считался потухшим, а в апреле 1815 г. грандиозные взрывы выбросили пепел на высоту 20 км. Обломки пемзы размером до 13 см падали на расстоянии 40 км от вулкана. У его подножия толщина слоя тефры достигла 1,5 м. На острове Ломбок (150 км к западу от вулкана) и в районе Бима (90 км к востоку) толщина этого слоя была 50 см. Общий объем выбросов составил около 100 км<sup>3</sup>. На всей территории Сумбавы и Ломбока посевы были почти полностью уничтожены, в несколько меньшей степени — на островах Флорес и Бали. На Ломбоке от голода и болезней погибло около 44 тыс. человек, а на Сумбава умерло 48 тыс. человек — частично от голода, а частично в результате самих вулканических явлений.





Фиг. 2.18. Карта центральной Индонезии, показывающая положение вулкана Тамбора и область распространения пепла при его извержении в 1815 г. [23].

1 — линии одинаковой толщины слоя пепла (в сантиметрах); 2 — приблизительная граница распространения пепла; 3 — действующие вулканы.



Фиг. 2.19. Карта, показывающая положение островов группы Кракатоу (между Явой и Суматрой) [34].

а — до извержения 1883 г.; б — после извержения.

**Кракатоу, 1883 г.** Великое извержение Кракатоу отличается от извержения вулкана Мезама в основном тем, что обрушение кальдеры произошло в океане под водой, и это сопровождалось огромными волнами цунами (см. гл. 3). До 1883 г. над водой поднималась группа небольших островов (фиг. 2.19, а), но ниже

уровня моря располагался их общий корень — большой вулкан с кальдерой размером 8 км в поперечнике. Два острова — Ланг и Ферлатен (ныне острова Раката-Кечил и Сертунг) — представляли собой выступающие части стенки кальдеры, а третий отрезок этой стенки был почти полностью погребен молодым вулканическим конусом Раката. С ним слились два других молодых конуса — Данан и Пербуватан; все вместе они образовали главный остров Кракатау.

Последнее перед описываемыми событиями извержение произошло в 1680 г., и с тех пор острова покрылись буйной растительностью. В мае 1883 г. на соседних территориях Явы и Суматры ощущалось несколько слабых землетрясений, а 20 мая внезапно началось извержение Пербуватана, который выбросил пепел на высоту 10 км. Через несколько дней деятельность вулкана замерла, и было 3 недели покоя, но 19 июня извержение началось снова, и к первому жерлу добавилось другое — у подножия Данана. Слабое извержение продолжалось и в июле, не прекратилось оно и в августе, а к 11 августа начал извергаться и вулкан Раката. Таким образом, к концу августа жерла Кракатау были открыты и извержение длилось уже более 3 месяцев. Значит, извержения-катаклизмы происходят не только при закрытых жерлах!

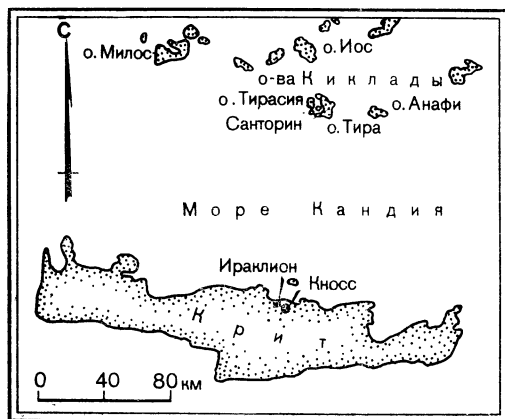
Самый катаклизм начался 26 августа и в сущности завершился к 28 августа. Он состоял из серии гигантских взрывов, сильнейший из которых (утром 27 августа) был слышен на расстоянии 4800 км. Пепел был выброшен на высоту 80 км; в радиусе 150 км воздушной волной были разбиты окна. На островах Ланг и Ферлатен 15-метровый слой выпавшего из воздуха пепла (и пемзы) был перекрыт 60-метровым слоем отложений палящих лавин. Большие куски плавающей пемзы загородили пролив. Всего было выброшено около 16 км<sup>3</sup> пепла и пемзы, и значительной толщины слой пепла покрыл площадь более 750 тыс. км<sup>2</sup>; говорят, что очень тонкий пепел распространился по всему земному шару.

Сами острова Кракатау были необитаемы, но в соседних районах Явы и Суматры в результате этого извержения погибло, главным образом утонуло во время цунами, около 36 тыс. человек.

**Санторин, 1500 лет до н. э.** Остров-вулкан Санторин (остров Тира) находится в южной части архипелага Киклады, в 110 км к северу от Крита (фиг. 2.20). Кульминационное извержение вулкана, около 1500 лет до н. э., которое в последние годы принято считать причиной гибели минойской цивилизации, во многих отношениях было похоже на извержение Кракатау.

Вулкан имеет сложное строение. Он состоит из нескольких заходящих один на другой конусов, образованных при извержениях из нескольких различных жерл. В центре находится затопленная кальдера размером 14 км в поперечнике, возникшая, как полагают, при извержении примерно в 1500 г. до н. э. Уже после этого в результате возобновления вулканической деятельности внутри кальдеры выросло несколько куполов.

Великое извержение началось сравнительно спокойно, на что указывает тонкий слой выпавшего из воздуха пепла. На нем лежат два пласта мощностью до 60 м, сложенные в основном пеплом с крупными кусками пемзы, структура которых напоминает структуру отложений, образованных базисными волнами описанного ранее извержения вулкана Тааль в 1965 г.



Фиг. 2.20. Карта, показывающая расположение вулкана Санторин (вулкан Каймени на острове Тира) относительно острова Крит. Острова Тира и Тирасия — внешние части вулкана, а находящаяся между ними кальдера залита морем.

Уничтожение древней цивилизации было, как думают, результатом выпадения тефры и отложений базисной волны, а также результатом одного или нескольких цунами, сопровождавших обрушение кальдеры. На острове Тира были погребены крупные минойские города; их развалины сохранились под слоями пепла и пемзы. Однако людей в этих городах во время катастрофы было мало или не было вовсе. Возможно, они бежали, почувствовав угрозу в начавшихся землетрясениях или во время более слабых ранних стадий извержения. В ближайших к вулкану районах Крита пепел и небольшие комья пемзы, выпавшие из воздуха, образовали слой толщиной 15 см — достаточный, чтобы серьезно повредить фруктовые деревья, уничтожить урожай и травы и тем самым вызвать гибель травоядных животных. Едва ли можно сомневаться в том, что возникли крупные цунами. Хотя они были, вероятно, гораздо меньше, чем предполагают некоторые исследователи, но они явно могли опустошить

северное побережье Крита на несколько десятков метров выше уровня моря и, возможно, они вызвали наводнение на прибрежных низменностях значительной части восточного Средиземноморья. (Легендарное наводнение Девкалиона — Ноя древних греков гипотетически отождествляется с этими цунами.)

Несмотря на то что это извержение разрушило города на острове Тира и на побережье Крита и причинило ущерб сельскому хозяйству на более обширной территории Крита, оно вряд ли могло само по себе уничтожить минойскую цивилизацию. Скорее всего, извержение было только одной из причин, ослабивших, возможно, это царство до такой степени, что оно стало легкой добычей микенцев или других завоевателей.

## 2.4. Размещение вулканов

Большинство ныне действующих вулканов находится в сравнительно узких зонах, протягивающихся близ краев тектонических плит Земли и в значительной мере совпадающих с главными зонами возникновения землетрясений (см. фиг. 1.1 и стр. 27). Основные характеристики вулканизма различаются в зависимости от типа границ плит.

Подавляющее большинство крупных извержений лавы происходит вдоль срединно-океанических хребтов, где плиты раздвигаются в разные стороны. Магма в этих зонах очень текучая и содержит мало газа, так что там почти не возникает условий, приводящих к магматическим эксплозиям; большинство извержений происходит в океане на больших глубинах, поэтому там невозможны ни магматические, ни гидромагматические взрывы. Если же извержение начинается на небольшой глубине, как у острова Суртсэй (к югу от Исландии), то, как правило, оно сопровождается гидромагматическими эксплозиями умеренной силы (см. стр. 103). В Исландии, которая считается поднятой выше уровня моря частью Срединно-Атлантического хребта, и там, где раздвигающиеся рифты пересекают континенты (например, в рифтовых долинах Африки), извержения бывают и спокойными, и умеренно эксплозивными.

С теми границами плит, где происходит латеральное скольжение плит относительно друг друга, связано очень мало действующих вулканов. Некоторые находятся во внутренних районах плит. Один из лучших примеров таких вулканов — Гавайский архипелаг. Согласно широко распространенной в настоящее время гипотезе, магма образуется здесь в результате плавления мантии Земли и выходит затем на поверхность Тихоокеанской плиты (см. фиг. 1.1), но, поскольку эта плита движется на северо-запад, возникший вулкан уходит от «горячей

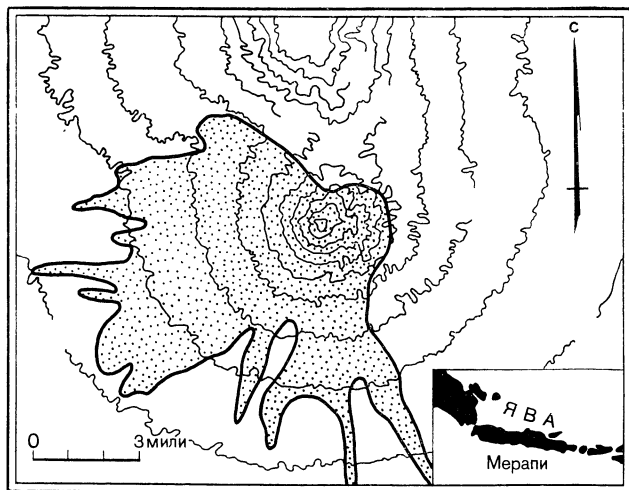
точки», позади него образуется другой вулкан, и таким образом формируется вся цепочка вулканических гор. Большинство гавайских извержений происходит сравнительно спокойно, однако некоторые другие вулканы внутренних районов плит более эксплозивны.

Большинство опасных вулканов находится в зонах, где края плит погружаются под соседние плиты и поглощаются затем мантией (см. фиг. 1.4). Там, где поглощается океаническая плита, вулканы располагаются на вышележащей плите, в нескольких десятках километров от ее края. Как правило, они извергаются эксплозивно, и среди выбрасываемого вулканами материала тефра составляет 45—99%. Для этих вулканов весьма характерны тепловые, грязевые и лавовые потоки, палящие лавины, мощные выбросы пепла. Если же, как в Гималаях, сталкиваются две континентальные плиты, то вулканы обычно не образуются.

## 2.5. Оценка вулканического риска

Установление степени опасности на любом вулкане или около него зависит в основном от знания прошлого поведения вулкана, а такое знание складывается из исторических данных об извержениях и из материалов геологического изучения состава и структуры вулканического конуса. Хотя можно предполагать, что поведение вулкана изменяется в результате эволюции магмы в расположенном под ним очаге, но все-таки чаще всего характер деятельности вулкана не меняется от извержения к извержению. Почти во всех вулканах эволюционное изменение магмы приводит к увеличению ее вязкости и содержания газа, а это в свою очередь ведет к появлению все более коротких и толстых лавовых потоков, к образованию куполов и ко все более эксплозивным извержениям. У некоторых вулканов эволюцию такого рода можно видеть на сравнительно коротком отрезке времени. Так, извержения Геклы (в Исландии) после коротких периодов покоя бывают сравнительно спокойными, лава — довольно жидкой, а длительное затишье завершается мощной эксплозией вязкой магмы, при которой выбрасывается огромное количество пемзы и пепла; со временем эксплозивность извержения уменьшается и появляется больше жидкой лавы. Более кислая, более вязкая и более богатая газом магма накапливается, очевидно, в верхней части магматической камеры, как сливки у горлышка бутылки с молоком, и прорывается на ранних стадиях извержения. Точно так же вел себя вулкан Фудзияма (Япония) во время извержения 1707 г.

После катастрофического извержения вулкана Келуд в 1919 г. вулканологическая служба Голландской Ост-Индии начала под-



Фиг. 2.21. Карта, составленная Голландской ост-индской вулканологической службой [20].

Показана область, где особенно велика опасность палящих лавин вулкана Мерапи (Ява). Горизонтالي проведены через 250 м.

готовку карт, показывающих те площади вокруг некоторых наиболее опасных индонезийских вулканов, где люди должны остерегаться будущих извержений. Области, обозначенные как опасные, включали в себя в первую очередь те места, которые были затронуты историческими извержениями, причем учитывались особенности деятельности отдельных вулканов и влияние рельефа на движение палящих лавин и грязевых потоков (фиг. 2.21). Позднее советские вулканологи составили такие же карты для областей, прилегающих к наиболее опасным из камчатских вулканов, где показали зоны различной степени риска. Сделано еще несколько оценок вулканического риска для других территорий, например для района города Окленд в Новой Зеландии [25].

В настоящее время Геологическая служба США исследует несколько вулканов Каскадных гор и Гавайских островов, чтобы установить, какие виды опасности следует учитывать применительно к каждому из них, и чтобы хотя бы в отдельных случаях показать на картах площади, которые будут, вероятно, затронуты разными проявлениями вулканической деятельности. В Каскадных горах наибольший риск связывают с выпадением пепла и грязевыми потоками. Одна из исходных посылок состоит в том, что любой из крупных вулканов Каскадных гор может дать эксплозивное извержение такой же силы, как извержение вулкана Мезама (описано ранее); предполагая, что

метеорологические условия будут такими же, как при том извержении, можно указать на карте площадь, где отложится столько пепла и пемзы, что это причинит серьезный ущерб (фиг. 8.5). В одном из более ранних исследований дана оценка опасности пепловых извержений аляскинских вулканов.

После извержения Килауэа в 1960 г. одного из авторов этой книги (Г. Макдоналда) попросили оценить опасность, связанную с вулканической деятельностью на острове Гавайи. Эта опасность почти полностью связана с лавовыми потоками, большинство которых изливается из зон многочисленных трещин (рифтовых зон); эти зоны протягиваются по склонам вулканов Килауэа и Мауна-Лоа и имеют ширину 3—5 км. Некоторые лавовые потоки доходят до самого океана, другие (меньшего объема) оказываются короче. Опасность затопления лавой, таким образом, больше там, где близка рифтовая зона; наибольшая опасность грозит самой этой зоне. Ущерб, причиняемый выпадением шлака и пепла или выделением газа, будет мал по сравнению с ущербом, связанным с лавовыми потоками, но его, несомненно, надо учитывать вблизи жерл, а значит, вдоль рифтовых зон.

То, что на склонах действующих вулканов существует опасность материального ущерба, очевидно. Проблема, однако, состоит в том, чтобы оценить серьезность этого риска: вероятность полного опустошения конкретного района или серьезных разрушений в нем в течение данного промежутка времени. Каждое отдельное извержение серьезно затронет, вероятно, только небольшую часть общей площади. Достоверные сведения об извержениях на Гавайях охватывают меньше двух столетий, так что этих данных недостаточно для убедительных статистических выводов, но тем не менее они позволяют представить себе величину риска. В качестве примера можно взять угол острова Гавайи восточнее меридиана 155° з. д. Площадь этой части острова составляет приблизительно 325 км<sup>2</sup>; ее пересекает восточная рифтовая зона вулкана Килауэа; в пределах этой зоны лава покрыла начиная примерно с 1750 г. около 52 км<sup>2</sup>, т. е. 16% общей площади. Исходя из этого, вероятность затопления лавой каждого отдельного участка земли в течение одного года составляет менее чем 0,001. Эта вероятность для площадей, расположенных вдоль рифтовой зоны или рядом с ней, очевидно, превышает вероятность для всей территории не менее чем вдвое. Для 25-летнего периода вероятность того, что данный дом будет уничтожен лавой, примерно 1:40.

В пределах указанной выше площади верхние части больших конусов практически безопасны в отношении лав, так как они будут выше поверхности лавовых потоков любой вероятной толщины. Однако этим участкам грозит выпадение тефры и воздействие вулканического газа.

Лавы вулкана Мауна-Лоа покрыли за исторический период в 5 раз бóльшую площадь, чем лавы Килауэа, но Мауна-Лоа гораздо крупнее, и значительная часть покрытой лавой земли — неосвоенные верхние части склонов горы. Риск для более полезных нижних площадей, большинство которых находится вдали от рифтовых зон, гораздо меньше, чем для вулкана в целом. Сравнительно близка к рифтовой зоне и топографически связана с ней нижняя часть юго-западного склона к югу от  $19^{\circ}22'$  с. ш., поэтому здесь опасность лавовых потоков наибольшая. В пределах области, располагающейся на высотах менее 2000 м, за последние 200 лет лавой покрыто 14% площади, так что вероятность того, что тот или иной дом или небольшой участок земли будет уничтожен в течение 25 лет, составляет примерно 1 : 57, т. е. несколько меньше, чем на восточном склоне Килауэа. На юго-восточном склоне Мауна-Лоа на высотах ниже 2000 м такая вероятность определяется как 1 : 700.

Считать ли такой риск разумным или чрезмерным, должен решать каждый человек в отдельности, исходя из таких критериев, как целесообразность или желательность использования земли, пока она не затоплена лавой, и из сравнения со статистикой ущерба от пожаров в сельской местности за такой же период — такой риск многие люди принимают без колебаний. Следует, однако, помнить, что страхование от разрушений, производимых лавой, очень дорого, так как страховые компании не могут покрывать ущерб, причиненный большой площади (см. раздел 8.7). С другой стороны, если земля оказывается покрыта лавой, она не полностью утрачивает свою ценность. Менее чем через 20 лет поверхность лавового потока уже используется для жилищного строительства и даже пригодна для развития отдельных видов сельского хозяйства. Опасность не представляется чрезмерной даже на восточном склоне Килауэа, но люди, возделывающие землю в таких районах, безусловно, должны понимать, что такая опасность существует, и должны знать ее примерную величину.

## 2.6. Предсказание вулканических извержений

Из сказанного ясно, что спасение жизни и имущества людей от уничтожения при вулканической деятельности в огромной степени зависит от предсказания извержений. Получив соответствующее предупреждение, люди могут уйти из опасного района и забрать значительную часть имущества. Нет необходимости говорить о том, что эффективность таких прогнозов самым тесным образом связана с их точностью. Частые ошибки вскоре приведут к тому, что люди перестанут обращать внимание



на предупреждения об опасности. Здесь уместно вспомнить историю о мальчике, который все время кричал «волк». Кроме того, здесь важно также, насколько подробно указываются время и характер извержения и площадь, которую оно затронет. Чаще всего предсказание имеет вид объявления, что вулкан неспокоен и может начать извергаться или что он начнет извергаться скоро, но так как это «скоро» может обозначать любое время: и ближайшие дни, и месяцы, и даже годы — такое предсказание не может принести пользы, разве что побудит жителей прислушиваться к возможно более точным предсказаниям.

Предсказать тип извержения можно, исходя в основном из знания прошлого поведения вулкана. Предсказание того, какая площадь будет затронута, зависит от ожидаемого типа извержения, от его силы и от изученности топографии вулкана и его окрестностей, так как рельеф в значительной мере определяет путь потоков всех типов. Для предсказания времени извержения используются различные группы данных, рассмотренные ниже.

Когда существует достаточно длительная история вулканической деятельности: произошло уже достаточно много извержений и накопился необходимый объем данных — можно определить вероятную последовательность или периодичность извержений. Так, полтора века документированной истории вулкана Мауна-Лоа (остров Гавайи) показали частое чередование извержений на его вершине и на склонах, причем извержение на склоне обычно возникает не позже чем через 3 года после извержения на вершине. На этом основании можно делать соответствующий прогноз. Однако продолжительность действительного интервала колебалась от 6 до 38 месяцев (не учитывая первые годы, когда записи об извержениях были очень неполными). Иногда после вершинного извержения начиналось другое извержение, которое скорее было тоже вершинным, а не склоновым. Отсюда ясно, что любое предсказание, сделанное на этой основе, несет в себе значительную неопределенность. На Везувии, для которого имеются сведения об извержениях почти за 1900 лет, никакой последовательности или периодичности извержений не установлено.

Температура фумарол, горячих источников и кратерных озер перед извержениями может подниматься. В июне 1965 г. начала расти температура воды в кратерном озере внутреннего конуса вулкана Тааль, к концу июля она поднялась на 11 °С, а 28 сентября началось извержение вулкана. Перед извержением вулкана Асо (в Японии) температура воды в кратерном озере поднимается настолько, что озеро может выкипеть досуха. Температура фумарол перед извержениями поднимается на несколько градусов или на несколько десятков градусов, однако это про-

исходит либо за несколько дней до извержения, либо за несколько месяцев или даже лет. На Асо по меньшей мере в одном случае замечено, что температура за несколько дней до извержения снова может упасть до обычного уровня; в других случаях температура снова становилась нормальной без всякого извержения. На других вулканах, особенно в Индонезии, перед извержениями никакого повышения температуры фумарол не происходит. Таким образом, температура фумарол не является надежным основанием для предсказания извержения, но она может служить предостережением, побуждающим искать другие признаки или подтверждающим другие данные.

Перед некоторыми извержениями химический состав фумарол меняется: содержание  $\text{HCl}$  и  $\text{SO}_2$  обычно возрастает относительно воды. У вулканов Асама и Михара (в Японии) перед отдельными извержениями заметно возрастает количество  $\text{S}$  и  $\text{Cl}$ ; доля  $\text{S}$  и  $\text{Cl}$  возрастает и перед некоторыми извержениями камчатских вулканов, но в иных случаях никаких изменений не наблюдается. Если изменяется состав или объем газов, выделяющихся из открытых жерл при слабых извержениях, то это может быть предвестником резкого усиления деятельности вулкана. Таким образом, изменение характера выделений газа может быть одним из признаков готовящегося извержения, и на это надо обращать больше внимания, чем до сих пор. Последние достижения в газовой хроматографии и в методах передачи данных о химическом составе газа и его температуре по проводам и по радио позволяют осуществлять непрерывное наблюдение за фумаролами.

Иногда перед извержениями вулканов наблюдалось изменение напряженности и (или) направления магнитного поля Земли. Теоретически разогрев вулкана должен уменьшать силу его локального магнитного притяжения и, согласно некоторым недавним исследованиям, это действительно происходит, по крайней мере в отдельных случаях. Так, заметное изменение напряженности магнитного поля наблюдалось в 24 км от кратера Пийпа на Камчатке за 12 часов до извержения (в 1966 г.), а у вулкана Михара за несколько месяцев до извержения наблюдалось ускорение западного дрейфа направления магнитного поля.

Еще один новый метод обнаружения температурных изменений, которые могут указывать на подготовку извержения, — периодическое фотографирование вулканов с самолетов или со спутников в инфракрасном диапазоне спектра. Однако этот метод слишком нов, чтобы дать какие-нибудь положительные результаты.

Опять же теоретически присутствие тела горячей жидкой магмы внутри твердого вулкана должно создавать электрический

потенциал, а изменение температуры или формы магматического тела должно вызывать изменение электрических токов. Заметные быстрые изменения теллурических токов действительно наблюдались за несколько часов до некоторых извержений вулкана Асама; однако до сих пор все еще мало сделано для развития этого перспективного метода.

Перед извержениями некоторых вулканов происходит заметное местное изменение земной поверхности. Исключительный случай произошел в 1943 г., когда в течение 5 месяцев, предшествовавших извержению вулкана Усу (Япония), на поверхности земли к востоку от его подножия образовался купол высотой 50 м. У других вулканов такая деформация имеет гораздо меньшие размеры. В результате накопления магмы в резервуаре, находящемся на глубине всего лишь 3—5 км ниже подошвы кратера вулкана Килауэа, происходит разбухание этой горы. Обычная нивелировка показала, что между 1912 и 1921 гг. вершина горы поднялась на 0,9 м, а затем опустилась на 1,1 м в результате опорожнения магматического очага при извержении 1924 г. Разбухание и оседание этого вулкана обычно измеряются с помощью наклономеров, показывающих изменение угла наклона поверхности горы, когда выпучивается или опускается ее вершина. Разбухание Килауэа показывает, что магматический резервуар наполняется и что извержение возможно; по мере того как напор увеличивается, извержение становится все более и более вероятным. Однако вплоть до настоящего времени такое увеличение объема вулкана можно использовать только как общий признак возможного приближающегося извержения, потому что в прошлом извержения происходили при различной степени разбухания, а иногда заметное увеличение объема сменялось его уменьшением без извержения.

Менее четкие данные указывают на то, что вулкан Мауна-Лоа тоже разбухает перед извержением и оседает во время извержения. Заметное увеличение объема наблюдалось перед извержениями вулкана Манам (у северного побережья Новой Гвинеи) и нескольких других вулканов. Измерения наклона выполнены пока на сравнительно немногих вулканах, но в некоторых случаях оказалось, что перед извержениями никакого разбухания не происходит. Возможно, заметное увеличение объема характерно только для тех вулканов, магматические очаги которых находятся всего лишь в нескольких километрах от поверхности. Другие вулканы, такие, как Этна, очаги которых располагаются на глубине в несколько десятков километров, перед извержениями не увеличивают, вероятно, свой объем.

Извержениям обычно предшествуют местные землетрясения (см. раздел 1.3). Они могут быть результатом раскрытия трещин, по которым магма поднимается к поверхности, или след-

ствием движения блоков внутри или вокруг вулкана при его «вспухании», или же они возникают от каких-то других причин. Некоторые из этих землетрясений достаточно сильны, ощущаются на большой площади и даже наносят серьезный ущерб; другие же настолько слабы, что их можно отметить только чувствительными сейсмографами; перед некоторыми извержениями, по-видимому, вообще не происходит землетрясений. Например, даже чувствительные сейсмографы не записали никаких местных толчков перед извержением вулкана Михара в 1950 г., хотя это было сильнейшее в его истории извержение.

Некоторые рои землетрясений, служащие как бы увертюрой к извержению, продолжаются менее часа, другие же растягиваются на многие годы и состоят из многих тысяч отдельных толчков. Землетрясения, предшествовавшие извержению Везувия в 79 г. н. э., продолжались 16 лет. Они начались мощным ударом, который причинил большой ущерб в окрестностях вулкана, но оказался бессилен против апломба императора Нерона, как раз в это время дебютировавшего в качестве певца на одной из сцен Неаполя. Несмотря на землетрясение, он довел до конца свой номер. В некоторых случаях (как это обычно бывает на Гавайских островах) землетрясения почти или полностью прекращаются, когда начинается извержение, но в других случаях толчки продолжают и во время извержения, и даже после него. Иногда между кульминацией роя землетрясений и началом извержения бывает относительно «тихая» пауза, продолжающаяся несколько дней или даже недель. Хотя на Гавайских островах во время большинства извержений бывает сравнительно мало подземных толчков, к концу извержения они обычно начинаются снова и продолжают потом еще некоторое время, пока вулкан оседает благодаря удалению из него магмы. Имеют ли землетрясения, возникающие близ других вулканов после их извержений, такое же происхождение — неизвестно. С другой стороны, усиление сейсмичности во время извержения в некоторых случаях предшествует раскрытию нового жерла или группы жерл, как это было при извержении Килауэа в 1955 г.

*Вулканическое дрожание* — это ритмичные колебания грунта, которые, как было показано, сопровождают движение магмы. Они часто происходят прямо перед извержением и во время него, но могут возникать и без извержения.

Возможно также, что есть какая-то причинная связь между тектоническими землетрясениями, возникающими в результате региональных блоковых движений земной коры, и некоторыми вулканическими извержениями. Отдельные исследователи сообщают, что многим извержениям, особенно в орогенном поясе вдоль западного края Тихого океана, предшествуют сильные

глубокие тектонические землетрясения. Другие специалисты отрицают любую связь такого рода.

В районе вулкана Асама Т. Минаками смог выделить три класса землетрясений: землетрясения типа А, возникающие на глубинах от 1 до 10 км, типа В с глубинами менее 1 км и землетрясения, вызванные взрывами в самом кратере или непосредственно под ним. Используя данные о частоте землетрясений типа В, Минаками вывел эмпирическую формулу, с помощью которой он весьма успешно предсказывал, с точностью до 5 дней, отдельные извержения Асама. П. И. Токарев установил, что эксплозивным извержениям вулкана Безымянного предшествуют землетрясения типа В, которые начинаются за 30—50 дней до извержения. Во время извержения количество таких землетрясений увеличивается, но их общая энергия уменьшается. Основываясь на величине скорости накопления упругой деформации, Токарев вывел формулу, которую использовал для предсказания эксплозивных извержений приблизительно за неделю до их возникновения. Между частотой землетрясений, предваряющих извержение, или величиной выделяемой ими энергии и мощностью этого извержения никакой зависимости не обнаружено.

Несмотря на некоторые незначительные успехи местного значения, разнообразие характера и последовательности землетрясений, связанных с извержениями, не позволяют в большинстве случаев использовать их как единственное средство для предсказания извержений. Сведения о землетрясениях оказываются весьма полезными в сочетании с другими признаками, особенно с данными об изменении наклона поверхности. По этому изменению, когда оно отмечается, можно отличить многочисленные землетрясения, сопровождающие разбухание вулкана и увеличение вероятности извержения, от столь же многочисленных землетрясений, связанных с оседанием вулкана и уменьшением этой вероятности. Так, в 1950 г. в течение нескольких месяцев продолжалось разбухание вулкана Килауэа, сопровождавшееся рядом из нескольких сотен землетрясений, но затем измерения наклона показали, что вершина вулкана оседает и, следовательно, возможность извержения уменьшается.

Одно из наиболее успешных предсказаний извержения было основано на сопоставлении нескольких признаков. 8 февраля 1942 г. произошло сильное землетрясение, очаг которого находился на глубине 40—50 км под северо-восточным склоном Мауна-Лоа. За ним последовал (21 и 22 февраля) ряд подземных толчков с мелкими очагами под той частью северо-восточной рифтовой зоны вулкана, которая проходит между высотами 2700 и 3050 м, а затем очаги землетрясений постепенно перемещались вдоль рифтовой зоны в сторону вершины и через нее

на противоположный склон; 21 марта очаги землетрясений находились под юго-западным склоном на глубине около 8 км. 28 марта еще одно землетрясение возникло на северо-восточном рифте, и в это же время измерения наклона показали, что вулкан наполняется магмой. Вершинное извержение Мауна-Лоа закончилось в августе 1940 г. Используя данные о землетрясениях, о наклоне, а также зная об особенностях поведения вулкана в прошлом, Р. Финч в конце марта предсказал, что в течение ближайших месяцев в северо-восточной рифтовой зоне произойдет извержение, вероятно, на высоте между 2700 и 3050 м. Извержение началось 28 апреля на высоте 2800 м.

Этот замечательный прогноз был помещен в отчетах Службы национальных парков, но, по соображениям безопасности военного времени, он не был опубликован. Опасались, что если враг узнает о приближающемся извержении, он сможет использовать вулкан как навигационный бакен. Иронизируя над этой секретностью, токийское радио в своей обычной передаче наутро после того, как началось извержение, поздравило жителей острова Гавайи «с их великолепным вулканическим извержением».

Животные, находящиеся на склонах вулкана или около него, перед извержением бывают очень встревожены; что вызывает их беспокойство пока нам неизвестно. Например, за 3 или 4 дня до начала извержения на склоне Килауэа в 1955 г. собаки, находившиеся в районе будущих жерл, были очень обеспокоены, возбужденно бегали, рыли в земле ямы и нетерпеливо обнюхивали их, как будто выслеживали каких-то зверьков, спрятавшихся в норах. Мы не установили в этих ямках никакого запаха газа, но сейсмографы записали большое число слабых землетрясений, большинство которых люди заметить не могли, но собаки, возможно, чувствовали. Другие данные указывают на то, что некоторые животные могут чувствовать подземные толчки, не заметные для людей. При том же извержении позднее открылись новые жерла в 6,5 км к юго-западу, и за 2—3 дня до этого собаки там также были встревожены и не находили себе места.

У подножия вулкана Ареналь землетрясения стали ощущаться только за 2 дня или меньше до начала извержения в 1968 г., но скот начал спускаться со склонов горы уже за две недели до этого. Там не было сейсмографов, и поэтому неизвестно, происходили ли в недрах вулкана слабые землетрясения, не заметные для людей.

Для развития методов предсказания вулканической деятельности требуется проделать еще очень большую работу. То, что уже установлено, имеет важное значение для общих знаний о вулканах, но необходимо детальное изучение каждого вулкана и его длительной истории, так как поведение вулканов в высшей степени индивидуально.

То, какие результаты могут быть достигнуты с помощью совершенных приборов учеными, знающими особенности поведения вулкана, можно хорошо показать на примере событий на вулкане Килауэа в конце 1973 г. Одной из причин, заставляющих особенно внимательно следить за поведением гавайских вулканов, является очень большое количество туристов, приезжающих посмотреть на извержения. 10 ноября более 500 человек любовались деятельностью вулкана Мауна-Улу — одного из жерл на восточном склоне Килауэа. В 17 часов 30 минут сотрудники Гавайской вулканологической обсерватории Геологической службы США отметили в записях сейсмографов сильное вулканическое дрожание, и примерно в это же время лава по подземным каналам начала быстро вытекать из небольшого лавового озера у Мауна-Улу. В 17 часов 45 минут наклонометры показали, что вершина Килауэа начала очень быстро оседать. Это очень напоминало явления, предшествовавшие недавним внезапным извержениям на восточном склоне вулкана, и руководители обсерватории решили, что предстоит новая такая вспышка. Они предупредили об этом администрацию национального парка «Гавайские вулканы», и работники парка быстро приступили к эвакуации зрителей из района Мауна-Улу, так что когда в 21 час 47 минут началось мощное извержение, отрезавшее все основные и запасные дороги, все туристы были уже выведены из опасной зоны.

Суммируя общие рекомендации по наблюдению за вулканами с целью обнаружения признаков готовящегося извержения, лучше всего привести выдержки из доклада, составленного недавно по поручению ООН:

«Сеть сейсмических станций для записи связанных с вулканической деятельностью землетрясений, которая позволяет распознать усиление сейсмической активности, предшествующее извержениям, существует в настоящее время только около нескольких вулканов. Еще реже проводятся точные геодезические или наклономерные измерения, которые могли бы помочь обнаружить развивающееся перед извержением разбухание вулкана. Ни в одном из вулканических районов не установлено необходимого количества приборов и, следовательно, нигде не существует системы предупреждения, способной обслуживать весь такой район в целом.

Вероятно, нет смысла надеяться на то, что удастся установить постоянные сейсмические и наклономерные записывающие приборы на каждом потенциально опасном вулкане. Однако во всех населенных вулканических районах следует установить сеть сейсмографов, способных отметить необычную сейсмическую активность в любой части района. Портативные сейсмографы и наклономерные инструменты, обслуживаемые квалифицирован-

ными операторами, должны быть подготовлены для установки на любом вулкане в любой части района, где, по данным региональной сети, происходит что-либо необычное. Опытные вулканологи должны быть готовы выехать в поле, чтобы интерпретировать вулканические явления как перед извержениями, так и во время них и давать советы, касающиеся эвакуации и других защитных мер. Во время вулканического затишья вулканологи, как и другие геологи, должны проводить полное и детальное изучение геологии и истории извержений всех вулканов района, чтобы помочь предсказывать, какого вида извержение можно ожидать на каждом из них.

Должны быть подготовлены детальные топографические карты, по которым можно было бы установить вероятный путь различного рода потоков. Необходимо изучить направление ветров как на больших, так и на малых высотах во все времена года, чтобы можно было предсказать распределение выпадающего пепла и движение ядовитых газов. Следует подготовить карты вероятного распределения и толщины слоев выпадающего пепла для извержений различной силы и для всех времен года. На картах должны быть выделены области различной степени риска, связанного с извержениями разной силы и различных типов. Во всех населенных пунктах необходимо разработать систему срочных мероприятий при стихийных бедствиях, в том числе процедуру эвакуации населения, установить разные пути эвакуации, безопасные места при разных типах извержений или (в тех местах, где это необходимо) при извержениях различных вулканов.

На всех фумаролах и горячих источниках необходимо проводить периодические температурные измерения и химические анализы, чтобы выяснить их нормальное состояние и нормальные сезонные вариации и тем самым получить возможность обнаруживать отклонения от нормы, которые могут указывать на готовящееся извержение. Должны регулярно проводиться аэромагнитные и инфракрасные фотосъемки, с тем чтобы попытаться обнаружить сколько-либо значительные изменения магнитного поля или температуры земной поверхности».

Очевидно, затраты на все эти мероприятия будут велики, но без них стоимость потерянных человеческих жизней и имущества будет, вероятно, еще больше. Вулканические катастрофы гораздо большего масштаба, чем разрушение Сен-Пьера, — это реальная геологическая опасность.

## Список литературы

1. *Anderson T., Flett J. S., Report on the eruptions of the Soufrière in St. Vincent, and on a visit to Montagne Pelée in Martinique, Pt I. Royal Soc London Phil. Trans, ser A, 200, 353—553, 1903*



2. *Bullard F. M.*, Volcanoes: in history, in theory, in eruption, 441, Austin, Univ. Texas Press, 1962.
3. *Crandell D. R.*, *Mullineaux D. R.*, Volcanic hazards at Mount Rainier, Washington, U. S. Geological Survey, Bull. **1238**, 26, 1967.
4. *Crandell D. R.*, *Waldron H. H.*, Volcanic hazards in the Cascade Range, Conference on Geologic Hazards and Public Problems, May 27—28, 1969, Proceedings, pp. 5—18, Office of Emergency Preparedness, U. S. Govt. Printing Office, 1969.
5. *Finch R. H.*, *Macdonald G. A.*, Hawaiian volcanoes during 1950, U. S. Geological Survey, Bull. **996-B**, 27—89, 1953.
6. *Gorshkov G. S.*, Gigantic eruption of the volcano Bezymianny, Bull. volcanologique, ser. 2, **20**, 77—109, 1959.
7. *Healy J.*, Tangiwait railway disaster, Report of Board of Inquiry, pp. 6—8, New Zealand, Government Printer, 1954.
8. *Hovey E. O.*, Martinique and St Vincent, a preliminary report upon the eruptions of 1902, American Museum Nat. Hist Bull., **16**, 333—372, 1902.
9. *Koto B.*, The great eruption of Sakurajima in 1914, Tokyo Imperial Univ., Jour. College Sci., 38, art. 3, 237, 1916.
10. *Lacroix A.*, La Montagne Pelée et ses eruptions, 662 p., Paris, Masson et Cie, 1904.
11. *Lydon P. A.*, Geology and lahars of the Tuscan Formation, northern California, Geological Soc. America, Mem., 116, 441—475, 1968.
12. *Macdonald G. A.*, Barriers to protect Hilo from lava flows, Pacific Science, **12**, 258—277, 1958.
13. *Macdonald G. A.*, Volcanoes, Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Inc., 1972. (Имеется русский перевод: Г. Макдоналд, Вулканы, М., «Мир», 1975.)
14. *Macdonald G. A.*, *Abbott A. T.*, Volcanoes in the Sea, The Geology of Hawaii, 441 p., Honolulu, Univ. Hawaii Press, 1970.
15. *Mason A. C.*, *Foster H. L.*, Diversion of lava flows at O Shima, Japan, American Jour. Science, **251**, 249—258, 1953.
16. *McBirney A. R.*, The Nicaraguan volcano Masaya and its caldera, American Geophysical Union Trans., **37**, 83—96, 1956.
17. *Moore J. G.*, Base surge in recent volcanic eruptions, Bull. volcanologique, ser. 2, **30**, 337—363, 1967.
18. *Neumann van Padang M.*, De uitbarsting van den Merapi (Midden Java) in de jaren 1930—1931, Ned. Indies Dienst Mijnbouw. Vulkan. Seism. Mededel., no. **12**, 135 p., 1933.
19. *Neumann van Padang M.*, Catalog of the active volcanoes of the world including solfatara fields, Part 1, Indonesia, 271 p., International Volcanological Assn., Naples, 1951.
20. *Neumann van Padang M.*, Measures taken by the authorities of the volcanological survey to safeguard the population from the consequences of volcanic outbursts, Bull. volcanologique, ser. 2, **23**, 181—192, 1960.
21. *Perret F. A.*, The Vesuvius eruption of 1906, Carnegie Institution of Washington, **339**, 151 p., 1924.
22. *Perret F. A.*, The eruption of Mt. Pelée 1929—1932, Carnegie Institution of Washington, **458**, 125 pp., 1935.
23. *Petroeshevsky W. A.*, A contribution to the knowledge of the Gunung Tambora (Sumbawa), Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap, 66, 688—703, 1949.
24. *Rose W. I.*, *Stoiber R. E.*, The 1966 eruption of Izalco Volcano, El Salvador, Jour. Geophysical Research, **74**, 3119—3130, 1969.
25. *Searle J. E.*, Volcanic risk in the Auckland metropolitan district, New Zealand Jour. Geology and Geophysics, **7**, 94—100, 1964.
26. *Stehn C.*, The geology and volcanism of the Krakatau Group, Fourth Pacific Science Congress Guidebook, Batavia, pp. 1—55, 1929.

27. *Thorarinsson S.*, Hekla, a notorious volcano, Almenna Bókafélagid, Reykjavik, Iceland, 62 p., 1970a.
28. *Thorarinsson S.*, The Lakagigar eruption of 1783, *Bull. volcanologique*, ser. 2, **33**, 910—927, 1970b.
29. United Nations, The role of science and technology in reducing the impact of natural disasters on mankind, Report of the Advisory Committee on the Application of Science and Technology to Development, 36 p., 1972.
30. *Vitaliano D. B.*, *Vitaliano C. J.*, Plinian eruptions, earthquakes, and Santorin, A review: First International Science Congress on the Volcano of Thera, *Acta*, 88—108, 1971.
31. *Waldron H. H.*, Debris flow and erosion control problems caused by the ash eruptions of Irazú Volcano, Costa Rica, U. S. Geological Survey, *Bull.*, **1241-I**, 37 p., 1967.
32. *Wilcox R. E.*, The problem of damage by fumes of Santiago Volcano, Nicaragua, U. S. Geological Survey, Report submitted to the Government of Nicaragua, mimeographed, 38 p., 1952.
33. *Wilcox R. E.*, Some effects of recent volcanic ash falls with especial reference to Alaska, U. S. Geological Survey, *Bull.*, **1028-N**, pp. 409—476, 1959.
34. *Williams H.*, Calderas and their origin, Univ. California Pub., *Bull. Dept. Geological Sciences*, **25**, 239—346, 1941.
35. *Williams H.*, The geology of Crater Lake National Park, Oregon, with a reconnaissance of the Cascade Range southward to Mount Shasta, Carnegie Institution of Washington, Pub. **540**, 162, 1942.
36. *Williams H.*, Volcanoes of the Paricutin region, U. S. Geological Survey, *Bull.* **965-B**, 165—279, 1950.
37. *Williams H.*, The great eruption of Cosegüina, Nicaragua, in 1835, Univ. California Pub. in Geological Science, **29**, 21—46, 1952.
38. *Williams H.*, Crater Lake, The Story of its Origin, 98 p. Berkeley, Univ. California Press, 1954.
39. *Williams H.*, *Goles G.*, Volume of the Mazama ash-fall and the origin of Crater Lake caldera, Oregon, Andesite Conference Guidebook, Oregon Dept. of Geology and Mineral Industry, *Bull.* **62**, 37—41, 1968.
40. *Williams R. S., Jr.*, *Moore J. G.*, Iceland chills a lava flow, *Geotimes*, **18**, no. 8, 14—17, 1973.
41. *Zen M. T.*, *Hadikusumo D.*, The future danger of Mt Kelut, eastern Java, Indonesia, *Bull. volcanologique*, ser. 2, **28**, 275—282, 1965.

# ГЛАВА 3

## ОПАСНОСТЬ ЦУНАМИ

### 3.1. Причины цунами

**Исторические случаи.** История содержит много описаний крупных землетрясений, возникавших вблизи морских берегов и сопровождавшихся разрушительными морскими волнами, которые опустошали целые города. Так произошло при знаменитом Лиссабонском землетрясении 1 ноября 1755 г. Несколько высоких океанских волн обрушилось на западное побережье Португалии, Испании и Марокко; в результате число погибших от землетрясения выросло в Лиссабоне (его население составляло 235 тыс. человек) примерно до 60 тысяч. Высота волн в Лиссабоне была, по рассказам, на 5 м выше максимального уровня прилива. Волны пронеслись по всему Атлантическому океану, их наблюдали в Голландии и Англии, на Азорских островах и в Вест-Индии. В гавани Кинсейла (Ирландия) спустя четыре с половиной часа после землетрясения уровень воды быстро поднялся, в результате чего разорвались якорные цепи стоявших там двух кораблей.

Этот знаменитый случай вспомнили, когда 28 февраля 1969 г. в восточной Атлантике произошло землетрясение с магнитудой 8. Оно имело, возможно, такое же происхождение, как и в 1755 г. Очаг располагался в районе подводного хребта на  $36^{\circ}00'$  с. ш. и  $10^{\circ}06'$  з. д., вблизи берегов Португалии. О человеческих жертвах и материальном ущербе сообщалось из Испании, Португа-

лии и Марокко, и опять возникло цунами, но в этом случае оно достигло высоты только 1,2 м (у Касабланки).

Сейсмогенные морские волны, для обозначения которых используется японское слово *цунами*, в популярной литературе часто называют также «приливными волнами», но это неправильно, так как они в отличие от обычных океанических приливов не связаны с приливным действием Луны и Солнца, а представляют собой длиннопериодные колебания воды, возникающие при внезапном подводном смещении; чаще всего цунами значительной величины возникают в результате резкого, сопровождающегося землетрясением смещения по подводному разрыву. Например, подвижка по подводному разрыву была причиной цунами, возникших при Чилийском землетрясении 1960 г. (см. раздел 3.3) и при Аляскинском землетрясении 1964 г. Список крупных цунами приведен в табл. 3.1. Начиная с 1596 г. Япония испытала не менее 10 катастрофических цунами. В 1707 г. во время землетрясения возникли громадные волны во Внутреннем море; в заливе Осака пошло ко дну более 1000 крупных и мелких судов.

Еще одной причиной океанских цунами являются подводные оползни, такие, например, как в бухте Сугами (Япония) в 1933 г. и у Валдиза (Аляска) в 1964 г., и лавины, срывающиеся в море, как, например, в бухте Литуя (Аляска) в 1958 г. Винови́ником может быть и вулканическое извержение. При обрушении кальдеры Кракатау в 1883 г. высота морских волн, накатившихся на берега Явы и Суматры и вызвавших гибель около 30 тыс. человек (см. фиг. 2.18), была, по рассказам, более 30 м. Волны были настолько велики, что зыбь дошла даже до Ла-Манша! Подводные ядерные взрывы также вызывают цунами; так было при взрывах на Бикини и в других местах (однако при американских ядерных подземных испытаниях на Алеутских островах — на Амчитке в 1956, 1969 и 1971 гг. — цунами не возникли).

В открытом океане волны цунами по своей длине во много раз превосходят все другие морские волны, у которых расстояние между гребнями редко бывает больше 100 м, тогда как такое расстояние для волн цунами иногда превышает 100 км. С другой стороны, высота гребня цунами не достигает 1 м, и эти волны нельзя обнаружить в открытом море с корабля. Скорость волны уменьшается с уменьшением глубины моря. Математически эта скорость определяется выражением  $\sqrt{gd}$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести ( $980 \text{ см/с}^2$ ), а  $d$  — глубина воды. В глубоководных впадинах, например в средней части Тихого океана, где  $d$  достигает 5 км, скорость распространения волн цунами превышает, следовательно, 700 км/ч.

**Таблица 3.1**  
**Крупнейшие цунами мира**

Дата	Район возникновения	Видимая высота головной волны, м	Район, из которого получены сообщения	Примечания
1500 лет до н. э.	При извержении Санторина		Крит	Опустошение берегов Средиземного моря
1 ноября 1755 г.	Восточная Атлантика	5—10	Лиссабон, Португалия	Отмечено на всем океане: от Европы до Восточной Индии
21 декабря 1812 г.	Пролив Санта-Барбара, Калифорния	Несколько метров	Санта-Барбара, Калифорния	Первые сообщения, вероятно, преувеличены
7 ноября 1837 г.	Чили	5	Хило, остров Гавайи	
17 мая 1841 г.	Камчатка	< 5	Хило, остров Гавайи	
2 апреля 1868 г.	Гавайские острова	< 3	Хило, остров Гавайи	
13 августа 1868 г.	Перу, Чили	> 10	Арика, Перу	Наблюдалось в Новой Зеландии. Разрушения на Гавайских островах
10 мая 1877 г.	Перу, Чили	2—6	Япония	Разрушение в Икике, Перу
27 августа 1883 г.	При извержении Кракау		Ява	Утонуло более 30 тыс. человек
15 июня 1896 г.	Хонсю	24	Санрику, Япония	Утонуло около 26 тыс. человек
3 февраля 1923 г.	Камчатка	Около 5	Ваиакеа, остров Гавайи	
2 марта 1933 г.	Хонсю	> 20	Санрику, Япония	Погибло 3000 человек
1 апреля 1946 г.	Алеутские острова	10	Ваинаку, остров Гавайи	См. текст
4 ноября 1952 г.	Камчатка	< 5	Хило, остров Гавайи	
9 марта 1957 г.	Алеутские острова	< 5	Хило, остров Гавайи	Связано с землетрясением с магнитудой 8,3
23 мая 1960 г.	Чили	> 10	Ваиакеа, остров Гавайи	См. текст
28 марта 1964 г.	Аляска	6	Кресент-Сити, Калифорния	Погибло в общей сложности 119 человек, ущерб составил 104 млн. долл.
17 августа 1976 г.	Минданао	> 5	Филиппины	Множество жертв

Когда цунами достигает мелководья у островов или на шельфе, скорость резко уменьшается. Одновременно во много раз возрастает амплитуда волны, доходя иногда до 25 м. Фронт волны искривляется, так как на мелких участках волна движется медленнее, чем на глубоких. Как и в случае световых волн, такая рефракция может повернуть фронт волны и привести к тому, что цунами огибают мысы и выступы берега и попадают в бухты, защищенные от других волн. Конфигурация некоторых прибрежных районов океана такова, что там образуется так называемая *волновая ловушка*, где энергия широкого фронта волны фокусируется на небольшом участке, или, отражаясь от берега, концентрируется на каком-нибудь определенном участке. Пример такой ловушки — район Хило, остров Гавайи (см. фото 3.1).

С приближением цунами уровень моря вдоль побережья может вначале несколько понизиться, при этом из воды выступают рифы и обнажается подводная часть пляжа, на которой остается много рыбы. В районе Хило (в 1923 г.) люди необдуманно побежали собирать эту рыбу и были накрыты первым валом цунами. В других случаях цунами может начаться подъемом

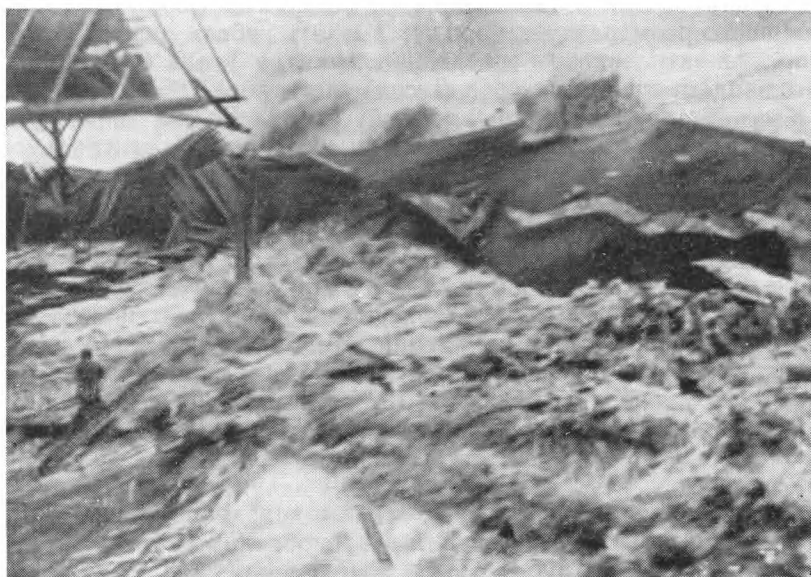


Фото 3.1. Сейсмическая морская волна, обрушившаяся на пирс в порту Хило во время цунами 1946 г.

Обратите внимание на человека, стоящего на пути волны. Больше его никто никогда не видел. Снимок сделан неизвестным матросом с борта корабля «Бригэм Викторин».

воды. Между отдельными сериями волн цунами могут быть промежутки длительностью от нескольких минут до часа и больше. Высота подъема воды и расстояние, на которое она отступает, значительно меняются вдоль побережья от места к месту в зависимости от глубины и от других факторов, и после отступления первой волны люди не должны думать, что опасность уже миновала. При цунами, обрушившемся на остров Гавайи в 1946 г., наибольший ущерб причинила восьмая по счету волна.

Главная атака цунами иногда оказывается направленной на какой-нибудь залив или на устье реки, где образуется так называемый *бор* (водяная стена при высоком приливе), и этот сокрушительный вал может причинить большой ущерб, как это было в 1957 г. в Хило. Надо сказать, что боры могут возникать в закрытых акваториях, таких, как устья рек, и в результате случайного усиления обычной океанской приливной волны. Примером служит знаменитый бор в заливе Фанди [юго-восточное побережье Канады; высота приливной волны там часто бывает более 20 м. — *Перев.*].

Хотя проблема опасности, связанной с цунами, относится преимущественно к Тихоокеанскому побережью, известно, что цунами иногда причиняют ущерб и в других океанах (особенно в Атлантическом и Индийском) и во многих морях. Даже небольшого размера цунами могут вызвать гибель людей. Например, при эксплозивном извержении вулкана Тааль (Филиппины, юго-западная часть острова Лусон) в сентябре 1965 г. возникла небольшая волна цунами на озере Тааль. Волны опрокинули лодки, в которых спасались жители, бежавшие с центрального острова; люди утонули, и эти новые жертвы прибавились к погибшим от этих же волн на побережье (у берегов озера высота волн превысила 4,7 м) — всего погибло не менее 50 человек.

В СССР цунами обычно бывают на тихоокеанском побережье Камчатки и Курильских островов, однако иногда они отмечаются и в Черном и Каспийском морях, где часто происходят землетрясения. При двух сильных землетрясениях в Крыму 26 июня и 11 сентября 1927 г. возникли небольшие цунами с максимальной, записанной мареографами высотой волны около 0,5 м.

**Крупные волны и сейши на озерах и водохранилищах.** Волны большой высоты могут возникать при обвалах скальных пород и оползаниях почвенного слоя в водохранилища или озера. Такие лавины могут быть спонтанными — например, оползень, который выплеснул воду из водохранилища через плотину Вайонт (см. гл. 4) в Италии и вызвал гибель многих людей в нижней части долины, — а могут быть результатом значительных зем-

летрясений: естественных или искусственных (например, крупных взрывов).

Наиболее известный пример возмущения воды, вызванного оползнем, это волна в заливе Литуйа на Аляске, образовавшаяся после землетрясения (с магнитудой 7) 9 июля 1958 г. На верхнем снимке (фото 3.2), сделанном в 1954 г., видно, что деревья покрывают склоны до самой воды. Землетрясение послужило толчком для лавины, сорвавшейся в северо-восточный угол залива и вызвавшей волны, которые накатились на противоположные склоны и достигли высоты 500 м. Амплитуда волн была 60 м, а их фронт пересекал весь залив. Волна перебросила лодки через росшие на полуострове деревья высотой 25 м, а скорость воды была так велика, что, как это видно на нижнем снимке (фото 3.2), вся растительность на береговой полосе была уничтожена.

Геологическая опасность такого рода проявляется редко, но ее нельзя упускать из виду, заботясь о безопасности возрастающего населения в районах проектируемых национальных парков и охраняемых водных ландшафтов (марин) вокруг озер, заливов и водохранилищ.

На поверхности закрытых водоемов, таких, как озера и водохранилища, образуются длиннопериодные стоячие волны, которые называются *сейшами*. [Первоначальное значение французского слова *seiche*, или *seche*, — полоса морского или озерного дна, обнажающаяся, «осушающаяся» во время отлива или при сильном ветре с берега. — *Перев.*] Сейши — это колебания поверхности воды, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях и пересекающие водоем через правильные промежутки времени, длительность которых определяется глубиной и размерами водоема. Термин был введен в употребление Ф. А. Форелем, изучавшим в 1890-х годах стоячие волны на Женевском озере, где преобладающий период колебаний воды составляет 72 минуты. В водоемах более сложной формы могут возникать стоячие волны с различным периодом: например, в заливе Сан-Франциско возникает несколько различных стоячих волн, из которых главные сейши имеют период 39 минут.

Сейши обычно образуются в результате необычно высоких приливов, сильных ветров и течений, но при определенных обстоятельствах возникают и в результате сейсмических колебаний грунта. Землетрясения раскачивают воду и производят сейши, которые могут оказываться разрушительными для береговых сооружений, а проникнув далеко на сушу, могут повредить водохранилищ и резервуары сточных вод.

Известно, что при крупном землетрясении сейши в озерах, гаванях и реках могут вызываться медленными ритмичными движениями земной коры на большом расстоянии от очага.



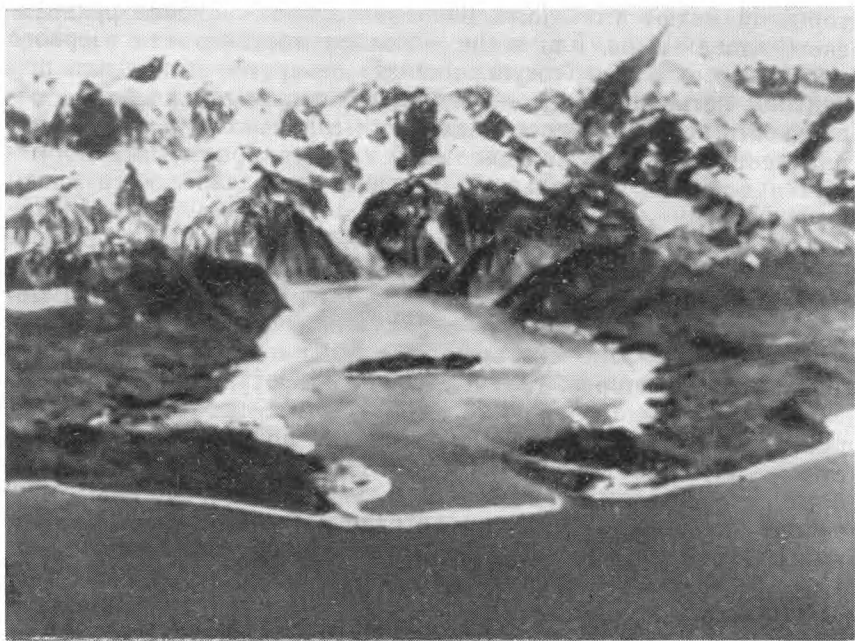
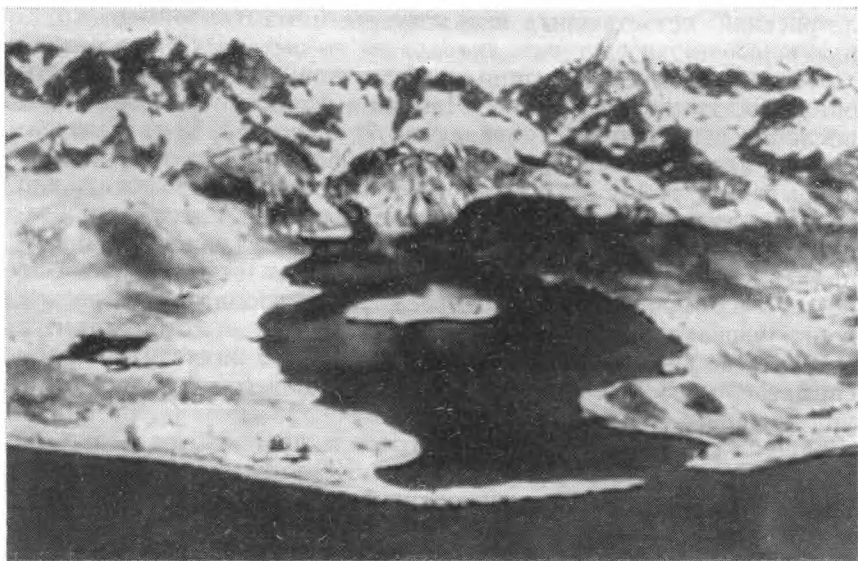


Фото 3.2. Аэрофотоснимки залива Литуя, Аляска, сделанные в сентябре 1954 г. (верхний снимок) и в августе 1958 г. (нижний снимок): до и после возникновения гигантской морской волны, вызванной лавиной.

Светлые пространства вдоль побережья на нижнем снимке — места, где лес был уничтожен волной.

Лиссабонское землетрясение 1755 г. вызвало заметное волнение в каналах и озерах на всем пространстве вплоть до Голландии, Швейцарии, Шотландии и Швеции включительно, а в заливе Ферт-оф-Форт (Шотландия) вскоре после землетрясения вода очень быстро поднялась не менее чем на 20 см, и лодки раскачивались на своих якорных канатах минуты три-четыре. Аляскинское землетрясение всколыхнуло воду в колодцах вплоть до побережья Мексиканского залива (4 тыс. км от эпицентра). У берегов Луизианы и Техаса сейши начались примерно через 30—40 минут после возникновения землетрясения, т. е. тогда, когда через этот район проходили поверхностные волны (волны Рэлея и Лява). На большой площади был отмечен незначительный ущерб: в частности, на реке Миссисипи разошлись крепления баржевых причалов.

**Цунами, вызываемые землетрясениями.** Вследствие того что вокруг Тихого океана происходят сильные землетрясения, в водах этого океана особенно часто возникают сейсмические морские волны. Они вызываются, вероятно, подвижками по падению разрывов (фиг. 1.7) независимо от того, происходят ли такие подвижки в зонах субдукции у островных дуг (например, у Алеутских островов) или на срединно-океанических хребтах (например, в Атлантическом океане между Азорскими островами и Гибралтаром). Так, обширные исследования японских ученых показали, что вокруг японского побережья фокальные механизмы землетрясений, производящих цунами (так называемых *цунамигенных* землетрясений), обычно представляют собой смещение по падению разрывов (сбросов или взбросов), и наоборот — сдвиговые смещения почти никогда не сопровождаются цунами. В согласии с этим выводом, при сильнейшем Сан-Францисском землетрясении 1906 г. цунами не было, хотя горизонтальное смещение по разлому Сан-Андреас, проходящему частично под морем, достигало 6 м.

Когда океанское дно смещается вертикально, это действует на воду, как гребок весла. Все глубоководные желоба у берегов Южной Америки, Японии и вдоль Алеутских островов обращены к центру Тихого океана, что и определяет направленный характер многих цунами, возникающих в этих сейсмичных областях. Даже при беглом взгляде на глобус видно, что Гавайские острова располагаются почти точно на больших кругах, тангенциально к направлению на эти генерирующие землетрясения области (фиг. 3.1), в чем и состоит главная причина подверженности Гавайских островов опасности цунами.

Точно так же, как землетрясения, цунами классифицируют по магнитуде; магнитудная шкала для цунами предложена японцами. Магнитуда цунами определяется, по аналогии с

магнитудой землетрясений, как логарифм амплитуды колебаний уровня воды, измеренных стандартным мареографом у береговой линии на расстоянии от 10 до 3 км от источника цунами. Одна из используемых формул  $m = 3,32 \lg h$ , где  $h$  — максимальная высота волны в метрах. Такие формулы дают весьма изменчивые и грубые оценки, так как на высоту морских волн сильно влияют особенности береговой линии. Цунами с нулевой магнитудой почти неопасны, а при магнитуде 3 головная волна цунами имеет высоту 12 м.

Найдены эмпирические зависимости между магнитудой цунами и магнитудой вызывающих их землетрясений. Одна из таких зависимостей для мелкофокусных землетрясений представлена в табл. 3.2. Если очаг находится на большой глубине,

**Таблица 3.2**

**Магнитуда и высота головной волны цунами**

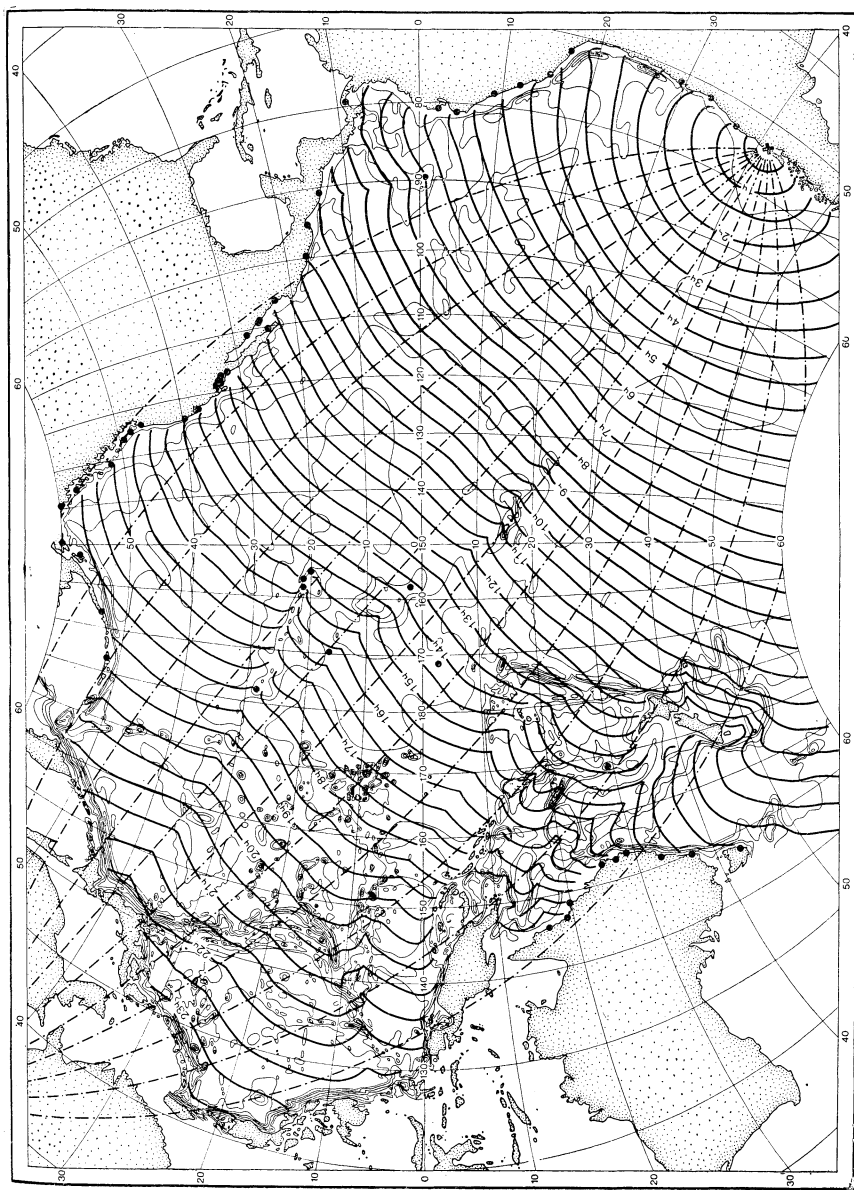
Магнитуда землетрясения	Магнитуда цунами	Максимальная высота головной волны цунами, м
6	Незначительная	
6,5	—1	0,5—0,75
7	0	1—1,5
7,5	1	2—3
8	2	4—6
8,25	3	8—12

величина цунами бывает меньше. Эмпирический предел магнитуды землетрясения, вызывающего *катастрофическое* цунами (исключая особые случаи резко локализованных разрушений), определяется по формуле  $M = 7,7 + 0,008 H$ , где  $H$  — глубина очага землетрясения в километрах.

Энергия цунами обычно составляет от 1 до 10% энергии вызывающих их землетрясений; энергия самых крупных цунами достигает примерно  $10^{23}$  эрг.

## 3.2. Риск, связанный с цунами

**Высота головной волны и причиняемый ущерб.** Используя исторические данные о частоте возникновения цунами и учитывая высоту изучаемого района, можно построить статистические кривые повторяемости цунами разной величины. Например, мареографическая станция в Пресидио [Пресидио — парковый район в северной части Сан-Франциско, прилегающий к проливу Золотые Ворота. — *Перев.*], у входа в залив Сан-Фран-



Фиг. 3.1. Карта Тихого океана с указанием времени распространения цунами, вызванного Чилийским землетрясением 1960 г.

Искривление фронта волн представляет собой эффект рефракции, связанной с изменениями глубины океана. Обратите внимание на конвергенцию энергии цунами в районе Японии.

циско, записывает цунами начиная с 1868 г. Всего записано 19 цунами высотой от нескольких сантиметров до 1 м и более (цунами, вызванное Аляскинским землетрясением страстной пятницы в 1964 г.).

На *кривой риска* откладывается максимальная высота волн цунами и среднегодовое количество цунами, имеющих высоту (магнитуду) больше определенной величины. Такая кривая для входа в залив Сан-Франциско показывает, что цунами высотой 1 м или больше можно ожидать там раз в 25 лет, тогда как на восточном побережье острова Хонсю (Япония) следует ожидать появления цунами высотой около 5 м или больше каждые 5 лет, а в Хило такая же волна появляется раз в 25 лет. Если имеющиеся данные изложить непосредственно в понятиях вероятностного риска, то можно сказать, что для Хило имеется 60%-ная вероятность того, что в какой-то момент на протяжении 25 лет головная волна цунами превысит 5 м.

Когда волна цунами входит в какой-нибудь замкнутый водоем, уровень воды резко повышается. В случае залива, отгороженного от моря, явления резонанса и интерференции могут усложнить характер флуктуаций уровня воды, когда приходят разные по счету волны цунами. Многочисленные данные, собранные в Японии и на Гавайских островах, указывают на то, что наиболее высокая головная волна накатывается обычно на те части побережья, которые обращены к району возникновения цунами.

В районе залива Сан-Франциско наибольшие амплитуды волн отмечены около пролива Золотые Ворота. Важнейшее значение имеет серия из пяти мареограмм цунами 4 ноября 1952 г., записанных в разных пунктах этого района. Амплитуда волн на океанском побережье, равная 1,2 м, уменьшается в проливе Золотые Ворота (станция Пресидио) до 0,6 м. В проливе Каркиниз-Стрейтс [в северной части залива Сан-Франциско, между заливом Сан-Пабло и устьем реки Сакраменто. — *Перев.*] у города Бенишия волны имеют уже небольшую амплитуду. Если двигаться по заливу на юг, то у мыса Хантерс и в районе Аламеда амплитуда меньше 30 см, а на мелководье у пункта Дамбартон-Бридж она уменьшается почти до нуля. Такое затухание волн резко уменьшает вероятность того, что вода поднимется выше дамб и ограждений, построенных вокруг освоенных площадей на южных берегах залива Сан-Франциско (см. раздел 1.5, параграф об исследованиях в районе Редвуд-Шорс). Эти данные показывают, что наибольшая высота волн цунами здесь не может быть больше чем на 0,5 м выше максимального уровня прилива.

Цунами, сопровождавшее Аляскинское землетрясение 1964 г., произвело на побережье Калифорнии самые большие разруше-

ния за последние 100 лет (фиг. 8.1); общий ущерб составил почти 10 млн. долл., причем потери города Кресент-Сити в северо-западной части этой области (фиг. 1.3) составили в этой сумме 7 млн. долл.

В то время население Кресент-Сити насчитывало приблизительно 2500 человек. Несколько волн обрушилось на гавань; разрушения в низкой части территории порта и пляжа, обращенной на юг, были причинены третьей и четвертой волнами. Третья волна затопила этот район на расстоянии более 500 м от береговой линии, до высоты 6 м над средним уровнем отлива. Было затоплено 30 домов города, а одноэтажные щитовые деревянные постройки, находившиеся на этой площади, были либо уничтожены, либо сильно повреждены; вода несла по улицам большие бревна, и они со скоростью до 10 м/с врезались в складские сараи и другие здания, оказавшиеся на их пути.

Серьезной проблемой, связанной со многими недавними цунами, были пожары. При цунами 1964 г. разрушение находившихся на берегу нефтехранилищ вызвало пожары в Кадьяке и Кресент-Сити.

**Тихоокеанская система предупреждения и меры по предотвращению большого ущерба, связанного с цунами.** Наиболее важной мерой, предложенной для предотвращения человеческих жертв от цунами на Тихом океане, является создание Системы предупреждения о сейсмических морских волнах.

После опустошительного алеутского цунами 1 апреля 1946 г. военные и гражданские организации критиковали Береговую и Геодезическую службу США за отсутствие системы предупреждения для Гавайских островов. Были предприняты технические меры для создания такой системы, и в результате сотрудничества вооруженных сил США и Управления гражданской авиации (позднее — Федеральное авиационное агентство) была введена в действие система срочной связи. Другим необходимым делом была подготовка карт, на которых указывается время распространения сейсмических морских волн, возникающих в разных районах на периферии Тихого океана (фиг. 3.1), с изолиниями времени движения головной волны от эпицентра землетрясения до любой точки, показанной на карте.

В систему предупреждения был включен ряд сейсмологических обсерваторий, в том числе обсерватории Беркли (Калифорния), Токио (Япония), Виктория (Канада), и около 30 метеорографических станций, расположенных вокруг Тихого океана (фиг. 3.1). Предупреждения выпускались для различных мест Западного побережья США и для Гавайских островов. С ноября 1960 г. их стали делать для Канады, Аляски и острова Таити. Позднее сведения стали передаваться в Японию, на Тайвань,

на Филиппины, на Фиджи, в Чили, в Гонконг, в Новую Зеландию и на Самоа.

Сейсмологические обсерватории обязались круглосуточно посылать на Гавайские острова информацию о положении очагов и о магнитуде крупных землетрясений тихоокеанского кольца. Сообщения мареографических станций и соответствующие предупреждения срочно передаются в сотрудничающие страны по телеграфу. Волна цунами идет, например, от Чили до Гавайских островов около 10 часов, а от Чили до Японии — около 20 часов. Следовательно, используя эту систему, можно заранее объявить тревогу, и местная полиция успеет после этого принять меры по эвакуации населения из прибрежных районов. В 1964 г. общая тревога по поводу цунами была объявлена системой предупреждения Гонолулу через 86 минут после начала землетрясения. Следует, однако, указать, что сигнал о тревоге, объявляемой на основании сообщения о крупном подводном землетрясении, направляется только штабам гражданской обороны, полицейским управлениям и другим станциям системы предупреждения. Приказ об эвакуации прибрежной полосы выпускается позже, на основании наблюдений уже возникших крупных волн цунами на станциях, расположенных ближе к очагу землетрясения.

О разветвленности системы и напряженности ее работы можно судить по записям в вахтенном журнале донесений обсерватории в Гонолулу (1964 г.).

В драматическом положении оказался штаб Гавайского управления гражданской обороны, который тогда отвечал за выпуск распоряжений об эвакуации прибрежных районов. Ведь перед тем, как дать такое распоряжение, надо определенно знать, что это необходимо.

Главным затруднением была невозможность получить какие-либо сведения с Аляски. Как и при многих других бедствиях, связь с пораженной территорией прекратилась, точно известно было только то, что произошло землетрясение с магнитудой около 8, вероятно под океаном, и могло возникнуть крупное цунами. Наконец, после нескольких часов настойчивых попыток наладить связь, был установлен контакт с одним радиолюбителем на Аляске, имевшим передвижной радиопередатчик в своем автомобиле. Новость была ужасающей: Кордова страшно разрушена крупным цунами!

На этом основании было составлено и готовилось к выпуску предупреждение об эвакуации, но тут пришло короткое сообщение с острова Мидуэй о том, что первые волны уже прошли там и вода поднималась меньше чем на 0,5 м. Может быть, цунами было локальным или остро направленным и Гавайским островам опасность не грозит? Однако о поведении волн цунами в

**Выдержка из журнала записи предупреждений о сейсмических морских волнах обсерватории Гонолулу**

Время по Гринвичу	Кому	От кого	Содержание сообщения: примечания
03 : 44			Тревога. Отмечено сильное землетрясение. Выделена фаза волны P 034354
03 : 58			Смена фотоленты
04 : 00	HDO <sup>a</sup>	HO <sup>b</sup>	Извещение о землетрясении послано окружному уполномоченному по землетрясениям
04 : 01	Макдоналду	HO	Извещение о землетрясении послано д-ру Гордону Макдоналду, исполняющему обязанности советника по цунами
04 : 05	Батчарту	HO	Извещение о землетрясении послано полковнику Батчарту, заместителю начальника гражданской обороны
04 : 07	HO	CINPAC <sup>в</sup>	Запрошены сведения
04 : 13	Колледж Ситка Пасадена Таксон Беркли	HO	Послан запрос о времени прихода волн землетрясения 0336Z (Z означает стандартное гринвичское время, которое опережает гавайское и аляскинское на 10 часов)
04 : 16	JMA <sup>г</sup> Токио	HO	Послан запрос о времени прихода волн землетрясения 0336Z
04 : 18	Обсерватория Гуам	HO	Послан запрос о времени прихода волн землетрясения 0336Z
04 : 19	HO	Манила	P034813
04 : 23	HO	Гонконг	P034334 S4755
04 : 25	HO	Кунья	Запрошены сведения
04 : 30	HO	РТО <sup>д</sup>	Уполномоченный по приливам запрашивает сведения
04 : 31	HO	Гуам	eP034706 («е» = нечетко)
04 : 32	HO	Метеоцентр ВМФ США	Сообщение о сейсмических сотрясениях в Кадьяке от 0332Z до 0340Z Мареографическая станция в Кадьяке повреждена
04 : 33	HO	JMA	Маусиро P034516. Саппоро P034428 S5120. Сендай P034459. Сообщите ваши данные
04 : 36	HO	FAA <sup>е</sup>	Сообщение об обрыве кабелей связи с Аляской



Время по Гринвичу	Кому	От кого	Содержание сообщения; привечания
04 : 38	HO	Беркли	P034205
04 : 48	HO	Таксон	iP034328 eS4932 («i» = четко)
04 : 49	JMA	HO	Гонолулу iP034354,1. По предварительному опре- делению магнитуда около 8
04 : 52			Эпицентр определен в 61° с. ш., 147,5° з. д. Время в очаге — 033 610. Район Сьюарда на Аляске. Маг- нитуда 8
04 : 54	HO	FAA	Сообщение о том, что башня международного аэропорта в Анкоридже развалилась
04 : 59	HO	Пасадена	iP034350Z
05 : 01	HO	COMBARPAC <sup>ж</sup>	Сообщение о движении приливной волны к Кадъ- яку
05 : 02	NAVCOMMSTA <sup>з</sup> , Гонолулу и FAA, Гоно- лулу для AIG <sup>и</sup> 158	HO	Выпущен бюллетень № 1: Объявляется предупреж- дение о приливной волне (сейсмической морской волне). Произошло силь- ное землетрясение в рай- оне Сьюарда: 61° с. ш., 147,5° з. д., в 0336Z 28 марта. Неизвестно — повторяем: пока неиз- вестно, — возникла ли волна

<sup>а</sup> Окружной уполномоченный по землетрясениям в Гонолулу. <sup>б</sup> Обсерватория Гонолулу. <sup>в</sup> Командование ВМФ США на Тихом океане. <sup>г</sup> Японское метеорологическое агентство. <sup>д</sup> Уполномоченный по приливам на Тихом океане. <sup>е</sup> Федеральное авиационное агентство США. <sup>ж</sup> Штаб военно-воздушной разведки США на Тихом океане. <sup>з</sup> Центр связи военно-морского флота США. <sup>и</sup> Административная служба штаба войскового подразделения.

районах малых океанических островов было известно мало, и тревожная неопределенность сохранялась. Итак, выпуск предупреждения об эвакуации был отложен до получения новых сведений. Затем пришло сообщение об огромных разрушениях в Кресент-Сити (Калифорния); для того чтобы пройти от Аляски до Калифорнии, волне потребовалось около 4 часов. Теперь опасность серьезнейшего ущерба на Гавайских островах представлялась вполне возможной и колебаться уже было нельзя. Поэтому, чтобы избежать человеческих жертв (опасность ги-

бели людей страшнее, чем опасность поднять ложную тревогу), командующий решил, по согласованию с научным советником, немедленно включить сирены тревоги.

Волна залила обширные площади побережья Гавайских островов, и в нескольких местах, например в Кахулуи и на острове Мауи, были довольно серьезные разрушения. Однако в большинстве мест ущерб был незначительным, человеческих жертв не было.

При землетрясении 1964 г. единственными пунктами на Аляске, заранее получившими предупреждение о цунами, были город Кадьяк и кадьякская военно-морская база. Метеоцентр ВМФ США, расположенный на кадьякской базе, был включен в Систему предупреждения о сейсмических морских волнах (SSWWS) и располагал мареографической станцией, которая могла дать местное предупреждение, но землетрясение вывело этот мареограф и все имевшиеся линии связи (кроме телефона) из строя. В 04:10 (по Гринвичу), получив донесение с мыса Чиниак о 10-метровом цунами, командир метеоцентра связался по телефону с военной радиостанцией и сделал объявление по радио. В результате этой радиопередачи эвакуация персонала военно-морской базы и федерального авиационного агентства (на острове Вуди) была проведена спокойно, быстро и полностью. В Кадьяке эвакуация была неполной и неорганизованной.

Что касается Канады, то канадское информационное агентство было в июле 1963 г. исключено из системы SSWWS, так что никакого официального предупреждения о цунами Канада из Гонолулу не получила. Побережью западной Канады был причинен ущерб, но человеческих жертв не было.

В Калифорнии первые сообщения из Гонолулу были получены Калифорнийским бюро стихийных бедствий в 5 часов 36 минут. Второй бюллетень был получен в 6 часов 44 минуты и разослан (по телетайпам департамента юстиции штата) всем шерифам, начальникам полицейских управлений и командирам подразделений гражданской обороны всех графств и городов побережья. В Кресент-Сити, который сильнее других пострадал затем от этого цунами, шериф графства после получения предупреждения в 7 часов 8 минут связался с руководителями гражданской обороны. Жители низменных районов были извещены, и сразу же началась эвакуация, но она была неполной. Первые две волны вызвали незначительное затопление, и многие люди вернулись после этого обратно, чтобы навести порядок; такое преждевременное возвращение и привело к трагедии. Третья и четвертая волны причинили наибольшие разрушения. Они накрыли тех людей, которые возвратились из безопасных мест, и тех, кто еще не успел уйти. Семеро завсегдатаев таверны

«Лонг-Бранч», включая хозяина и его жену, возвратились в этот ресторанчик, чтобы забрать деньги. Поскольку все казалось нормальным, они задержались там выпить пива и попали в третью волну. Пятеро из них утонули, когда отступающая волна затащила лодку, на которой они пытались спастись, в какой-то ручей и с размаху ударила о стальную решетку моста.

Предупреждение о надвигающемся цунами связано с двумя проблемами. Первая заключается в том, что поднимается слишком большая тревога, а никакой заметной волны население может и не увидеть. Если предупреждение дается слишком часто, внимание людей притупляется и они не предпринимают необходимых действий. Вторая опасность состоит в том, что когда объявляется тревога по поводу цунами, некоторая часть населения из любопытства устремляется к морю, чтобы увидеть приход волны. По газетным оценкам, в 1964 г. на побережье у Сан-Франциско толпилось 10 тыс. человек, желавших посмотреть на приближение цунами!

Соответствующее оборудование набережных, волноломы и другие береговые инженерные сооружения также могут уменьшить опасность от цунами. Однако чаще всего следовало бы выделять вдоль побережья наиболее низкие участки, которые уже раньше затоплялись при цунами, и не разрешать строительство на этих участках. В наше время обычно достаточно данных, чтобы при местном планировании можно было принять благоразумное решение (см. гл. 8).

Между прочим, можно обратить внимание на то, что после стихийного бедствия восстановление города часто делает его более красивым и благоустроенным. Возьмем снова пример Кресент-Сити после 1964 г. После катастрофы была заново проведена планировка города, расчищено побережье, обращенные к морю низменные, плохо освоенные районы превращены в общественный парк, а предприятия переведены на более высокие площади. Кресент-Сити стал теперь более безопасным и более привлекательным для жизни местом, чем до цунами 1964 г. В Хило, в зоне, подверженной затоплению при цунами, оставлены только отдельные виды торговых построек, а вместо деревянных домов, уничтоженных волнами цунами в 1946 и 1960 гг., теперь создан живописный приморский парк.

В СССР система предупреждения о цунами была организована после разрушительного цунами на Камчатке 4 ноября 1952 г. Основой системы стала сеть цунами-сейсмических станций в Петропавловск-Камчатском, Курильске и Южно-Сахалинске, руководимых Гидрометеослужбой СССР. Система доказала свою ценность, но ее предупреждения, вследствие изоляции этого района и близости зон зарождения цунами, могут делаться только за короткое время до прихода волны. За

период с 1958 по 1964 г. не было пропущено ни одного случая цунами, но пять предупреждений были ложными.

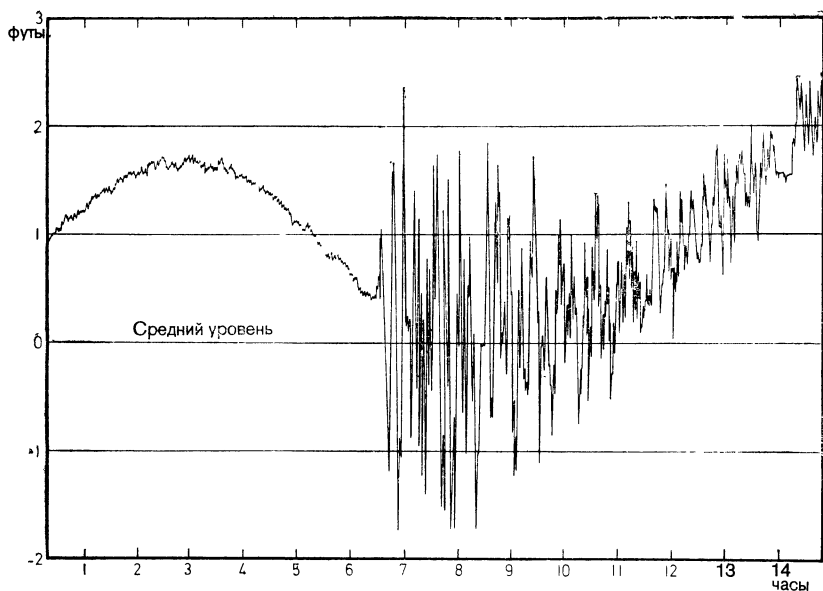
Разработан долгосрочный план улучшения Тихоокеанской системы предупреждения о цунами, согласно которому океан будет покрыт сетью из 30 сейсмических станций и 120 мареографов, образующей автоматическую международную систему предупреждения. Многочисленные данные, которые будут поступать от этой сети, должны направляться на стационарный спутник связи. Этот спутник будет выведен в фиксированное положение на высоту 35 тыс. км над местом пересечения экватора с избранным меридианом; спутник будет принимать и передавать данные сейсмографов и мареографов независимо от погодных условий и повреждений подводных кабелей от землетрясений или придонных мутьевых потоков. Затем сигналы будут поступать на компьютер, например в Гонолулу, и в нужное время будет объявляться тревога.

Могут еще появиться на свет и совершенно новые методы обнаружения цунами. После Аляскинского землетрясения 1964 г. микробарографы Калифорнийского университета (в Беркли) и некоторых других обсерваторий отметили воздушные (инфразвуковые) волны с очень большим периодом (12 минут). Эти колебания атмосферного давления были возбуждены вертикальными смещениями земной коры в эпицентральной области. Ввиду того что, например, до Сан-Франциско волны цунами дошли только через 2,5 часа после сейсмических воздушных волн, есть возможность использовать эти атмосферные волны как признак того, что произошли движения земной поверхности, благоприятствующие возникновению сейсмических морских волн.

### 3.3. Описание отдельных цунами

**Остров Гавайи, 1 апреля 1946 г.** Цунами 1946 г. было самым разрушительным в истории Гавайских островов. Погибло (в основном утонуло) более 150 человек, из них около 90 — в Хило, гораздо большее число людей получило ранения, а материальный ущерб составил 25 млн. долл.

Цунами было порождением Алеутского желоба, где землетрясение с магнитудой 7,5 вызвало смещение морского дна. Землетрясение произошло в 12 часов 29 минут (по Гринвичу), его очаг располагался в 3500 км к северу от Гавайских островов. Первый раз уровень океана начал подниматься в районе Хило (фиг. 2.7) в 6 часов 45 минут, т. е. получается, что скорость распространения цунами составила приблизительно 780 км/ч. Гребни волн были записаны мареографами, установленными на



Фиг. 3.2. Мареограмма цунами, записанная в гавани Гонолулу 1 апреля 1946 г.

Гавайских островах (фиг. 3.2); мареограмма, полученная в Гонолулу, показала, что интервал между гребнями первой и третьей волн был около 25 минут. Затем волны приходили через более короткие и не очень регулярные промежутки времени, вероятно, в результате наложения различных волн, обходявших острова в разных направлениях.

Высота волн, накатывавшихся на гавайские берега, сильно менялась от места к месту. На некоторых участках вода поднималась плавно, и там ущерб был связан главным образом с резким отходом волны в море, но чаще всего волны обрушивались на берег очень бурно, с оглушающим грохотом, шипением и свистом. Местами волна напоминала приливный бор, с крутым фронтом и плоским гребнем позади него. Энергии волн хватало на то, чтобы отрывать куски коралловых рифов размером до 1,3 м и швырять их на берег на высоту 5 м над уровнем моря. Обратное движение воды обнажало ровное илистое дно на ширину 150 м от нормальной береговой линии.

Почти все очевидцы говорили, что первым проявлением цунами был отход воды от берега. Эти наблюдения находятся, однако, в противоречии со сделанными в Гонолулу и Ваимеа инструментальными записями, которые показывают, что сначала уровень воды поднялся (фиг. 3.2), но, как видно на марео-

грамме, подъем в Гонолулу был небольшим и его могли не заметить в тех местах, где не было записывающих приборов. Некоторые волны, проходившие через полосы рифов, имели, по-видимому, высоту до 6 м; сообщалось, что в разных местах самыми высокими были шестая, седьмая и восьмая волны.

Рифы, защищающие северное побережье острова Оаху, уменьшили интенсивность волн по сравнению с открытыми северными берегами островов Молокаи и Гавайи. Имеется много свидетельств того, что высота волн увеличивалась в дальнем, внутреннем конце V-образного залива; это уже замечалось раньше в Японии и в других местах. В нескольких небольших, резко изгибающихся бухтах было позднее установлено, что вода поднималась выше по оси долины, чем на побережье у выхода из бухты.

Были повреждены дома, шоссе и железные дороги, мосты, причалы, волноломы, стенки рыбных прудов, корабли; на многих участках берега пострадали деревянные дома: чаще всего они разваливались под ударами волн, а иногда из-за разрушения оснований. Некоторые хорошо построенные дома, имевшие крепкие внутренние связи, были перемещены на значительное расстояние без заметных повреждений (как бывает и при землетрясениях). Железные дороги вдоль северного побережья в районе Хило и на острове Оаху вышли из строя, в основном в результате разрушения дорожного полотна и смещения рельсов. Было уничтожено несколько автомобильных и железнодорожных мостов, причем большинство из них были подняты со своих опор и оказались на плаву.

Разрушения были связаны также с размывом песчаных пляжей (как выше, так и ниже обычного уровня моря); наводнение сильно повредило мебель в домах и другое личное имущество жителей.

**Чилийское цунами 22 мая 1960 г.** Землетрясение и цунами были следствием подвижки по плоскости регионального надвига, проходящей под Андами и пересекающей дно океана в районе центрального Чили под Южно-Американским (Чилийским) желобом. Волна цунами распространилась по всему Тихому океану, пересекла его и обрушилась на побережье Японии приблизительно через 22 часа после землетрясения, причинив во многих местах значительный ущерб. (Картина распространения этого цунами показана на фиг. 3.1.)

При этом землетрясении на громадной площади произошли изменения высот, которые захватили побережье Чили между 38° и 43° ю. ш. На краях зоны разрыва у островов Моча и Гуафо наблюдалось поднятие на 1—2 м, тогда как в районах городов Корраль и Маульин (в средней части площади)

произошло опускание примерно на 2 м. Цунами обрушилось на этот берег через 15 минут после землетрясения тремя волнами, которые причинили большой ущерб, вызвав наводнения, особенно в городах Сааведра, Меун, Корраль, Маульин и Анкуд. Количество погибших оценивалось числом 909, без вести пропало 834 человека; гибель многих из них была связана с волнами цунами. Когда цунами достигло побережья Японии, оно причинило много вреда и там: около 120 человек погибло, тысячи домов были смыты в море, многие сотни судов были разбиты или затонули.

Начиная с 1952 г. Япония имеет систему предупреждения о цунами, подчиненную Японскому метеорологическому агентству. Она предназначена для информации о возникающих при местных землетрясениях цунами и использует данные специальных станций, расположенных на разных японских островах и оснащенных сейсмографами и мареографами. Цель создания этой системы — оповещение по крайней мере за 30 минут до прихода головной волны цунами. Однако эта система не была рассчитана на то, чтобы объявлять тревогу, связанную с цунами, возникающим при землетрясениях в отдаленных районах. Поэтому после катастрофы, связанной с чилийским цунами, японское агентство стало энергично сотрудничать с Тихоокеанской системой предупреждения, с тем чтобы в дальнейшем избежать жертв при цунамигенных землетрясениях.

## Список литературы

1. *Adams W. M.*, ed., *Tsunamis in the Pacific Ocean*, Honolulu, East-West Center Press, 1970
2. *Anon*, The Report on the Tsunami of the Chilean Earthquake, 1960, Japan Meteorological Agency Report, **26**, 1963.
3. *Bolt B. A.*, Seismic Air Waves from the Great 1964 Alaskan Earthquake, *Nature*, **202**, 1095—1096, 1964.
4. *Galanopoulos A. G.*, Tsunamis Observed on the Coasts of Greece from Antiquity to the Present Time, *Ann. Geofic.*, **13**, 369—386, 1960.
5. *Iida K.*, Magnitude, Energy and Generation Mechanisms of Tsunamis and a Catalog of Earthquakes Associated with Tsunamis, Proc. Tenth Pacific Science Congress, IUGG Monograph, **24**, 7—18, 1963.
6. *Miller D. J.*, Giant Waves in Lituya Bay, Alaska, U. S. Geological Survey, Professional Paper, 354—356, 1960.
7. *Shepard F. P.*, *Macdonald G. A.*, *Cox D. C.*, The Tsunami of April 1, 1946, *Bull. Scripps Inst. Oceanography, Univ. Calif.*, **5**, 391—528, 1950.
8. *Spaeth M. G.*, *Beckman S. C.*, The Tsunami of March 28, 1964 as Recorded at Tide Stations, ESSA Technical Report, C. and C. S., **33**, 1967.
9. *Van Dorn W. G.*, Tsunamis, *Advances in Hydrosience*, **2**, 1—48, New York, Academic Press, 1965
10. *Wiegel R. L.*, Tsunamis, Chapter 11 in *Earthquake Engineering*, N. J., Prentice-Hall, 1970.

## ГЛАВА 4

# ОПАСНОСТЬ ОПОЛЗНЕЙ

Оползни, проседание грунта и лавины постоянно и во многих местах мешают деятельности человека. Масштаб этих явлений имеет диапазон от обрушения отдельных глыб размером в несколько метров, что причиняет только незначительные неудобства, до возникающих изредка гигантских оползней или лавин, площади действия которых измеряются километрами, что уже затрагивает очень многих людей. Поскольку при всех масштабах таких явлений важную роль играют одни и те же свойства почвенного слоя, коренных пород или снега, все эти явления описаны здесь в одной главе, причем главное внимание уделено оползням.

Оползни происходят на склонах, сложенных различным материалом; они имеют различный механизм и возникают в результате нескольких причин. С ними могут быть связаны серьезные разрушения городов и поселков, коммуникаций и крупных сооружений, в том числе плотин и мостов (фото 4.1). Ввиду разнообразия материала оползней, их механизма и скорости развития задача систематизации различных особенностей движения грунта открывает широкое поле деятельности для исследователя, склонного к такой работе. Неудивительно поэтому, что разработано много классификаций оползней. Ниже рассмотрены некоторые наиболее важные аспекты этих классификаций





Фото 4.1. Обрушение склона в Гонконге.

#### 4.1. Классификация оползней

**Материал.** Возможно, наиболее очевидное различие между отдельными видами оползней состоит в характере слагающего их материала. Некоторые из них полностью состоят из скального материала, другие — только из материала почвенного слоя, а третьи представляют собой смесь льда, камня и глины. Снежные оползни называются *лавинами*; они отдельно рассмотрены

в гл. 6. Таким образом, одной из первых можно предложить классификацию по типу и состоянию материала. Например, оползневая масса состоит из каменного материала; каменный материал — это гранит, гнейс или песчаник; он может быть прочным или трещиноватым, свежим или выветрелым и т. д.

С другой стороны, если оползневая масса образована обломками горных пород и минералов, т. е., как говорят, *материалом почвенного слоя*, то можно назвать это оползнем почвенного слоя. Он может состоять из очень тонкозернистой массы, т. е. из глин, или более грубого материала: песка, гравия и т. д.; вся эта масса может быть сухой или водонасыщенной, однородной или слоистой. Такая классификация сама по себе недостаточна, так как механизм оползания каменной массы или движения почвы нельзя определить по описанию одного только материала оползня. Чтобы понять, что произошло, надо знать что-то большее, нежели тип материала. Очевидно, что дополнительный критерий, определяющий различие между оползнями,— это скорость.

**Скорость.** С точки зрения воздействия на людей и на проведение строительных работ скорость развития и движения оползня является единственно важной его особенностью. Трудно найти способы защиты от быстрого и, как правило, неожиданного движения крупных масс горных пород, и это часто приносит вред людям и их имуществу. Если оползень движется очень медленно в течение месяцев или лет, то он редко вызывает несчастные случаи, и можно принять предупредительные меры. Проведя соответствующее районирование, можно предотвратить возведение сооружений в неподходящих местах, шоссеиные дороги и инженерные коммуникации можно провести в обход.

Кроме того, скорость развития явления обычно определяет возможность предсказать это развитие, например можно обнаружить предвестники будущего оползня в виде трещин, которые возникают и расширяются в течение какого-то времени. Но на особенно неустойчивых склонах эти первые трещины могут образоваться так быстро или в таких недоступных местах, что их не замечают, и резкое смещение большой массы пород происходит внезапно. В случае медленно развивающихся движений земной поверхности можно еще до крупной подвижки заметить изменение особенностей рельефа и перекося строений и инженерных сооружений. В этом последнем случае есть возможность, не дожидаясь разрушений, эвакуировать население, сделать объезды на дорогах и отвести коммуникации.

Однако даже тогда, когда скорость движения оползня не увеличивается, это при больших масштабах явления может создать трудную, а иногда и неразрешимую проблему. В настоящее

время решение большинства инженерных проблем связано только со стоимостью и политическими соображениями, а стоимость полевых исследований и работ по укреплению оползающего склона объемом в тысячи кубических метров высока. Например, в случае оползня близ бухты Портьюгиз-Бенд (графство Лос-Анджелес, Калифорния) после первоначального смещения примерно на 10 м, происшедшего в 1956 г., продолжается непрерывное сползание участка поверхности площадью 2—3 км<sup>2</sup> со скоростью несколько метров в год. Механика этого движения была исследована более или менее подробно, и выяснилось, что меры, с помощью которых можно было бы, вероятно, остановить оползень, потребуют затраты около 10 млн. долл.; едва ли местные власти сочтут возможным истратить такие деньги на укрепление этого в основном не промышленного района. Поэтому оползень Портьюгиз-Бенд, который более подробно рассмотрен в разделе 4.6, продолжает двигаться и сейчас.

Скорость оползня зависит от механизма его образования и свойств материала. Например, в гористых областях землетрясения обычно сопровождаются оползнями и обвалами. При достаточно крутом рельефе и неустойчивых склонах (такая обстановка характерна чаще всего для сильно сейсмичных районов: и то, и другое связано с тектоникой) сейсмогенные оползни могут быть главным фактором изменения земной поверхности. При землетрясении Сан-Фернандо (Калифорния, 1971 г., см раздел 1.4) в расположенных поблизости горах Сан-Габриель было отмечено несколько тысяч оползней и обвалов. Обвалы и срывы были характерны и для землетрясения в Инангахуа (Новая Зеландия) в 1968 г.

Другой процесс, также вызывающий иногда быстрое движение поверхностных горных пород, — это подмыв подножия склона морскими волнами или рекой (см. фото 4.2). На более крутых склонах еще более быстрое движение материала происходит и без такой непосредственной причины или повода; оно захватывает обычно коренные скальные породы, а не почвенный слой, так как скальные породы более хрупки. При определенных условиях такие свойства могут проявиться и в почвенном слое, и тогда развиваются очень высокие скорости. Свойства материала рассмотрены ниже, в разделе 4.2.

Удобно провести классификацию оползней по скорости движения, которая определяет время, имеющееся в распоряжении людей для принятия защитных предупредительных мер. В самом общем виде *быстрые* оползни или обвалы происходят в течение секунд или минут; оползни со *средней* скоростью развиваются в течение промежутка времени, измеряемого минутами или часами; *медленные* оползни формируются и движутся в течение периода продолжительностью от нескольких дней до



Фото 4.2. Оползень на залесенном склоне, штат Орегон.

нескольких лет. Однако если очень маленький оползень размером в несколько метров образуется за несколько минут, то такая скорость, с обыденной точки зрения, может считаться малой или средней. И наоборот, если оползень размерами в сотни метров или в километры развивается в течение минут или часов, трудно избежать связанного с ним ущерба, и поэтому такой оползень надо классифицировать как быстрый, хотя скорость движения материала сравнительно невелика.

Важной характеристикой оползня, также связанной со скоростью, является то расстояние, которое он проходит до полной остановки. Отсюда возникает еще один способ классификации оползней.

**Смещение.** В природе имеются примеры очень разных смещений оползневых масс. Это, естественно, связано с масштабом явления, но зависит также от материала и скорости, которую он приобретает. Даже сравнительно небольшие оползни могут пройти расстояние в десятки или сотни метров, если есть достаточно воды, чтобы сделать оползневую массу жидкой. В сухих районах такие оползни изредка вызываются внезапными сильными ливнями, когда тонкий почвенный слой насыщается водой и образуются грязевые потоки. Накопление материала в верхних частях подводных каньонов может привести к неустойчивости и развитию подводных оползней. В некоторых случаях оползание происходит так резко, что порода захватывает окружающую воду, и плотность всей массы понижается. В конце концов оползень превращается в поток жидкости, имеющей только несколько большую плотность, чем сама вода. Такие *мутьевые (турбидитные) потоки* представляют собой важный механизм переноса вещества под водой; полагают, что такие потоки образуются при землетрясениях во многих прибрежных акваториях, где на дне скапливается неустойчивый материал. Именно с подводным оползанием обычно связаны повреждения подводных кабелей после землетрясений.

Высокая скорость движения наземных оползней поверхностных и коренных пород при землетрясениях часто приводит при наличии подходящего рельефа к очень большому перемещению материала. При этом турбулентный характер начального движения может опять-таки обусловить то, что оползающая масса захватит воздух или воду в виде порового флюида, и в результате движение будет иметь характер потока, а не срыва твердого материала. Когда такой поток возникает на крутом горном склоне или у начала долины, где движение обрушившегося материала не встречает никакого или почти никакого сопротивления, оползневая масса может переместиться на расстояние, измеряемое километрами, даже если она состоит преимущественно из твердого материала, как это было на Аляске при землетрясении 1964 г. и в Перу в 1970 г. (см. раздел 1.4).

Даже очень небольшие смещения оползневой массы могут создавать значительные трудности для инженерных работ и строительства. При подготовке бортов долины или каньона для сооружения опор плотины, когда породы начнут приспосабливаться к новому распределению напряжений, по трещинам и плоскостям напластования, имеющимся в породе, может произойти смещение на несколько сантиметров. После того как строительство будет закончено, вода сможет проложить себе путь по новым раскрывшимся трещинам. Когда строительство инженерных сооружений сопровождается строгим контролем, эти смещения обычно вовремя бывают замечены и ответствен-

ный инженер должен решить, что следует сделать: удалить оползшую массу и заменить ее насыпным грунтом или бетоном или же наглухо забить образовавшиеся трещины глиной или цементом. Такое чрезвычайно небольшое смещение произошло во время подготовительных работ для строительства водохранилища Болдуин в Калифорнии в 1950 г.; оползающий блок не был удален, но была предпринята попытка зацементировать открывшиеся щели. Некоторые трещины, несомненно, остались открытыми, и это, как считают, послужило одной из причин прорыва водохранилища в 1963 г.

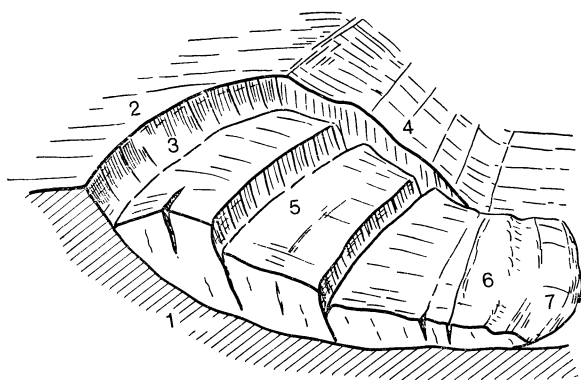
В предшествующих рассуждениях использован ряд терминов, таких, как *поток*, *срыв* и *оползающий блок*, которые уже указывают на механизм движения. Следовательно, еще один из логических способов классификации может быть основан на механизме движения.

**Механизм.** Как правило, в любом оползне оползающую массу можно легко отличить от подстилающих устойчивых коренных пород или стабильного почвенного слоя, не участвующего в движении. Между ними имеется поверхность скольжения (скола, срыва), но в том случае, когда движение носит характер течения очень вязкой жидкости, трудно бывает выделить четкий переходный слой. Скорость движения может постепенно затухать с глубиной. Первый тип движения называют *скольжением*, второй — *течением*.

В зависимости от характера материала, захваченного скольжением или течением, и от присутствия в нем трещин или пустот оползающая масса может иметь форму, близкую к какой-нибудь геометрической. Простейшая форма: оползающее тело имеет большие продольные и поперечные размеры по сравнению с толщиной. В этом случае топография и свойства материала таковы, что поверхность раздела, по которой осуществляется скольжение или течение, — это практически плоскость, а характер перемещения — поступательное движение блока или нескольких блоков вниз по склону. Иногда, если поверхность соскальзывания действительно представляет собой плоскость, сползает только один блок. В более обычных условиях поверхность скольжения оказывается неровной, и из-за этого соскальзывающая масса разбивается на ряд блоков, отделенных один от другого трещинами и плоскостями скола. Разрушение начинается у подошвы склона, допустим, в результате размыва, так что сначала некоторый блок сползает к подошве склона и, таким образом, прекращается его стабилизирующее действие на блоки, расположенные выше по склону; потеряв опору, они последовательно сползают вниз. Этот вид разрушения склона, имеющий множество разновидностей, называется *прогрессиру-*

щей [в русской терминологии — «регрессивной». — Перев.] эрозией. Такое разрушение может быть и быстрым, и медленным.

В случае если склон, имеющий ограниченную площадь, сложен однородными мелкозернистыми грунтами, обычно проявляется другой механизм движения. Здесь поверхность скольжения имеет, как правило, грубо цилиндрическую или сферическую форму, и оползающая масса при обрушении испытывает вращение. В общем случае, как будет показано в разделе 4.3, можно найти центр этого вращения. В почвах и коренных породах, содержащих сложные системы трещин отдельности и пустот, может возникнуть серия поверхностей скольжения, использующих отдельные участки трещин отдельности. Так, система субгоризонтальных трещин, пересеченная системой крутопадающих трещин, может способствовать появлению оползающей массы,



Фиг. 4.1. Схема идеализированного оползня.

1 — поверхность склона (скольжения, срыва),  
2 — оползевый цирк,  
3 — стенка отрыва;  
4 — боковая стенка;  
5 — поперечные трещины,  
6 — оползевые валы выпирания, 7 — основание оползевых откосов.

часть которой движется почти горизонтально, а другая часть, занимающая более высокое положение, опускается по крутым трещинам. В этих условиях между двумя частями оползающей массы должна появиться еще одна поверхность раздела — плоскость скола. В материалах, не имеющих ярко выраженной отдельности, и в анизотропных (в которых свойства вещества различны в разных направлениях) могут возникать очень сложные сочетания поверхностей скольжения. Некоторые характерные черты таких оползней схематически показаны на фиг. 4.1.

Там, где переход между оползающей массой и устойчивым материалом склона менее четкий, картина напоминает течение материала, имеющего свойства жидкости; при этом скорость и величина смещения постепенно уменьшаются от поверхности вниз. Если течение происходит очень медленно, то этот процесс характеризуют как *ползучесть* (крип), и это явление распространено на склонах возвышенностей чрезвычайно широко, вероятно

во всем мире. В большинстве случаев это движение происходит незаметно и обнаруживается только при точных измерениях.

Когда крутой склон сложен трещиноватыми хрупкими породами, последовательное разрушение происходит путем падения, а не соскальзывания материала, т. е. обрушивающаяся масса теряет связный контакт с устойчивым неподвижным основанием и может свободно падать (целиком или частично) под действием силы тяжести. Чаще это бывает с коренными горными породами, а не с материалом почвенного слоя (хотя столкновение блоков породы приводит к их дроблению и измельчению до размеров зерна), поэтому такое явление называют горным *обвалом*. С такими обвалами связан ряд катастроф, например в горах Эльм в Швейцарии в 1881 г. и в горах Тертл (Канада, провинция Альберта) в 1903 г. (см. раздел 4.6).

Не вдаваясь в детали, мы представляем здесь упрощенную схему классификации, используемую часто для установления

**Таблица 4.1**

**Классификация оползней**

Тип движения	Поведение материала <sup>а</sup>	Тип материала	Характеристика движения по скорости	Название
Падение	Хрупкое	Скальные породы, лед, цементированные почвы	Быстрое	Обвал, ледопад (ледниковый обвал), обвал почвенного слоя
Скольжение	Неустойчивое	Скальные породы, почвы, снег	От быстрого до медленного	Срыв с попятным вращением, плоский блоковый оползень, латеральное расползание, плитообразная лавина (осов)
Течение	Устойчивое	Обломки горных пород, песок ил, глина, снег	От быстрого до медленного	Каменная река, песчаный поток, течение грунта, грязевой поток, лавина

<sup>а</sup> См. фиг. 4.5 и сопровождающий ее текст, стр. 227.

причин того или иного оползня и для оценки опасности оползания на склонах гор и холмов. Элементы различных систем классификации, упомянутых выше, приведены в табл. 4.1.



## 4.2. Механика оползней

**Общие соображения.** Возникновение оползней имеет целый ряд механических причин, и это необходимо учитывать при изучении отдельного явления или при оценке опасности. Одно из наиболее общих условий для статического состояния — это, конечно, наличие склона, так как для появления касательных напряжений, в результате которых может начаться скольжение, необходима составляющая силы тяжести, направленная тангенциально к поверхности. Горизонтальные ускорения при землетрясении также могут создать такое усилие и вызвать смещение даже при горизонтальном положении плоскости основания.

Оползень возникает тогда, когда направленная вдоль склона составляющая сил, действующих на некоторую массу рыхлого грунта или скальных пород, оказывается больше прочности материала или больше его сопротивления скалыванию. Переход от устойчивого состояния к началу скольжения означает, что в результате каких-то причин изменилось либо усилие, действующее на горные породы склона, либо сопротивление этих пород. Исследуя компоненты, образующие суммарную силу, приложенную к материалу, и его сопротивление скалыванию, можно установить, какие причины привели к началу оползания и каков механизм этого оползания.

Согласно физическому определению, сила равна произведению массы материала, к которому она приложена, на получаемое этой массой ускорение. В случае оползня, начинающегося при статических условиях, ускорение создается силой тяжести, которая действует в вертикальном направлении и может быть разложена на две составляющие: параллельно и перпендикулярно к склону. Следовательно, увеличение силы, вызывающей обрушение, может быть обусловлено либо возрастанием массы материала, либо увеличением ускорения.

Если образование оползня не связано с землетрясением, то, конечно, никакого увеличения ускорения силы тяжести быть не может, но может возрасти составляющая этого ускорения, направленная вдоль склона, например, если склон становится круче. Увеличение крутизны может произойти либо в процессе эрозии основания склона под действием тех или иных факторов, либо путем добавления материала у вершины склона в процессе естественного развития или в результате человеческой деятельности, либо при локальном или региональном наклоне земной поверхности. Возрастание массы породы, образующей склон, может произойти в результате отложения обломочного или каменного материала на его поверхности. Может возрасти и плотность этого материала вследствие дождей или проникновения воды из других источников.

С другой стороны, обрушение склона может произойти без какого бы то ни было изменения действующих сил, если по какой-либо причине уменьшится прочность поддерживающего его материала. Можно сказать, что материал, образующий склон, держится на своем месте благодаря тому, что подстилающие пласты обладают сопротивлением скалыванию. Химические процессы, развивающиеся вслед за выветриванием, а также изменение физических условий, например увеличение давления в трещинах и пустотах горных пород или в пористом материале почвенного слоя, могут повлиять на величину этого сопротивления. В некоторых хрупких материалах сопротивление скалыванию, возможно, падает по мере развития самого процесса скалывания. Такое поведение породы определяется как неустойчивое. В этом случае начальная подвижка вызывает понижение прочности, которое ведет к дальнейшему смещению и еще более понижает прочность. Происходит прогрессирующее обрушение и в конце концов образуется оползень, начинающийся обычно с мелких подвижек, которые можно обнаружить чувствительными инструментами.

**Изменение нагрузки.** Изменение направленной вдоль склона составляющей веса оползневого тела может быть связано с естественными причинами и с деятельностью человека. В природе увеличение крутизны склона является обычным процессом, который чаще всего развивается вследствие движения воды. Как правило, это происходит путем удаления части материала у основания склона в результате работы волн или эрозионной деятельности рек. Поскольку, как отмечается ниже, материал, находящийся у основания склона, играет важную роль в поддержании стабильности всего склона, удаление этого материала приводит к неустойчивости. Движение обычно развивается постепенно, но может и резко ускориться в период высокого наводнения или в результате сильного дождя. Если оползание происходит таким путем, то обычно обнаруживается, что в районе обрушения склонов случалось многократно. Оползший материал временно укрепляет склон, но затем размывается, и снова возникает неустойчивость, которая в свою очередь обуславливает новое оползание обломочного материала. Области, в которых действует такой механизм разрушения склонов, можно поэтому легко узнать (фото 4.9). Уступы, в которых в результате оползания рыхлого материала обнажаются нижележащие породы, имеют свежий вид и не согласуются с общим наклоном поверхности.

Множество оползней связано с деятельностью людей. Прокладка шоссе, строительство жилых районов на склонах, строительство плотин, водохранилищ, дренажных и

других инженерных сооружений — все это связано, как правило, с перемещением большого количества рыхлых и скальных пород, образующих склоны. Если при этой работе материал добавляется в верхней части склона или удаляется из его основания, то тем самым увеличивается вероятность быстрого разрушения этого склона. В чрезвычайных случаях оползни возникают прямо во время строительства или сразу же после его завершения, но влияние построенного сооружения может не быть столь непосредственным и проявляется спустя какое-то время при различных обстоятельствах. При сооружении на склоне дорожной насыпи сам по себе вес насыпанного грунта может не вызвать обрушения склона, но насыпь повлияет на режим естественного водного стока и на процесс дренирования склона. В результате произойдет, вероятно, повышение веса пород или изменение водяного давления в порах почвы или в интерстициях скальных пород. И в том, и в другом случаях следствием может стать оползание пород спустя несколько месяцев или лет после окончания строительства.

Когда поперек долины построена плотина и за ней накапливается вода, заполняя пространство, предназначенное для водохранилища, на бортах долины может начаться обрушение склонов, вызванное водонасыщением и, следовательно, понижением прочности материала в основании склона или эрозионной деятельностью волн, подмывающих его подножие, если оно не защищено. Бывает достаточно удалить совсем небольшое количество материала, и крупные участки склона становятся неустойчивыми. Озеро нарушит также режим выпадения осадков, поглощения и стока воды (см. раздел 7.2); такие гидрологические изменения обычно оказывают неблагоприятное влияние на ранее стабильную область.

**Сейсмическое воздействие.** Во время землетрясений происходят колебания грунта во всех направлениях (см. гл. 1); при этом в районе наиболее сильных сотрясений возникают как горизонтальные, так и вертикальные ускорения, достигающие значений 0,5 величины ускорения силы тяжести ( $g$ ) или больше. Умножив такое ускорение на величину массы потенциального оползневого тела, убедимся, что возникающая сила горизонтального переноса имеет тот же порядок, что и вес этого тела. Хотя эти динамические ускорения действуют только короткое время, они могут самым сильным образом влиять на образование оползней на склонах, состояние которых близко к неустойчивости; в результате характерным следствием землетрясений является образование оползней, причем масштаб этого явления зависит от рельефа эпицентральной области. Во время землетрясения Сан-Фернандо (Калифорния, 1971 г.) и сразу же после

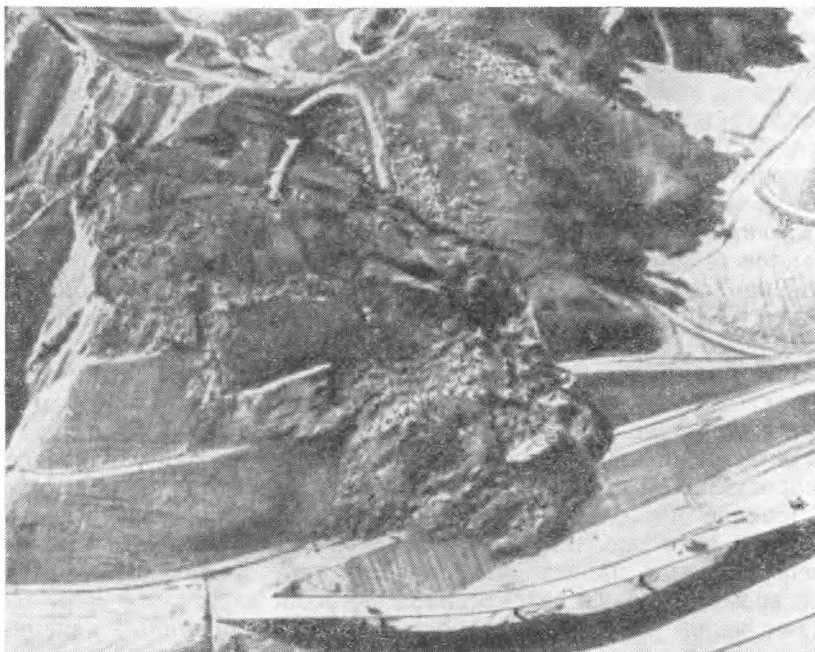


Фото. 4.3. Оползень на подрезанном склоне, образовавшийся при землетрясении Сан-Фернапдо 9 февраля 1971 г.

него в горах Сан-Габриель образовались тысячи оползней и обвалов (фото 4.3); громадная туча пыли держалась над районом сильнейших сотрясений несколько дней.

Кроме прямого воздействия сейсмических ускорений на величину сил, вызывающих разрушения, колебания грунта могут способствовать понижению его прочности вдоль той поверхности, где проявляется сопротивление скольжению. При сильных сотрясениях грунта у потенциальной поверхности скольжения происходят колебания величины напряжений: (как нормальных, так и касательных), и может произойти изменение знака касательных напряжений. При лабораторных испытаниях прочности грунтов на сдвиг было отмечено, что при циклической касательной нагрузке некоторые грунты показывают несколько меньшую прочность на сдвиг, чем при однократном приложении максимальной нагрузки: таким образом, их динамическая прочность на сдвиг ниже, чем статическая. Следовательно, потенциальная оползневая масса, устойчивая при статических условиях, может потерять устойчивость после нескольких циклов колебаний, вызванных землетрясением. При экстремальных условиях,

возникающих обычно в водонасыщенных песках, сочетание циклических касательных напряжений и волюметрических особенностей грунта в присутствии воды приводит к *разжижению* грунта во время землетрясения. Возникает такое состояние материала, когда в течение короткого времени он ведет себя как плотная жидкость, а не как твердая масса. Вопрос о разжижении грунта рассмотрен несколько подробнее в следующем разделе.

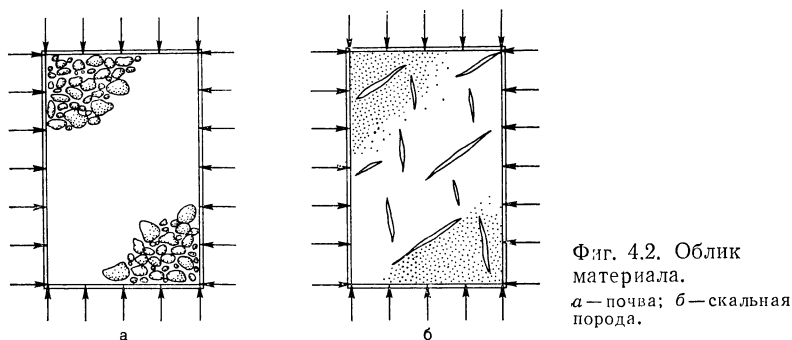
Конечно же, характерной чертой землетрясения является то, что оно начинается внезапно, и связанные с ним оползни развиваются быстро. Хотя некоторые тела рыхлых или скальных пород приходят во время землетрясения в состояние, граничащее с неустойчивостью, так что разрушение может произойти спустя недели или месяцы под влиянием каких-то других менее значительных причин, главное воздействие землетрясений с точки зрения образования оползней проявляется мгновенно. В рамках классификации, данной в табл. 4.1, эти оползни попадают в категорию оползней, развивающихся быстро или со средней скоростью. Обычно все крупные явления такого рода происходят в течение нескольких минут после окончания землетрясения. Эффект этих оползней усиливается их количеством и общими разрушениями, происходящими вследствие землетрясения в это же время; поэтому сейсмогенные оползни в большей мере мешают человеческой деятельности, чем изолированные явления, возникающие в статических условиях. Землетрясения представляют собой самое полное и серьезное испытание для всех потенциально неустойчивых структур горных пород на площадях в сотни или тысячи квадратных километров. Поскольку ни в одной сейсмически активной области невозможно исследовать полностью все потенциально неустойчивые участки, многие из эффектов землетрясения всегда будут неожиданными.

**Прочность на сдвиг и поровое давление.** Характер изменения сил, стремящихся вызвать образование оползней, сравнительно просто понять и при минимальном знании прикладной механики, но изложение вопросов прочности рыхлых и скальных пород на сдвиг требует краткого рассмотрения механических свойств и поведения этих материалов. Во-первых, необходимо описать влияние давления, развивающегося в поровой жидкости, на поведение зернистого материала. На фиг. 4.2, *а* показан разрез через агрегат зерен почвенного слоя: между зернами имеются свободные пространства, называемые порами, или пустотами. Что же касается скальных пород, то, как видно на разрезе образца такой породы, показанном на фиг. 4.2, *б*, пустое пространство в них складывается из трещин. Поры и трещины заполнены газом (воздухом), жидкостью (обычно водой) или и тем, и другим, находящимися под некоторым гидростатическим давле-

нием. Если образец рыхлого или скального грунта (фиг. 4.2) поместить в гибкую, например резиновую, оболочку, ко внешней стороне которой можно приложить давление, как показано на схеме, то можно исследовать эффект изменения этого давления. В частности, можно измерить поровое флюидальное давление и полный объем образца.

Если поры или трещины в породе заполнены легко сжимаемым газом (воздухом), то приложение внешнего давления вызовет изменение объема породы, но мало повлияет на давление газа. Это связано с большим различием в сжимаемости воздуха и текстуры породы и приводит к тому, что зерна породы сближаются и порода под давлением становится прочнее.

Однако если поровое пространство полностью насыщено водой, то изменение внешнего давления, приложенного к оболочке, приведет к изменению давления воды в порах. Степень



повышения порового давления зависит от относительной сжимаемости твердой и жидкой составляющих почвы. Если почва (фиг. 4.2, а) насыщена водой, то в общем случае вода оказывается сравнительно менее сжимаемой, чем твердый материал почвы, так что приложение внешнего гидростатического давления заставит поровое давление подняться на некоторую величину. Вследствие того что благодаря несжимаемости воды объем образца *почвы* не может сильно измениться, увеличение внешнего давления в этом случае не повышает прочности материала. С другой стороны, в *скальной* породе сравнительно небольшой объем пустот обуславливает приблизительное равенство сжимаемости твердой и жидкой составляющих. Поэтому повышение внешнего гидростатического давления повышает и гидростатическое давление в породе, и поровое давление жидкости. Увеличение прочности породы пропорционально той доле повышения давления, которая приходится на твердую составляющую породы. Во всех случаях изменение прочности и других интегральных свойств вещества зависит только от величины напряжения,

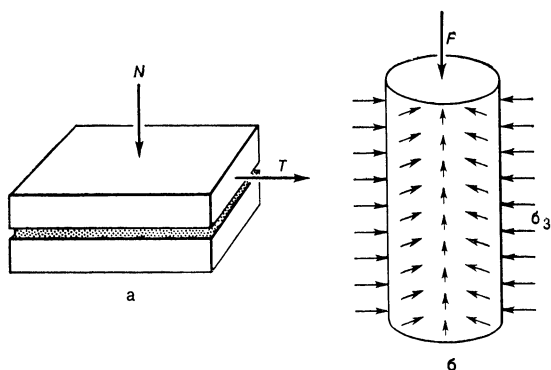
приложенного к его твердой составляющей (т. е. от доли напряжения, приходящейся на твердую составляющую). Это напряжение, или давление, называют *эффективным* напряжением.

Если в оболочке имеется отверстие, дающее выход в область низкого давления воды, то вода будет удаляться из образца; в результате этого понизится поровое давление, создаваемое приложенным извне напряжением, и твердый каркас породы будет сжиматься. В природе роль такого «отверстия» играет водопроницаемость окружающих пород. Таким образом, достаточно быстрое приложение гидростатического давления к водонасыщенному рыхлому или скальному грунту обычно вызывает изменение как порового давления, так и нормального давления на твердую составляющую грунта; изменение порового давления через некоторое время исчезнет, так как излишняя поровая вода перейдет из нагруженной области в смежный материал.

Интересное и качественно новое явление происходит тогда, когда в водонасыщенной рыхлой или скальной породе касательное напряжение становится больше нормального. В этом случае при низких значениях касательного напряжения материал испытывает изменение формы без изменения порового давления. Если касательные напряжения возрастают и достигают значений, близких к значению прочности материала на сдвиг, то твердые зерна смещаются (скользят) одно по другому так, что общий объем породы меняется. Это явление называется *дилатансией*. Если грунт находится в рыхлом состоянии, то происходит уменьшение объема (отрицательная дилатансия), если же зерна породы раньше были плотно сжаты, то высокие касательные напряжения вызывают увеличение объема (положительная дилатансия). В случае трещиноватых пород высокий уровень касательных напряжений способствует раскрытию трещин, и объем всей массы породы увеличивается, как и в случае плотного грунта. Если поры и трещины заполнены только воздухом, изменение объема рыхлой или скальной породы под действием касательных напряжений происходит независимо от порового давления. Наоборот, когда почва или прочная порода насыщена водой, изменение объема, связанное с касательными напряжениями, затруднено и, следовательно, в поровой жидкости возникает дополнительное давление. В рыхлом водонасыщенном грунте развитие сколов вызывает повышение порового давления, в плотных грунтах, когда дренаж невозможен, поровое давление падает. В случае скальных пород отсутствие дренажа также может вызвать падение порового давления при развитии сколов.

При испытании грунтов обычно используются специальные установки, две из которых показаны на фиг. 4.3. На фиг. 4.3, а

показана схема установки для испытания на простой сдвиг. Образец почвы или скальной породы помещается в ящик, разрезанный по длине надвое, так что обе его половины не контактируют между собой кроме как через образец. К ящику приложена нормальная нагрузка  $N$ . Затем с боков к ящику прикладывается касательная сила  $T$ , направленная так, чтобы сместить обе половины ящика относительно друг друга вместе с испытуемым материалом. Величину силы  $T$  постепенно увеличивают, и испытуемый материал деформируется до тех пор, пока сила  $T$  не достигает критического значения, когда в образце почвы происходит разрушение и две половины ящика скользят в разные стороны без дальнейшего увеличения силы  $T$ . Материал образца может терять или не терять воду в зависимости от скорости нагрузки и своей собственной водопроницаемости.



Фиг. 4.3. Схемы установок для испытаний грунтов.  
а — простой сдвиг;  
б — сдвиг в условиях трехосного напряженного состояния.

Если по условиям опыта обезвоживание образца допускается, то каждое приложение нормальной нагрузки  $N$  будет слегка уменьшать объем образца и увеличивать его плотность. Каждому значению нормальной нагрузки будет соответствовать некоторая величина касательной силы, необходимой для разрушения образца. Испытание производится таким образом, что материал обезвоживается, вся нагрузка  $N$  идет на то, чтобы плотно спрессовать твердые части породы, и касательная сила, требуемая для разрушения, оказывается пропорциональной нагрузке  $N$ . Изображая результаты опыта на графике (фиг. 4.4), обнаруживаем, что они приблизительно укладываются на прямую линию (прямая  $A$  на фиг. 4.4). Эта линия пересекает или не пересекает ось координат, на которой отложены значения касательной нагрузки. Если такое пересечение есть, то оно определяет величину сцепления, или связности, грунта, если же такого пересечения нет, то материал называют *бессвязным*. Угол, образуемый этой прямой с горизонталью, называется *углом*



внутреннего трения материала, тангенс этого угла — это коэффициент трения.

Если почва или скальная порода обезвожена, то вся сила  $N$  идет на повышение прочности материала, и именно эта нагрузка необходима для возникновения эффективных напряжений, описанных ранее. Если же при приложении нормальной нагрузки вода из образца не удаляется или удаляется только частично, то не вся нормальная нагрузка  $N$  проявляется в твердых частях материала как эффективное напряжение, вместо этого возникает некоторое поровое давление. В этом случае касательная сила  $T$ , вызывающая разрушение образца, будет пропорциональна эффективной величине нагрузки, а не полной приложенной силе.

Например, если образец песка, насыщенного водой, поместить в установку, показанную на фиг. 4.3, *а*, и не препятствовать его обезвоживанию при нормальной нагрузке  $N_0$ , то эта



Фиг. 4.4. Прочность почвы или скальной породы на сдвиг.

нагрузка и будет эффективной. Для разрушения образца при этой нагрузке  $N_0$  потребуется тангенциальная нагрузка  $T_0$ , где  $T_0 = N_0 \operatorname{tg} \phi$  ( $\phi$  — угол внутреннего трения породы). Если теперь не прилагать касательной нагрузки, а увеличить нормальную нагрузку  $N_0$  на величину  $\Delta N$ , но *больше не позволять воде выходить* из образца, то при последующем приложении касательной силы разрушение будет происходить при тех же значениях  $T_0$ , что и раньше. Причина этого состоит в том, что приращение нагрузки  $\Delta N$  не увеличивает эффективное напряжение в грунте и, следовательно, не повышает его прочность. Это справедливо при любой величине приращения нагрузки  $\Delta N$ , если не происходит обезвоживание. Такое поведение материала показано на фиг. 4.4 горизонтальной линией B (полная нагрузка  $N = N_0 + \Delta N$  откладывается на горизонтальной оси графика). В материале четко проявляется связность, обусловленная в этом случае сохранением воды в образце.

Настоящая связность развивается в сплошных породах благодаря сцеплению между молекулами минералов; в глинах она подчиняется эффективным напряжениям или нагрузкам,

большим, чем те, при которых проводится испытание. В последнем случае высокие эффективные напряжения создают между частицами глины сцепление, которое не исчезает при снятии этого напряжения. В результате этого глина как бы «запоминает» наиболее высокие, развивавшиеся в ней напряжения, а созданное ими сцепление можно разорвать, только приложив к глине касательное напряжение какой-то меньшей, чем раньше, величины (допуская отток воды или препятствуя ему). Следовательно, касательная сила или нагрузка, приводящая к разрушению, отражает величину наибольшего эффективного напряжения, приложенного к глине. В частности, если сдвиг в глине происходит без какого бы то ни было всестороннего давления, то ее прочность на сдвиг обусловлена в значительной мере сцеплением, возникшим при наибольших прежних напряжениях.

Вывод, что деформация и прочность почвы или пористой породы зависят только от эффективного напряжения, имеет большое значение и важные следствия для понимания механики грунтов и скальных горных пород, а в последнее время и для изучения механизмов землетрясений (см. раздел. 1.3).

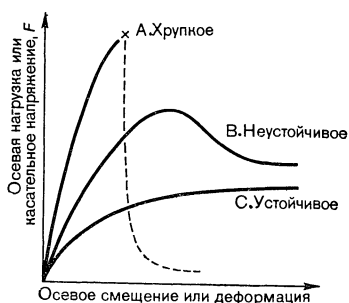
Эффективное напряжение в материале нельзя измерить в том смысле, что нельзя использовать для этого какой-нибудь измерительный прибор. Однако можно использовать инструменты, чтобы определить в какой-нибудь точке *полное нормальное напряжение*, действующее в определенном направлении; другое оборудование можно применить для измерения порового давления воды. Вычитая поровое давление из полного напряжения, получаем эффективное нормальное напряжение. Следует заметить, что эффективное нормальное напряжение можно получить вычитанием порового давления только из *полного* нормального напряжения. На *касательные напряжения*, развивающиеся в грунте, поровое давление не влияет, так как поровая жидкость не воспринимает касательных напряжений. Таким образом, касательные напряжения — это всегда эффективные напряжения. При многих условиях, реально существующих в рыхлых и скальных породах, полное напряжение (связанное преимущественно с силой тяжести) остается постоянным при изменении порового давления вследствие удаления воды или под влиянием других причин. В такой обстановке эффективные напряжения в грунтовой массе могут измениться при изменении порового давления воды и в соответствии с этим могут меняться прочность и величина деформации. Надо четко представлять себе, что изменение порового давления в отличие от общей нагрузки увидеть нельзя, и поэтому грунт может испытывать тонкие внутренние изменения, сохраняя прежний внешний облик, и эти изменения удастся обнаружить только путем тщательных измерений. Это означает, что изменение порового давления и,

следовательно, эффективного напряжения может стать причиной многих внезапных оползней в неожиданных местах.

Другой важной характеристикой поведения материала является соотношение *напряжение — деформация* или *сила — смещение* перед разрушением, в процессе разрушения и после него. Это лучше всего иллюстрируется на примере другого обычного способа испытания грунтов, показанного на фиг. 4.3б. Здесь цилиндрический образец рыхлого или скального грунта одевают резиновой или пластиковой оболочкой. К верхней и нижней круговым поверхностям прикладывают плиты, создающие нагрузку, и образец помещают в камеру, наполненную водой или маслом, через которые окружающее, или гидростатическое, давление передается на весь образец. Резиновая или пластиковая оболочка не позволяет жидкости проникать из камеры внутрь образца. К верхней пластине прикладывают осевую нагрузку. Преимуществом такой установки является возможность лучше воздействовать на дренаж грунта, чем в установке для испытания на простой сдвиг (фиг. 4.3, а), и более однородное распределение напряжения в объеме образца. Обычно испытание начинается приложением внешнего гидростатического давления с удалением воды из образца или задержкой ее в нем, в зависимости от моделируемых условий. Если отток воды допускается, то дается время, необходимое для уменьшения давления поровой воды; продолжительность этого времени зависит от проницаемости и сжимаемости образца. Когда достигаются нужные условия, образец подвергается осевой нагрузке и производится измерение возникающих смещений или упругих деформаций. Обычно отмечается также изменение объема (если при испытании вода удаляется) или порового давления (если дренаж не допускается).

В зависимости от типа материала наблюдаются различные соотношения между нагрузкой и смещением. Если образец состоит из скальной породы, а окружающее давление при испытании мало, т. е. соответствует условиям у поверхности Земли, то обычно проявляется *хрупкое* поведение, характеризуемое на фиг. 4.5 кривой А. В этом случае деформация в породе постепенно возрастает до тех пор, пока нагрузка не достигает некоторой максимальной величины, при которой образец раскалывается или резко разрушается. Если образец ничем не скреплен, то он разбивается на куски. Если же к внешней части резиновой оболочки приложено небольшое всестороннее давление, то хрупкое поведение материала выражается внезапным и резким падением касательной силы до какой-то гораздо меньшей величины. Такое же, но не столь явно выраженное поведение проявляется в некоторых породах и при значительно меньших давлениях: в плотных песках, в гравии, а также в

глинах, подвергавшихся в прошлом большим эффективным нагрузкам. В этих случаях смещение возрастает до того момента, когда осевая нагрузка достигает некоторой максимальной величины, после чего она уменьшается до определенного постоянного уровня, при котором смещение продолжает увеличиваться. При таком типе поведения два значения нагрузки вызывают разрыв: а) максимальное, или пиковое, и б) конечное, или остаточное, значение, которое сохраняется неизменным при продолжающемся изменении формы образца. Этот тип поведения на фиг. 4.5 показан на кривой *В*. Если образец представляет собой скальную породу под очень высоким всесторонним давлением или если это рыхлый песок, гравий, глина, испытывавшая в прошлом только умеренные эффективные нагрузки, то наблюдается поведение, показанное на фиг. 4.5 кривой *С*. В этом случае



Фиг. 4.5. Зависимость смещения от нагрузки при различных типах поведения грунтов.

смещение постепенно возрастает до некоторого максимального значения нагрузки, когда смещение продолжается без дальнейшего увеличения нагрузки. Таким образом, при таком типе поведения пиковая и конечная нагрузки имеют одну и ту же величину. В терминах механики кривые *А* и *В* фиг. 4.5 соответствуют *неустойчивому* поведению материала, а кривая *С* — *устойчивому* поведению. Смысл этих названий обсуждается ниже.

Высокое всестороннее давление, под которым находятся породы земной коры на большой глубине, существует одновременно с повышенной температурой, так что для того, чтобы испытание правильно отражало условия на глубине в несколько километров, образец должен быть нагрет. Когда это сделано, в поведении породы обнаруживаются важные изменения. В определенном диапазоне значений эффективного давления и температуры порода деформируется в основном в соответствии с кривой *В* фиг. 4.5, но падение напряжения от пикового значения происходит гораздо резче и, если осевое смещение нагружаемой плиты продолжится, нагрузка может достичь нового, теперь, уже менее высокого максимума. За ним в свою очередь последует еще одно резкое уменьшение и новое возрастание нагрузки.

Это явление наблюдается обычно при *скольжении с трением* и называется иногда «липким», или *скачкообразным*, скольжением. Поскольку оно наблюдается только при определенных температурах и давлениях, становится понятным, почему в земной коре землетрясения возникают только в определенном интервале глубин (см. раздел 1.3). На малых глубинах породы испытывают хрупкое дробление (кривая *A* на фиг. 4.5), а на очень больших глубинах проявляется чисто пластическое поведение, показанное кривой *C*.

Если условия, приводящие к возникновению оползня на склоне, сложенном рыхлым песком или мягкой (до умеренной жесткости) глиной, развиваются путем, например, постепенного возрастания нагрузки на потенциальную оползневую массу, то в какой-то момент касательные напряжения на потенциальной плоскости скольжения становятся равными прочности материала. Для указанных пород зависимость смещения от приложенной силы описывается кривой *C* на фиг. 4.5, и, таким образом, скольжение оползневой массы будет развиваться постепенно по мере того, как нагрузка будет приближаться к максимальной величине. В этом случае можно видеть, что смещение не уменьшает *прочности* материала на *сдвиг*. Однако в процессе скольжения происходит существенно автоматическое уменьшение действующей *силы*, так как при оползании материала часть нагрузки передается на подошву откоса и тем самым ослабляется нагрузка на верхнюю часть склона. Таким образом, после сравнительно небольшой подвижки оползень может остановиться вследствие особых соотношений напряжения и деформации в материале и небольшого изменения геометрической формы, вызванного этой подвижкой. Такое поведение является устойчивым, так как небольшое изменение нагрузки вызывает только небольшое смещение.

Теперь рассмотрим случай, когда тот же склон сложен грунтами с характеристикой напряжение — деформация, соответствующей кривой *B* на фиг. 4.5. Когда в некоторой оползающей зоне такого грунта пиковая нагрузка достигает его прочности на сдвиг, опять-таки начинается смещение. Однако, как показывает кривая *B*, по мере приближения нагрузки к конечной величине в результате смещения *прочность* материала на *сдвиг* снижается. При большой степени неустойчивости, проявляющейся в таком грунте, его прочность на сдвиг может уменьшиться быстрее, чем нагрузка; в результате этого процесс скольжения будет развиваться дальше, и возрастающее смещение по поверхности срыва приведет к новому уменьшению прочности на сдвиг. Вследствие этого вся оползневая масса приходит в движение и может приобрести такую скорость, которая позволяет оползню пройти значительное расстояние.

В случае крайне хрупкого поведения, представленного на фиг. 4.5 кривой А, увеличение нагрузки до величины, соответствующей разрушению материала склона, приводит к полной потере прочности этого материала, оползневая масса отделяется от окружающих пород и может скользить с малым сопротивлением. Оползни, возникающие в таком материале, достигают высокой скорости и при благоприятном рельефе проходят большое расстояние. Скорости, показанные в табл. 4.1, прямо связаны с этими свойствами материала. Быстро развивающиеся обвалы и оползни возникают в породах хрупкого или неустойчивого поведения; срывы с умеренными скоростями, развивающиеся в течение нескольких минут или часов и имеющие обычно прогрессирующий характер, происходят в материалах с неустойчивым поведением; медленные оползни и участки склонов, находящиеся в состоянии ползучести, характерны для материалов с устойчивой зависимостью деформации от напряжения.

**Поровое давление.** Изменение порового давления играет весьма важную роль в развитии оползней, и этот вопрос требует отдельного обсуждения. Поровое давление возникает в водонасыщенной почве или скальной породе при любом изменении нагрузки или напряженного состояния материала. Если имеется естественный устойчивый склон, образованный водонасыщенным рыхлым грунтом, и к верхней части этого склона приложена нагрузка, например, сооружена насыпь для дорожного полотна, то в материале склона возникнет поровое давление, различное в разных частях склона. Сразу же после приложения нагрузки появляются силы, стремящиеся вызвать обрушение склона, но эффективные напряжения в грунте и, следовательно, прочность грунта на сдвиг остаются теми же, что и до нагрузки. Если нагрузка превышает сопротивление грунта, склон обрушится немедленно, но если нагрузка для мгновенного разрушения недостаточна, то избыточное поровое давление со временем рассеется и эффективные напряжения возрастут. Одновременно возрастет прочность грунта и, следовательно, повысится безопасность склона. Итак, при приложении нагрузки склон, находящийся в таких условиях, либо немедленно обрушится, либо — если выдержит эту нагрузку — останется безопасным.

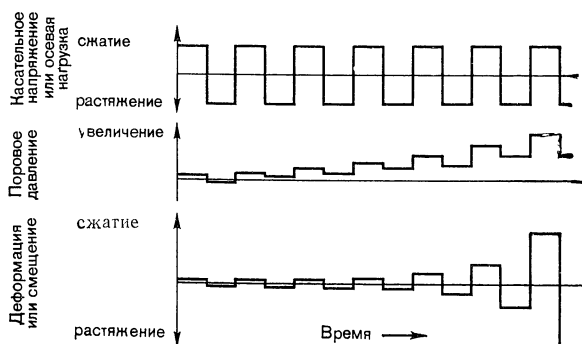
Теперь предположим, что нагрузка приложена не у вершины склона, а где-то посередине, на некотором расстоянии от края. Первоначально нагрузка не влияет на устойчивость склона, но все же создает поровое давление в ближайшей окрестности. Это поровое давление уменьшается в результате удаления воды на соседние свободные поверхности, в том числе и на поверхность склона. Таким образом, материал склона может испытать увеличение порового давления без изменения общей нагрузки

спустя некоторое время после приложения нагрузки. Если склон находился раньше на грани неустойчивости, то последующее уменьшение эффективных напряжений и прочности вызовет его обрушение. Опасен любой механизм, приводящий к повышению порового давления. Был случай, когда сваи для строившегося моста были забиты на некотором расстоянии от склона, и склон спустя некоторое время обрушился. Возрастание порового давления было связано не столько с тяжестью опор, сколько с тем, что они вызвали смятие подстилающего слоя глины. Эта глина относилась к категории *плавунных глин*, упомянутых в разделе 4.6.

Изменения порового давления могут происходить в почве и в породах и вследствие иных причин — внешних по отношению к рассматриваемому району. Склон, который при обычных условиях нагрузки и нормальном уровне грунтовых вод долгое время был устойчивым, может сделаться неустойчивым в результате изменения дренажных условий на окружающей площади. Такое изменение может быть следствием естественных сезонных колебаний уровня грунтовых вод, а может быть вызвано и деятельностью человека. Строительство и эксплуатация домов на вершинах холмов могут привести к изменению режима грунтовых вод в результате использования сточных ям вместо надлежащей системы дренажа и канализации, в результате полива садов и огородов и в результате изменения характера естественного стока и дренирования склонов из-за появления крыш и замощенных дорог. Нередки случаи обрушения застроенных склонов в Лос-Анджелесе, Калифорния. Во многих случаях, хотя это и трудно исследовать, обрушение было связано скорее всего с изменением количества воды на склонах, для которых нормальным было аридное (т. е. засушливое, безводное) состояние.

Существует и другой механизм повышения порового давления, а именно колебания грунта при землетрясениях. Если сухой зернистый или песчаный грунт подвергается повторяющейся нагрузке, то даже сравнительно плотный материал уменьшается в объеме по мере увеличения количества циклов нагрузки. Следовательно, если такой грунт поместить в установку, показанную на фиг. 4.3, б, воспрепятствовать удалению воды и вдоль оси образца приложить циклическую нагрузку, вызывающую его сжатие и растяжение, то поровое давление будет постепенно возрастать. Каждый цикл нагрузки приводит к приращению остаточного порового давления. Этот эффект иллюстрируется фрагментом записи такого испытания на фиг. 4.6. Верхняя диаграмма показывает переменное касательное напряжение, передаваемое на образец путем циклического приложения осевой нагрузки. Второй график показывает циклическое изменение порового давления и тенденцию его постепенного роста в процессе испытания. Поскольку во время испытания внешнее гидро-

статическое, или внутрикамерное, давление остается неизменным, постепенное возрастание порового давления означает, что эффективные напряжения в образце грунта уменьшаются. Вследствие этого величина осевого смещения, или деформации образца, показанная на нижней диаграмме фиг. 4.6, постепенно увеличивается вместе с ростом порового давления. В конце концов поровое давление становится очень близким к окружающему внешнему давлению, а эффективные напряжения почти исчезают. В этом случае говорят, что произошло *разжижение* образца, так как он имеет теперь свойства скорее плотной жидкости, чем твердого вещества: деформации, или смещения, при переменной нагрузке становятся очень большими.



Фиг. 4.6. Разжижение грунта при циклической нагрузке.

Когда происходит землетрясение, в грунте, находящемся у дневной поверхности, возникают переменные касательные напряжения — нечто похожее на то, что показано на фиг. 4.6, за исключением, конечно, того, что циклы не столь регулярны, а амплитуды имеют случайную величину. Поскольку продолжительность землетрясения сравнительно невелика, грунт, состоящий из достаточно мелких зерен и поэтому слабо проницаемый, не может за время колебаний освободиться от воды. В результате этого, как показано на фиг. 4.6, происходит повышение порового давления. Если колебания достаточно интенсивны или если их продолжительность велика для свойств данного грунта, происходит явление разжижения. Поскольку для этого требуется условие полного или почти полного отсутствия дренажа и поскольку грубозернистый песок и гравий бывают довольно плотными, такие грунты редко испытывают разжижение при землетрясениях. Этот эффект наблюдается обычно только в средне-и мелкозернистых песках, находящихся в довольно рыхлом или умеренно уплотненном состоянии. Если материал еще более тонкозернистый, чем мелкий песок или грубый ил, он обладает обычно каким-то сцеплением. Это препятствует разви-



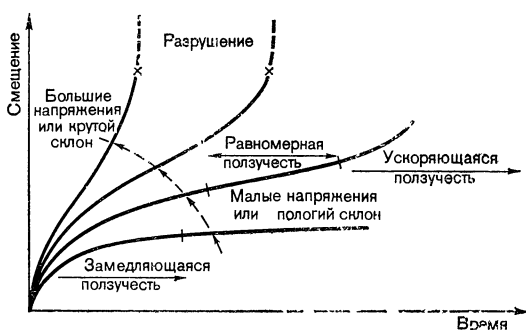
тию процесса разжижения, так как, хотя поровое давление может там в какой-то мере возрасти, сцепление зерен не позволяет им потерять контакта между собой; поэтому-то большинство видов глин и илистых глин не испытывают полной потери прочности на сдвиг, и в них не происходит разжижения.

Водонасыщенные мелкозернистые грунты распространены настолько широко, а сейсмические колебания захватывают такие большие площади, что явления разжижения сопровождаются, как показывают материалы детальных исследований (см. раздел 1.4), практически все землетрясения. При некоторых землетрясениях разжижение грунта было одной из главных причин ущерба и разрушений. Такие явления сыграли важную роль в развитии движений больших масс грунта на Аляске в 1964 г.; в Ниигата, Япония, тоже в 1964 г. они вызвали серьезные повреждения городских хозяйственных и инженерных сооружений, а также значительную осадку и смещение жилых домов. При землетрясении Сан-Фернандо (Калифорния) в 1971 г. разжижение плотины Сан-Фернандо вызвало оползень со стороны верхнего бьефа этой плотины. Обрушение и смещение других склонов и насыпей, отмеченные при этом землетрясении, также считаются результатом разжижения грунта.

**Ползучесть, приводящая к разрушению.** Все рыхлые и плотные горные породы под непрерывным действием касательных напряжений проявляют свойство вязкого течения, или *ползучести*. Поскольку такие напряжения характерны для склонов холмов, очень часто на склонах можно видеть деревья с искривленными стволами, причем вогнутая сторона смотрит вверх; это явление связано со сползанием почвенного слоя вниз по склону. Скорости или величины смещения в зависимости от глубины для таких медленно текущих материалов максимальны у поверхности и уменьшаются с глубиной. Поэтому деревья испытывают постоянный вынужденный наклон в направлении склона, но природное свойство деревьев расти вертикально заставляет их стволы искривляться. Если в материале, находящемся в состоянии ползучести, сохраняется устойчивое соотношение сила — смещение, показанное на фиг. 4.5, ползучесть проявляется сравнительно равномерно, если только смещение не приводит к изменению формы склона в направлении большей устойчивости.

С другой стороны, если поведение материала неустойчиво (фиг. 4.5), то на участке максимальных касательных напряжений и смещений (обычно у основания или у гребня склона) развиваются поверхности скола, и там прочность материала понижается до своей конечной величины. Эта зона становится затем чем-то вроде поверхности раздела или трещины в металле и вызывает увеличение касательных напряжений вблизи от нее.

Поэтому во всей этой области развиваются сколы, пока прочность материала не достигнет конечной величины; при этом в свою очередь повышаются напряжения в следующем блоке материала, выше по склону. Так происходит прогрессирующее развитие поверхности скола во всей потенциально неустойчивой области. Там, где эта поверхность уже образовалась, прочность материала имеет конечную, или остаточную, величину, а там, где материал еще не пересечен сколом, прочность имеет максимальную (пиковую) величину. Таким образом, при подходящих условиях вдоль потенциальной поверхности скольжения средняя прочность на сдвиг уменьшается до тех пор, пока она не станет ниже средней величины касательных напряжений, приложенных к оползневой массе. Когда это происходит, начинается общее движение материала, и он сползает вниз по склону.



Фиг. 4.7. Поведение грунта или склона при переходе от ползучести к разрушению в условиях возрастающей нагрузки. Каждая кривая отражает поведение материала при постоянном значении касательного напряжения; касательное напряжение возрастает в направлении от нижней кривой к верхней.

Такой тип поведения иллюстрируется графиком на фиг. 4.7, на котором показано смещение некоторой точки, например, на поверхности потенциальной оползневой массы как функция времени. Различные кривые показывают поведение материала при разных значениях касательных напряжений, вызываемых, например, возрастанием крутизны склона или приложением нагрузки. Если эта нагрузка достаточно мала, то после ее приложения скорость смещения возрастет, но затем движение будет замедляться, пока не прекратится полностью. Если к верхней части склона приложить большую нагрузку, то смещение сначала возрастает; затем обычно оно замедляется, и ползучесть становится равномерной: в это время, как это было показано раньше, развивается поверхность скола. В конце концов, когда эта поверхность достигнет некоторого критического значения, скорость смещения снова возрастет и произойдет полный отрыв. Приложение еще большей нагрузки уменьшает время, необходимое для разрушения.

Такое представление о механизме разрушения склона объясняет многие случаи, когда разрушение происходило спустя

многие годы после того, как к склону была приложена нагрузка: либо путем выемки грунта, либо путем его насыпания. В Англии известно несколько примеров, когда откосы железнодорожных выемок обрушивались через 60 или 70 лет после постройки дороги. При обследовании явлений такого рода и при изучении возможности возникновения оползня необходимо в большей мере учитывать остаточную, а не максимальную прочность материала на сдвиг. При использовании же данных о максимальной прочности можно прийти к ошибочному заключению о том, что потенциально опасный склон имеет необходимый коэффициент устойчивости.

**Тектонические движения.** Во многих местах мира, особенно у краев плит земной коры (фиг. 1.1), происходит воздымание или погружение поверхности. Кроме того, после крупных землетрясений реакция земной коры приводит к значительным поднятиям или опусканиям, захватывающим участки площадью в тысячи квадратных километров. В других районах изменение высот происходит, например, из-за продолжающегося выравнивания коры в результате снятия нагрузки льда после последнего оледенения. Наполнение крупного водохранилища (см. раздел 1.3) также может вызвать измеримые смещения на соседних площадях. Во всех этих случаях изменение высот приводит к увеличению или уменьшению крутизны склонов. На тех склонах, которые находились на грани неустойчивости, при увеличении крутизны в грунтах происходит нарастание касательных напряжений, что ведет к развитию оползней.

### 4.3. Анализ склона

Имеются два вида изучения оползней: обследование уже возникших оползней с анализом причин и механизма их развития и исследование конкретного искусственного или естественного склона, на котором предполагается строительство. В последнем случае целью работ является установление степени устойчивости склона при изменении условий.

При анализе условий образования оползня, действительного или потенциального, необходимо установить механизм разрушения и свойства вовлеченного в этот процесс материала. Обычно безопасность склона характеризуется *коэффициентом устойчивости*, который определяется как отношение суммы сил, обуславливающих сопротивление разрыву, к сумме сил, стремящихся вызвать разрыв. Силы сопротивления возникают в результате сопротивления грунта сдвиговым напряжениям вдоль потенциальной поверхности разрыва; действующие силы связаны, как

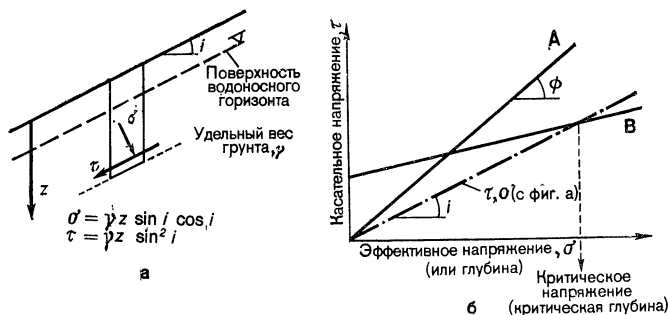
уже было сказано, с тяжестью оползающей массы, а также с теми или иными динамическими нагрузками, которые могут возникать, например, при землетрясениях.

Для каждого конкретного склона обычно исследуется возможность развития нескольких различных механизмов обрушения, и для каждого такого механизма рассчитывается коэффициент устойчивости. Тот случай, когда этот коэффициент оказывается наименьшим, считается наиболее благоприятным для обрушения, а действительная величина этого коэффициента указывает на степень надежности склона. Конечно же, если эта величина близка к единице, обрушение является вполне вероятным. В строительном деле допустимая величина коэффициента устойчивости зависит от стоимости самого строительства и от того, какие последствия вызовет обрушение склона. Обычно стремятся к тому, чтобы эта величина была около 1,5—2,0. Возможно, конечно (особенно в случае естественных склонов), что при исследовании не удастся установить, какие условия наиболее благоприятны для развития процесса обрушения. Например, при обычной практике бурения скважин и отбора проб грунта можно не обнаружить трещину или пласт, содержащие воду или материал с низким сопротивлением сдвигу; в этом случае действительно может произойти обрушение склона, считавшегося безопасным, даже еще до того, как нагрузка достигнет проектной величины. Единственно возможная мера предосторожности — особая тщательность при проведении полевых изысканий и расчетов.

В следующих разделах рассмотрен ряд наиболее распространенных механизмов обрушения.

**Бесконечный склон.** Легче всего представить себе такой механизм, где длина склона велика по сравнению с толщиной слоя потенциально неустойчивого материала. Длина склона должна быть велика и в том смысле, чтобы верх и низ склона были на достаточно большом расстоянии и не оказывали влияния на устойчивость поверхности склона. Такая обстановка возникает тогда, когда потенциально неустойчивый слой сравнительно тонок и лежит на гораздо более прочном материале. Это можно себе представить как почвенный слой, лежащий на наклонной поверхности коренных пород, или как сами эти коренные породы, в которых трещины отдельности и плоскости напластования идут параллельно поверхности склона.

Чтобы получить необходимые для анализа параметры, рассмотрим элементарный столб материала, слагающего такой склон. Эти параметры показаны на фиг. 4.8, а, где  $\sigma$  означает эффективное напряжение, действующее под прямым углом к потенциальной плоскости скольжения на глубине  $z$  от поверхности,



Фиг. 4.8. Напряжения и прочность материала для бесконечного склона.

а — напряжения в грунте на глубине  $z$  от поверхности склона; б — соотношение между напряжениями в глубине склона и прочностью материала

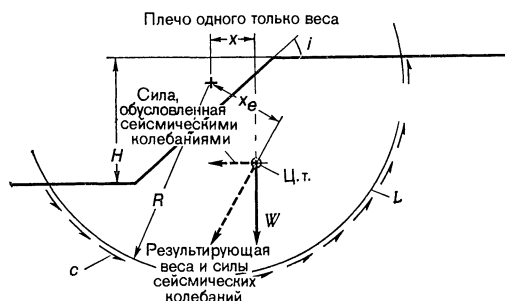
наклоненной на угол  $i$ ;  $\tau$  — касательное напряжение, направленное по той же плоскости. Это *действующие* напряжения. Иллюстрация относится к простому случаю, когда материал между дневной поверхностью и интересующим нас уровнем однороден. Если же имеются слои разного состава или различных свойств, то значение удельного веса  $\gamma$  в формулах на фиг. 4.8 должно быть получено соответствующим осреднением. Когда в результате просачивания воды через грунт под поверхностью оказывается водоносный горизонт, необходимо определить величину порового давления и вычесть ее из полного нормального напряжения  $\sigma$ , получив тем самым эффективное напряжение на потенциальной поверхности срыва.

Если напряжения  $\tau$  и  $\sigma$  изобразить на графике, показывающем их увеличение с глубиной (фиг. 4.8, б), то оказывается, что связывающая их функция имеет вид прямой, идущей к горизонтальной оси под тем же углом, что и поверхность склона. Чтобы установить, устойчив ли склон, надо нанести на фиг. 4.8, б зависимость величины прочности на сдвиг (которая обуславливает сопротивление развитию срыва) от нормального эффективного напряжения (фиг. 4.4) для образующего склон материала. Легко заметить, что если в грунте отсутствует сцепление (прямая А), то для устойчивости склона требуется лишь, чтобы угол внутреннего трения материала был больше, чем угол склона. Если, с другой стороны, грунт обладает сцеплением, так что его прочность изменяется в соответствии с линией В (фиг. 4.8, б), то возможно, что эта линия В при некоторой величине эффективного нормального напряжения пересечет линию касательного напряжения. Это соответствует определенной глубине от поверхности грунта. Ниже этой глубины касательные напряжения превышают прочность материала на сдвиг. Если склон образован слоем, толщина которого равна этой глубине или превышает

ет ее, то, как показывает такой анализ, на склоне произойдет оползень. Чтобы при угле  $i$  склон был устойчивым, толщина слоя материала, имеющего свойство  $B$ , должна быть меньше, чем эта критическая глубина. Если же угол внутреннего трения связного материала больше, чем угол склона, такой материал будет, конечно, устойчивым на всех глубинах.

Эти соображения применимы и к снежным склонам; мы вернемся к ним позднее, в гл. 6.

**Конечные склоны.** Чаше бывает так, что склон имеет ограниченные размеры, т. е. толщина слоя материала, могущего обрушиться, сравнима с протяженностью склона. В этом случае образование плоской поверхности срыва по-прежнему возможно, но она не будет параллельна поверхности склона. Необходимо поэтому рассмотреть образование более сложных поверхностей.



Фиг. 49. Расчет устойчивости склона в предположении дугообразной поверхности срыва.

Момент сил сопротивления  $= cLR$ ; момент действующих сил  $= Wx_e$ ; коэффициент устойчивости  $= (cLR) / (Wx_e)$ . Ц. т. — центр тяжести,  $x_e$  — плечо результирующей веса и силы сейсмических колебаний,  $H$  — высота склона;  $W$  — вес;  $c$  — сопротивление сдвигу,  $L$  — длина дуги окружности.

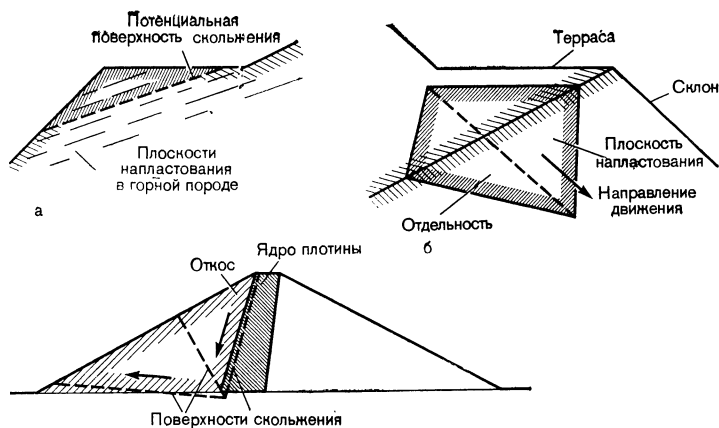
Наиболее часто поверхность срыва изображают на разрезе в виде дуги окружности (фиг. 4.9). Рассмотрим простейший случай: склон с высотой  $H$  и углом  $i$  создается в однородной глине и достаточно быстро, так что при выемке грунта не происходит рассеяния порового давления. При этих условиях можно допустить, что вдоль рассматриваемой дуги окружности прочность материала на сдвиг остается приблизительно такой же, как и до создания склона.

Выбирается дуга окружности с некоторым центром и радиусом  $R$ , измеряется или вычисляется длина этой дуги  $L$  и рассчитывается вес потенциального оползня в области, ограниченной этой дугой. Устанавливается также положение центра тяжести (ц. т.). Исходя из этих величин и прочности грунта, можно рассчитать, как это показано на фиг. 4.9, коэффициент устойчивости для этой круговой поверхности. Однако вовсе не обязательно, что срыв произойдет именно по этой поверхности, поэтому надо брать другие круговые поверхности и проводить для них все необходимые расчеты. Срыв произойдет, вероятнее

всего, по той дуге, у которой будет наименьший коэффициент устойчивости.

На практике, конечно, такие простые задачи встречаются редко: свойства грунта обычно меняются с глубиной, присутствует поровое давление, устойчивость склона приходится оценивать как для условий, когда отток воды возможен, так и для условий, когда дренаж затруднен. При таких обстоятельствах обычно используют прием разбивания склона на ряд вертикальных пластин. Рассчитывается вес каждой такой пластины и его составляющие, действующие нормально и тангенциально к плоскости скола в основании этой пластины. Вычитая из силы, действующей нормально через поверхность скола, силу, обусловленную поровым давлением, получают эффективную составляющую, от которой зависит прочность материала на сдвиг. Силы, стремящиеся вызвать сдвиг, и силы сопротивления сдвигу суммируются затем для всех пластин, после чего для выбранного круга вычисляется коэффициент устойчивости. Обычно для достижения достаточной точности расчета хватает 6 или 7 пластин. Опять-таки, чтобы прийти к выводу о наиболее вероятном положении линии разрыва, надо провести расчеты для нескольких таких кругов. Существуют различные методы, дающие возможность выбрать наиболее вероятные круги; эти методы подробно описаны в книгах, перечисленных в списке литературы к этой главе.

В тех случаях, когда свойства материала распределены более сложным образом, можно представить себе поверхности отрыва более сложной формы, и для расчета коэффициента устойчивости можно использовать так называемый *метод плоскостей скольжения*. Например, если для материала характерна ярко выраженная горизонтальная слоистость, то едва ли поверхность отрыва будет рассекают слон, как это показано на фиг. 4.9; вместо этого поверхность отрыва пройдет, вероятно, какое-то расстояние вдоль горизонтальной плоскости скола и выйдет на дневную поверхность через более крутые части склона по обе стороны возвышенности. Поверхности отрыва часто бывают приурочены также к системе трещин отдельности в горных породах, поэтому необходимо определить тот вид обрушения, который наиболее вероятен при данной ориентировке трещин. На фиг. 4.10, *а* показан простой пример плоскости отрыва в трещиноватой породе со слоистостью более пологой, чем наклон дневной поверхности. Конечно, во многих случаях ориентировка трещин отдельности бывает такова, что поверхность отрыва должна состоять из отдельных граней и ее можно изобразить только на трехмерной схеме (фиг. 4.10, *б*); разработаны методы анализа, позволяющие провести расчеты и для такой обстановки.



Фиг. 4.10. Механизмы обрушения.

*а* — обрушение вдоль плоскости напластования; *б* — трехмерная картина обрушения вдоль плоскостей напластования и отдельности; *в* — обрушение по наклонной поверхности укатанного ядра земляной плотины

Технология строительства земляных дамб заключается в использовании сравнительно грубозернистого материала для сооружения откосов, поддерживающих водонепроницаемое центральное ядро плотины, которое, как показано на фиг. 4.10, *в*, бывает и наклонным. Ядро делается из тонкозернистого глинистого материала, который обычно слабее, чем грунт поддерживающего откоса. В этом случае обрушение, если оно случится, произойдет, вероятнее всего, по некоторой плоскости скола, пересекающей ядро плотины, но для этого должен возникнуть особый механизм — такой же, как показан на фиг. 4.10, *в*. Оползающая масса может разбиться на два блока, один из которых будет двигаться наружу по более или менее горизонтальной поверхности скола, лежащей, возможно, в породах, на которых построена плотина, а другой блок будет двигаться вниз по плоскости отрыва, проходящей через ядро. Эти два блока разделяются плоскостью, по которой происходит скольжение одного блока относительно другого.

**Учет сейсмических колебаний.** В рассмотренных до сих пор методах анализа учитывались только вертикальные силы, обусловленные силой тяжести. Когда происходит землетрясение, то, как показано в гл. 1, возникают горизонтальные и вертикальные ускорения динамического характера. Эти ускорения, получаемые массой грунта, изменяют сумму сил, стремящихся вызвать обрушение склона; при этом на прочность грунта может



повлиять, например, высокое поровое давление, появляющееся при сейсмических колебаниях.

В первом приближении анализ можно провести, не принимая во внимание динамический характер землетрясения и динамическую природу реакции на него со стороны грунтов. При таком подходе эффект землетрясения выражается *эквивалентной статической силой*, которая обусловлена ускорениями, возникающими при землетрясении, и складывается с весом потенциального оползня. Эквивалентная статическая сила может быть разложена на горизонтальную и вертикальную составляющие. Очень часто при таком анализе вертикальной составляющей сейсмических ускорений пренебрегают. Если пиковое латеральное ускорение при землетрясении выразить некоторой долей, например 0,1 или 0,2 ускорения силы тяжести (это соотношение называется *статическим сейсмическим коэффициентом*), то силу, обусловленную сейсмическими колебаниями, можно представить на диаграмме типа фиг. 4.9 горизонтальным вектором, выходящим из центра тяжести оползневой массы в наименее благоприятном направлении, т. е. в сторону склона. Величина этой силы определяется путем умножения веса потенциального оползня на сейсмический коэффициент. Геометрическая сумма двух составляющих сил, вертикальной и горизонтальной, представляет собой результирующую силу, направленную под некоторым углом к вектору веса, как это показано на фиг. 4.9. Для определенного предполагаемого эффекта землетрясения можно рассчитать величину этой результирующей силы и измерить или вычислить плечо рычага этой силы (обозначено на фигуре как  $x_c$ ). После этого можно рассчитать коэффициент устойчивости склона при ускорениях, которые должны возникнуть во время предполагаемого землетрясения. На фиг. 4.9 видно, что землетрясение, несомненно, понижает устойчивость рассматриваемого склона.

Этот метод анализа, не учитывающий динамического характера явлений, возникающих при землетрясениях, можно использовать только для сравнительно небольших склонов и для земляных плотин с высотой, как правило, менее 30 м. Для более крупных сооружений необходимы более сложные методы анализа. Часто применяется так называемый *анализ конечных элементов*; этот метод требует уже использования больших цифровых вычислительных машин. С его помощью можно рассчитать динамические напряжения, стремящиеся вызвать обрушение насыпного грунта или скальных пород, а также как-то оценить воздействие этих динамически меняющихся напряжений на свойства грунтов (описание метода см. в работах, указанных в списке литературы).

#### 4.4. Изучение опасности оползней на участках строительства

Как правило, изучение естественных склонов не проводится до тех пор, пока там не намечается какое-либо строительство; в этом случае частью такого изучения является выяснение того, как проектируемое сооружение изменит природный режим склона. Возможно, в склоне будет сделана выемка или на него будет насыпан грунт, чтобы провести шоссе или создать насыпную площадку для поддержки какого-нибудь здания, или же в склоне будет устроена дренажная система, предназначенная для отвода воды от этой площади. Необходимо определить, как изменение условий повлияет на устойчивость склона.

Первым шагом такого исследования обычно бывает анализ аэрофотоснимков района; это вполне понятно, так как по таким снимкам можно найти наилучшее направление проектируемой дороги и дать указания о размещении других сооружений еще до начала каких-либо работ на местности. Геолог или горный инженер, умеющий дешифровать аэрофотоснимки, легко обнаружит на них множество старых оползней. Во многих частях земного шара оползни распространены гораздо шире, чем это обычно предполагают, и полностью миновать оползневые районы трудно, особенно при постройке таких протяженных сооружений, как шоссе, трубопроводы и кабели. Иногда на аэрофотоснимке оползень виден отчетливо, особенно если он возник недавно: стенка отрыва в тылу оползневой массы и перемятая, покоробленная выпиранием земля в основании оползня сразу же бросаются в глаза (см. фото 4.4). Хотя оползни, образовавшиеся много лет назад, обычно значительно изменены эрозией, и их поэтому обнаружить несколько труднее, все же для них характерен сильно изрезанный рельеф, образованный движением оползневых масс по неправильным поверхностям скольжения. В засушливых районах дневная поверхность отражает характер трещиноватости геологических образований, и это тоже может помочь при оценке опасности оползней.

Когда для строительства выбран участок, обычно на нем предпринимается исследование, включающее в себя предварительное геологическое описание свойств горных пород участка, установление ориентировки и распределения плоскостей напластования, трещин и разрывов. Изучается также гидрогеология района для выяснения положения зеркала грунтовых вод, количество просачивающейся с поверхности воды и характер естественного дренажа участка. Потенциально опасные особенности геологической обстановки, такие, как параллельное склону расположение плоскостей напластования, просачивание в глу-

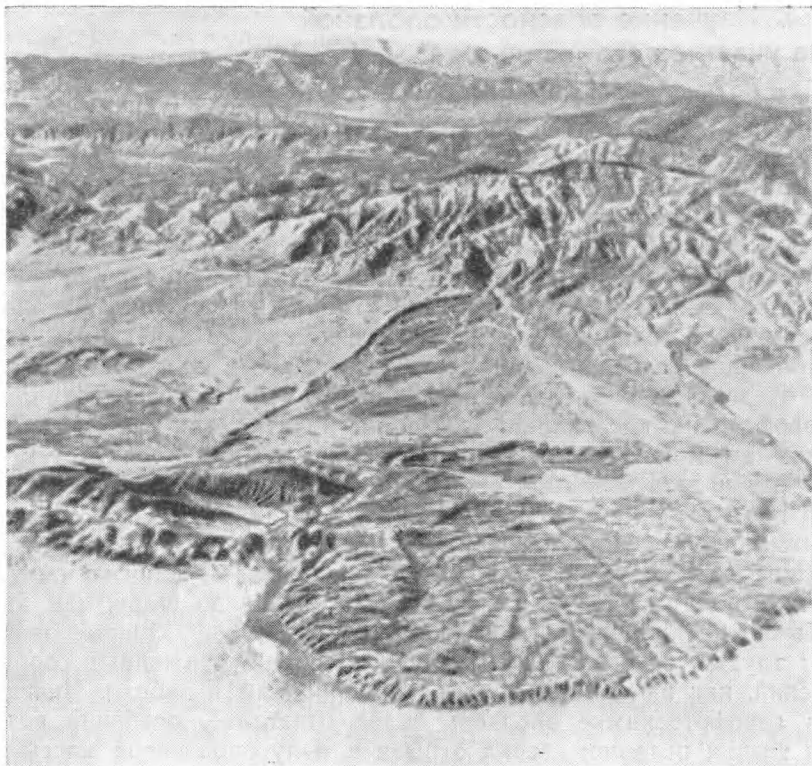


Фото 4.4. Оползень Блэк-Хок в пустыне Мохаве, Калифорния.  
Из диссертации Р. Л. Шрива. Калифорнийский технологический институт.

бине склона, на его поверхности или у его подошвы, изучаются особенно детально. Геологическое изучение должно включать оценку механических свойств породы в той мере, в какой эти свойства зависят от присутствия тонких прослоев мелкозернистого материала (глин или глинистых сланцев), так как оползни обычно развиваются именно по таким зонам пониженной прочности в породах основания. Отмечаются также все оползни, образовавшиеся на подобных склонах или в подобных породах на площадях, смежных с участком строительства.

Следующая стадия исследований на участке будущего строительства — детальное изучение разреза почвенного слоя и коренных пород посредством бурения и отбора образцов грунта для лабораторных испытаний. Определяются также уровень зеркала подземных вод, если они здесь имеются, и прочность на

сдвиг различных грунтов, слагающих участок. Как правило, выполняются оба вида описанных ранее испытаний грунтов на сдвиг: при возможности дренажа и без оттока воды. После этого производится анализ устойчивости проектируемого сооружения с учетом формы склона и установленных характеристик материала. Постулируется возможность образования ряда поверхностей скольжения, и для каждой такой потенциальной поверхности вычисляется коэффициент устойчивости склона. Тот механизм обрушения, для которого коэффициент устойчивости оказывается наименьшим, используется для оценки риска. Обычно считается, что для уверенности в том, что склон в будущем останется устойчивым, необходимо, чтобы при условиях, которые создадутся после завершения строительства, минимальное значение коэффициента устойчивости было бы 1,5 или больше.

При планировании строительства в сейсмичных областях вначале обычно выполняется расчет статической устойчивости; для дальнейшего анализа используется латеральный сейсмический коэффициент, оцениваемый на основе ускорений, которые, как считается, могут возникнуть на данном участке за время эксплуатации сооружения (см. раздел 1.5). После этого определяется новый коэффициент устойчивости. Поскольку возможность обрушения склона во время землетрясения находится в зависимости от вероятности возникновения самого землетрясения, принято для вычислений, учитывающих сейсмические колебания, брать меньшее значение коэффициента устойчивости. Часто указывается, что приемлемый коэффициент устойчивости для предполагаемого расчетного землетрясения должен быть не менее 1,1 или 1,2, но, во всяком случае, важно, чтобы во время землетрясения этот коэффициент не стал меньше единицы.

Приемлемая величина коэффициента устойчивости для каждого конкретного участка, выбранного для строительства, зависит от стоимости, размера и важности проектируемого сооружения, а также от последствий его обрушения. Для сооружения, ремонт которого не потребует больших затрат, или для такого, разрушение которого не будет угрожать жизни людей, приемлемым будет коэффициент устойчивости, меньший, чем для важного сооружения, обрушение которого может сопровождаться человеческими жертвами.

При оценке эквивалентного сейсмического латерального ускорения, привлекаемого для расчетов, берут такое землетрясение или такие землетрясения, которые могут вызвать на выбранном участке сильнейшие движения грунта (см. раздел 1.5).

Если сооружение представляет такую важность, что необходим детальный динамический анализ устойчивости склона и

реакции участка, то надо построить акселерограммы, по которым можно было бы изучить предполагаемые движения грунта на данном участке при расчетном землетрясении. Эти данные об ускорениях используются затем в расчетах (выполняемых с помощью ЭВМ) поведения грунта и будущего сооружения. Чаще всего необходимо использовать несколько таких акселерограмм, так как предполагается, что ускорения имеют статистический характер.

#### **4.5. Обнаружение оползневой опасности и воздействие на развитие оползней**

Образованию многих, если не всех, оползней предшествует период ползучести, которая постепенно нарастает вплоть до возникновения разрыва. При одних условиях крип может продолжаться годами и уж потом происходит кульминация; при других — период ползучести длится всего несколько секунд. Однако многие оползни можно было бы обнаружить заблаговременно, если бы на склонах были установлены соответствующие приборы и регулярно снимались их показания. Только в некоторых случаях это было действительно выполнено — иногда для того, чтобы иметь данные об опасных процессах на склоне, коэффициент устойчивости которого был сознательно понижен во время строительства. В таких условиях имеется в виду, что, когда строительство закончится, устойчивость склона восстановится. При отсутствии измерений в большинстве случаев обрушение склона происходит внезапно, за исключением редких примеров в населенных районах, когда местные жители замечали новые трещины на полу в гаражах, на подъездных дорожках, на тротуарах и в стенах домов. Иногда движение склонов проявляется трещинами и разрывами подземных коммуникаций еще до начала общего разрушения. К тому времени, когда обнаруживаются эти явления, обычно уже поздно воздействовать на развитие оползня.

Возможны два вида измерений: наблюдение за перемещением точек, отмеченных на поверхности склона, и измерение наклона труб, пересекающих рыхлые и скальные грунты, считающиеся оползающими. Первый способ требует детальных регулярных геодезических измерений, если необходимо выделить мельчайшие движения почвы, или же для этого используют проволоку, которой соединяют отдельные точки потенциальной оползневой зоны с устройствами непрерывной регистрации, установленными на стабильных участках. Второй способ заключается в том, что в скважины, пробуренные для полевых исследований, помещают специальные пластмассовые трубы.

Периодически в этих трубах производятся инклинометрические наблюдения. Если данный участок склона сползает вниз, то это отразится в наклоне труб. Интегрируя наклон по высоте от основания трубы (или по глубине от ее верхнего конца), получают величину смещения разных слоев изучаемого участка склона. Положение верхнего конца трубы определяется с помощью измерений на поверхности.

Даже если проводятся такие наблюдения, все равно бывает нелегко установить, на какой стадии может произойти ускорение движения сползающей массы до опасного уровня. Склоны, окружающие водохранилище Вайонт (в Италии), наполнение которого закончилось около 1960 г., считались неустойчивыми уже за некоторое время до развития катастрофических оползней, и на поверхности этих склонов регулярно определялось положение опорных точек. Эти измерения показывали, что склон движется, но конечное обрушение предсказано не было (см. раздел 4.6). В 1969 г. в Японии во время опыта по насыщению склона водой, проводившегося с целью изучения механизма его обрушения, произошел оползень, при котором погибло несколько человек, участвовавших в исследовании.

Когда движение склона уже обнаружено, а анализ показал, что данному участку угрожает оползень, можно предпринять ряд мер для его предупреждения или для воздействия на его развитие. Когда опасность затрагивает небольшой объем пород, то с помощью землеройной техники можно очень быстро ослабить нагрузку на вершину склона или добавить грунт в его основание и тем самым остановить движение (хотя иногда вес и вибрации самой этой техники тоже могут создать опасность обрушения). Выбор мер воздействия зависит от наличия соответствующего оборудования и материалов, от топографии участка, его доступности, от наличия места, на котором можно было бы развернуть работы по укреплению склона.

Если подозревается присутствие порового давления, возникшего в результате подъема зеркала грунтовых вод или затекания воды в трещины, то это давление можно понизить непосредственным образом, пробуравив дренажные скважины. Это не всегда приводит к должному эффекту из-за низкой водопроницаемости многих грунтов, имеющих малую прочность на сдвиг. В таких условиях иногда приносит успех метод *электроосмотического укрепления* грунтов, когда в нужных по отношению к участку возможного оползания местах в грунт забиваются электроды, между которыми создается необходимая разность потенциалов. Под действием этой разности потенциалов вода стремится течь от анода к катоду, и тем самым осуществляется дренаж грунта. Этот метод оказывает на грунт и другое стабилизирующее действие, создавая градиент порового давления.

Метод применяется для временного укрепления грунта при сооружении в нем крутых стен путем землеройных работ, если в дальнейшем выемка будет снова заполнена.

Если предполагается, что высокое поровое давление в тонкозернистом материале вызвано движением грунта, используется еще один метод укрепления склона — бурение горизонтальных скважин через тонкозернистый слой. Поровое давление понижается посредством высушивания грунта нагнетанием в скважины горячего воздуха. Высушивание повышает прочность грунта на сдвиг.

Когда сооружаются искусственные склоны, то городские и местные власти требуют выполнения определенных правил строительства. Крутизна насыпных склонов может быть ограничена, например, соотношением вертикального и горизонтального размеров 1 : 1,5, и необходимо строго следить за тем, чтобы в результате уплотнения удельный вес грунта достиг определенной минимальной величины и тем самым грунт приобрел бы необходимую прочность на сдвиг. Строго контролируется обычно и слив воды на такой склон, и его дренаж. Там, где искусственные откосы затрагивают склоновые отложения, необходимо учитывать соотношение угла откоса с углом падения пластов; некоторые правила городского строительства указывают, какие минимальные значения прочности и других свойств грунта следует использовать для анализа устойчивости склонов.

## 4.6. Описания некоторых оползней

**Усой, Памир, 1911 г.** Самый крупный в XX в. оползень произошел у селения Усой в горах Памира в 1911 г. Этот оползень имеет интересную историю. Одновременно с оползнем было отмечено землетрясение, но в результате отдаленности и редкой населенности этого района правительство России получило известие о землетрясении только через две недели после него, а сведения об оползне поступили спустя еще два месяца. В течение двух с половиной лет район оползня не обследовался, и только в 1913 г. его посетили и описали участники одной военной экспедиции. В то время происхождение землетрясений было еще предметом дискуссий между сейсмологами, и когда появились сведения о землетрясении и об оползне, некоторые сейсмологи сделали вывод, что эти явления были одновременными и что именно срыв оползня вызвал удар, от которого распространились волны, записанные как землетрясение. Точное время обоих этих событий было, конечно, неизвестно.

Князь Б. Б. Голицын, один из первых сейсмологов-экспериментаторов, произвел расчет выделившейся при землетрясении

энергии, опираясь на сейсмограммы, полученные в Пулковской обсерватории. Он вычислял амплитуду упругих волн, возникающих в земной коре, в зависимости от энергии, выделяющейся в очаге землетрясения. Сопоставив результаты своих расчетов с величиной смещения, отмеченного в Пулкове, он смог оценить энергию, выделившуюся в очаге землетрясения 1911 г., и сделал вывод, что эта энергия была так велика, что первичным было, очевидно, землетрясение, а не оползень. Исторический интерес представляет как само событие, так и произведенный расчет, так как Голицын был первым, кто пытался выполнить анализ такого рода. Его работа широко обсуждалась в сейсмологической литературе и в конце концов привела к созданию методики определения по записям приборов магнитуды землетрясения и энергии, выделившейся в его очаге. Последующие расчеты показали, однако, что величина энергии, полученная Голицыным, занижена примерно в 100 раз.

Позднее, в 1915 г., для исследования оползня была организована сейсмологическая экспедиция; она привезла отчет, в котором были приведены материалы о размерах и объеме этого оползня. Объем был оценен в 2,5 млрд. м<sup>3</sup>, т. е. 2,5 км<sup>3</sup>. Экспедиция провела съемку района оползня достаточно детально, так что было установлено первоначальное и конечное положение оползневой массы. Таким образом, можно было лучше оценить энергию, высвободившуюся при развитии оползня, хотя коэффициент ее превращения в упругие волны был, вероятно, невелик. Энергия этого оползня, хотя и очень большая, была существенно меньше, чем энергия, выделившаяся при землетрясении. Этот памирский оползень, состоявший из глины и раздробленной скальной породы, накрыл селение Усой с его 54 жителями, завалил долину и запрудил реку Мургаб, в результате чего образовалось большое озеро. Уровень озера поднимался, и в конце концов было затоплено еще одно селение — Сарез. Формирование нового, Сарезского, озера завершилось, когда вода прорезала в оползневой массе новое русло и приток воды сравнялся со стоком. Как сообщила первая военная экспедиция, высота оползневой плотины была 301 м, максимальная глубина озера 284 м, а его длина 53 км. Для сравнения: проектная высота искусственной земляной плотины Нурекской ГЭС в СССР — 310 м, а объем этой плотины 58 млн. м<sup>3</sup>.

Хотя авторы не имеют никаких данных о свойствах материала этого оползня, представляется, что оползень произошел в хрупких коренных породах на склоне, находившемся на грани неустойчивости. Сейсмические колебания послужили толчком, который привел эту массу в движение. Поскольку оползень произошел, по всей видимости, в скальных породах, едва ли возникновение порового давления при землетрясении было здесь



важным фактором. Магнитуда землетрясения (по Рихтеру) оценивается величиной около 7,0<sup>1</sup>. Явления, подобные памирскому оползнию, часто сопровождают землетрясения, но, к счастью, они редко бывают такого масштаба. Такого же типа оползень возник в каньоне реки Мадисон (штат Монтана) во время землетрясения в августе 1959 г. Этот оползень, объемом около 27 млн. м<sup>3</sup>, также запрудил долину и создал позади себя озеро. Оползень спустился на туристский лагерь, при этом погибло примерно 26 человек. Это произошло в изгибе каньона, где крутизна бортов, пропиленных рекой Мадисон, доходит до 45°. Борта каньона сложены сильно трещиноватыми и измененными метаморфическими породами.

Ввиду того что подъем уровня озера угрожал другим постройкам, подразделение инженерных войск ускоренным темпом проложило через оползневую массу канал, чтобы дать возможность воде вытекать из озера и тем самым предотвратить дальнейший ущерб. Канал удалось прорыть вовремя, и это позволило управлять спуском озера. В обоих описанных случаях, на Памире и в Монтане, оползень оказался в У-образной долине и загородил ее, остановившись в виде цельного блока. Расстояние, пройденное этими массами глины и камня, было невелико. В других местах отмечены оползни иного типа, имевшие такой же спусковой механизм; они описаны ниже.

**Оползень Шерман-Глейшер, Аляска, март 1964 г.** Великое землетрясение на Аляске в марте 1964 г. (см. раздел 1.1) вызвало развитие ряда оползней, два из которых описываются в этой главе. Первый из них — оползень Шерман-Глейшер, показанный на фото 4.5. На расстоянии приблизительно 140 км от эпицентра расположен район, для которого характерны высокие горы и заполненные ледниками долины. Одна из этих гор, называемая теперь Шеттер-Пик [shatter — дробить, разбивать. — *Перев.*], испытала такие сильные сотрясения, что часть ее, находившаяся у гребня, оторвалась. Скатываясь вниз по склону горы, обвалившийся блок разбился на куски, и вся масса приобрела высокую скорость. В данном случае на пути материала не было узкого каньона, в котором материал остановился бы у подножия горы; вместо этого вдоль долины протягивался на несколько километров ледник. Оползень сошел на этот ледник и пересек его, при этом материал распространился на большую площадь, образовав в конце концов плоский веерообразный слой размерами в несколько километров и толщиной всего несколько метров. Объем оползневой массы составил около 23 млн. м<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> По уточненным данным  $M = 7,6$ . — *Прим. ред.*



Фото 4.5. Оползень Шерман-Глейшер Аляска.

Этот оползень имеет ряд интересных особенностей. Две из них — это продольные линии течения материала и его гребневидные скопления на краях у границы устойчивого массива. Вдоль оси оползня не отмечается сортировки обломочного материала по размеру в зависимости от расстояния. Наклон

поверхности ледника в направлении наибольшего распространения оползневой массы составляет всего несколько градусов. Вследствие всего этого возникает вопрос: как могла несвязная масса глины и скальных обломков преодолеть такое расстояние?

Предложен следующий механизм: при своем падении раздробленный оползневый материал натякался на хребтик, проходящий в поперечном направлении через подножие горы и возвышающийся над уровнем ледника. Обломки породы подбрасывались у этого хребтика в воздух и образовывали сравнительно плоское «облако», которое и ложилось на покрытую снегом поверхность ледника. Выдвинута гипотеза, что воздух не смог быстро выйти из-под этой массы обломков, и возникла *воздушная подушка*, на которой оползневый материал свободно скользил по поверхности ледника. У краев этого потока воздух мог выходить наружу, поэтому скольжение по периферии замедлялось и материал оседал на поверхности ледника. Это способствовало лучшему удержанию воздуха под движущейся массой, и этим же можно объяснить образование гряд вдоль краев оползня. В конце концов поступление материала со склона горы прекратилось, воздух вышел из-под движущейся массы, и материал лег на поверхность ледника. По-видимому, на заключительных стадиях движение было сравнительно спокойным, так как несколько крупных глыб породы хотя и оказались в конечном положении разбитыми на куски, но эти куски лежат на поверхности скольжения близко друг к другу. Пока проведен только качественный анализ этого механизма. Учитывая сложные условия, трудно дать количественные оценки свойств материала, скорости, воздушного давления и толщины воздушной подушки.

Механизм воздушной подушки предполагается также для оползня Блэк-Хок в пустыне Мохаве (южная Калифорния), который возник, как полагают, много тысяч лет назад. Объем кристаллических известняков, захваченных этим оползнем, был около 320 млн. м<sup>3</sup>; оползень прошел расстояние 8 км по аллювиальному днищу пустыни, имеющему средний наклон 2,5° (фото 4.4). Без привлечения гипотезы о легком скольжении, поддерживаемом давлением воздуха, здесь еще труднее понять, как мог оползневый материал распространиться так далеко по такому пологому склону. Этот оползень перекрывает другой, еще более древний слой, который имеет такую же топографию и интерпретируется как более ранний оползень.

На обратной стороне Луны известно небольшое понижение, названное именем Циолковского, которое со всех сторон окружено горами. За одним из участков кольцевой горной стены обнаружено крупное образование в форме оползня, которое

показывает все характерные особенности оползней Шерман-Глейшер и Блэк-Хок, за исключением масштаба: размеры лунного «оползня» составляют около 100 км, а его объем — если его толщина находится в таком же соотношении с размерами по латерали, как в оползнях Шерман-Глейшер или Блэк-Хок, — оценивается величиной 3000 км<sup>3</sup>.

В этом случае, конечно, нет данных ни о свойствах материала, ни о явлениях, вызвавших этот оползень, если это действительно оползень. Очевидно, он не связан с образованием самого этого моря, так как оползень должен быть моложе, чем горы, из материала которых он возник. Сама оползневая масса существенно моложе равнины, на которой она лежит, что видно из сравнения количества кратеров на оползне и на соседней лунной поверхности. Расстояние, пройденное оползневой массой, можно связать с низкой величиной силы тяжести на Луне (примерно в шесть раз меньше, чем на Земле). Отсутствие на Луне воздуха затрудняет использование идеи о воздушной «смазке».

Если предположить, что механические свойства земных и лунных пород одинаковы, то, по соображениям подобия, этот лунный оползень эквивалентен такому же образованию на Земле вшестеро меньшего размера. Объем надо было бы уменьшить примерно в 216 раз. Таким образом, это лунное явление (уменьшенный объем будет около 15 км<sup>3</sup>) оказывается сравнимым с оползнем 1911 года, происшедшим на Памире, и с оползнем Саидмарре в Иране (описан ниже), хотя, даже и при таком уменьшении масштаба, это все-таки чрезвычайно крупное образование.

Оползень Шерман-Глейшер и предполагаемые оползни Блэк-Хок и в кратере Циолковский произошли в ненаселенных местах и поэтому не вызвали гибели людей или ущерба для их имущества. Совсем не так было в случае следующего описанного здесь оползня.

**Юнгай, Перу, май 1970 г.** Как показано в разделе 1.4, землетрясение, происшедшее в мае 1970 г. в Перу, вызвало обвал льда, снега и скальных пород с горы Уаскаран в Андах, и эта смесь, пройдя небольшое расстояние, превратилась в громадную массу водонасыщенного обломочного материала. Оползень достигал скорости около 150—200 км/ч, прошел долину и накрыл город Юнгай и часть города Ранраирка.

Этот оползень почти в точности повторил оползень, возникший в январе 1962 г. на склонах той же горы (см. раздел 6.3) без всякого землетрясения. Оба явления можно равно считать и лавинами, и оползнями, так как они начинались как ледяные или снежные лавины, которые соскабливали и выбивали горные породы, рыхлые и скальные, попадавшие на их пути.

В этом случае большая скорость оползня едва ли была связана с каким-то механизмом смазки. Скорее именно с процессом перемешивания на ранних стадиях развития оползня связано то, что вся масса приобрела характер вязкой жидкости, а высокая скорость ее движения была обусловлена крутизной склонов.

**Гора Тертл, Альберта; Эльм, Швейцария.** В 1881 г. в горах Эльм, Швейцария, и в 1903 г. в канадской провинции Альберта произошли два обвала, не связанные с землетрясениями, которые оказались бедственными для жителей, чьи дома находились на пути обвалившейся каменной массы. В Эльме обвальная масса залегала на круто наклоненных слоях горных пород, в которых быстро образовалась трещина отрыва. Скала была подрезана при карьерной разработке кровельных сланцев, и в сентябре 1881 г. над карьером произошли один за другим два обвала; обвалившийся материал растекся по дну долины. При втором оползне было убито около 20 человек. Между стенками отрыва этих двух обвалов осталась еще большая масса незакрепленного материала, и через несколько минут она также обрушилась в виде оползня, который превратился в быстрый поток, сопровождавшийся сильной воздушной волной. Каменная масса пересекла днище долины и поднялась по противоположному ее борту на высоту до 100 м.

Над городом Франк (на юго-западе провинции Альберта) господствует гора Тертл, сложенная массивными пластами известняков, залегающих на менее прочных глинистых сланцах и песчаниках, в которых разрабатывались угольные залежи. Хотя пласты известняков падают не в сторону долины, где находится город, в них возникли трещины отдельности и отрыва с углом падения около  $40^\circ$  параллельно крутому склону горы. В 1903 г. по трещинам отдельности произошел оползень коренных известняковых пород; сорвавшись с высоты почти 1000 м, горная масса быстро приобрела большую скорость и прошла 4 км поперек долины, при этом погибло 70 человек. Обвал возник на южной вершине горы Тертл. В одном из исследований (1937 г.), посвященных этому срыву, указывалось, что условия, существовавшее в то время у южной вершины, почти точно повторяются на северном гребне этой же горы, из чего делался вывод, что с северного гребня может сойти в любое время еще один оползень. До сих пор, однако, этого не произошло.

Многие особенности оползня Шерман-Глейшер характерны для явлений, происшедших в Эльме и на горе Тертл, но для последних предложен иной механизм течения: предполагается, что падающие обломки захватили некоторый объем воздуха и движение оползня стало похоже на движение разжиженного грунта, как в случае оползня Аберван, описанного ниже. В абер-

ванском оползне текучей фазой была вода, здесь же флюидом был воздух.

В горных областях было много подобных оползней и обвалов; одно из самых крупных таких явлений за последние столетия — оползень Росберг, или Гольдау, возникший в 1806 г. в Швейцарии. Вероятно, в результате повышения порового давления воды в наклонных водопроницаемых слоях песчаников и конгломератов после особенно дождливого лета каменная масса объемом 14 млн. м<sup>3</sup> сорвалась со своего места и сползла в долину Гольдау; при этом было погребено четыре деревни и убито 457 человек.

В доисторические времена два исключительно крупных оползня произошли у Саидмарре в Иране (20 км<sup>3</sup>) и у Флимса в Швейцарии, в долине Рейна (15 м<sup>3</sup>), причем оба они возникли в известняках, падающих в направлении склона. Предполагают, что развитие оползня Саидмарре происходило под действием сейсмических колебаний.

**Аберван (Уэльс), октябрь 1966 г.** Город Аберван (пишется Aberfan) в Уэльсе находится в районе разработок угля в Валлийских горах. В процессе подземной разработки пустую породу поднимают из шахты и ссыпают ее в искусственный холм — *террикон*. Поскольку уголь обычно приурочен к пластам глин и глинистых сланцев, часто обводненным, террикон состоит из смеси разнообломочного материала, находящегося в грязеобразной или глинистой массе. При извлечении угля из материала, поднятого из шахты, образуются *хвосты* — очень тонкозернистый обломочный материал. Такой материал сбрасывался на один из терриконов Абервана, который позднее обрушился. Семь таких терриконов занимали до середины 60-х годов нашего столетия склон горы Мертир на высоте от 40 до 200 м над Аберваном. Со склона в долину стекало несколько ручьев. Оползни и потоки материала с откосов этих терриконов происходили периодически начиная с 1916 и до 1966 г.; насыпание породы на два из этих терриконов пришлось прекратить из-за возникавших оползней.

В один из дней октября 1966 г. на терриконе № 7 в 9 часов 15 минут произошло обрушение склона и возникший оползень поглотил часть города Абервана (фото 4.6). Наиболее тяжелым последствием оползня было разрушение здания начальной школы, стоявшего на пути оползневой массы. Находившиеся там 116 школьников и 5 учителей были убиты. Всего погибло 144 человека.

Терриконы Абервана были сооружены путем насыпания поднимаемой из шахт породы на 14-градусный склон, сложенный песчаниками, которые покрыты тонким слоем комковатой глины.

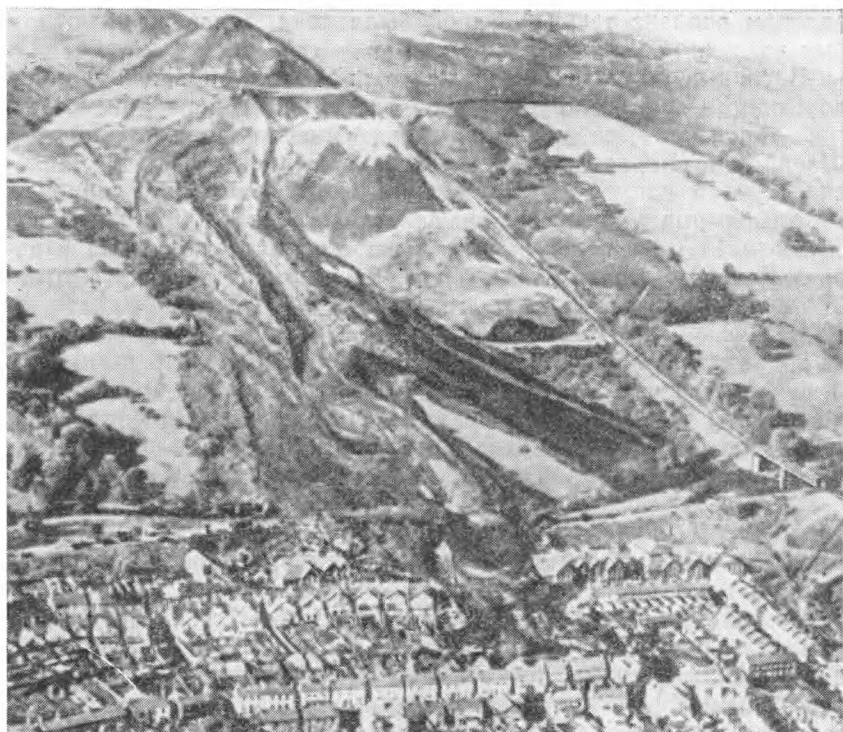


Фото 4.6. Обрушение террикона № 7, Аберван, Уэльс.

Плоскости падения пластов наклонены к долине под меньшим углом, чем поверхность склона. В песчаниках имеются редкие водонепроницаемые прослой, так что грунтовые воды выходят на склоне в виде цепочек родников и участков фильтрационного просачивания. Терриконы находились в верхней части площади этих источников и одновременно в истоках нескольких из тех небольших ручьев, которые стекали со склона в долину. Вследствие большого количества осадков, выпадающих за год в этом районе (около 1500 мм), и нарушения естественного дренажа склона нижние части всех терриконов были насыщены водой. То, что произошло на терриконе № 7 в день бедствия, было описано инженером Дж. Вильямсом, дававшим показания комиссии, назначенной для расследования этой катастрофы:

«Утром 21 октября 1966 г. было несколько подвижек в шлейфе террикона ..., а спустя малое время после 9 часов утра была, очевидно, еще одна подвижка, но на этот раз она произошла в водонасыщенном материале и захватила область, где возникло

разжижение... (*примечание автора*: водонасыщенный материал был в рыхлом состоянии, так что, когда там возник скол без оттока воды, стремление зернистой массы к сокращению объема вызвало появление высоких давлений в поровой воде и произошло разжижение грунта). Этот первоначально разжиженный материал пришел в быстрое движение, тем самым высвобождая энергию, которая обусловила разжижение остальной водонасыщенной части террикона (*примечание автора*: либо движение первоначально разжиженного материала вызвало возрастание касательных напряжений в оставшемся материале). Почти мгновенно характер водонасыщенных нижних частей террикона № 7 изменился: из твердого этот материал превратился в тяжелую жидкость, плотность которой была примерно вдвое больше плотности воды... Верхняя часть террикона, не будучи водонасыщенной, не испытала разжижения, но какой-то ее объем должен был оторваться и был вынесен находившимся под ним разжиженным материалом... Вся эта масса приобрела характер жидкости и быстро спустилась по склону, растекаясь в стороны и принимая вид слоя почти одинаковой толщины. При этом вода высвобождалась из этой массы, частицы грунта слипались и материал снова становился твердым».

Определенную роль в развитии обрушения сыграло, возможно, присутствие в теле террикона № 7 линз мелкозернистого материала (хвостов).

В результате расследования выяснилось, что до 1966 г. в Уэльсе перед началом сооружения терриконов не проводилось никакого изучения механики грунтов, никогда не контролировалась устойчивость существующих терриконов и отвалов, несмотря на то что оползни происходили и раньше. Вероятно, такое положение не привлекало внимания потому, что раньше человеческих жертв не было. Подсчитано, что каждый год в Уэльсе начинают сооружение трех новых терриконов и производят добавления в три существующие. Было рекомендовано учредить Национальный комитет по наблюдению за устойчивостью отвалов, который следил бы за опасностью, связанной с нынешними способами удаления и размещения больших масс промышленных отходов любого вида.

Обрушения терриконов и отвалов происходили и в других местах, в частности в Чили и США. В феврале 1972 г. в Западной Виргинии после сильных дождей рухнула дамба, задерживавшая отработанную воду и отвалы угольной шахты. В катастрофе погибло 118 человек.

**Анкоридж, Аляска; Ганьсу, Китай.** Во время землетрясений очень часто происходит разжижение грунта. При аляскинском землетрясении в марте 1964 г. в районе Анкориджа возникли



сильные колебания грунта, обусловленные большой магнитудой землетрясения и длиной разрыва, по которому произошла подвижка. Поскольку город Анкоридж построен на ровной поверхности на высоте около 20 м над уровнем моря, а берег образован крутыми высокими уступами, длительные сотрясения вызвали в береговых склонах много циклов касательных напряжений (фото 1:1). Разрез пород этого района состоит из слоев песка и гравия, лежащих на глинах так называемой формации Бутлеггер-Коув. В этих глинах также имеются линзы водонасыщенных песков и алевроитов. Детальное изучение оползней, проведенное в районе Анкориджа после землетрясения, показало, что причиной этих оползней было разжижение линз песков и алевроитов в глинах (или самих глин) вследствие сейсмических колебаний. В одном из оползней, возникших во время землетрясения, произошло дробление пород и соскальзывание их к океану на площади длиной (вдоль берега) около 2,5 км и шириной до 0,5 км, что вызвало большие разрушения в жилом районе Тернагейн-Хайтс, где некоторые оползневые блоки передвинулись на расстоянии до 300 м. Свидетельства очевидцев, хотя и несколько противоречивые, указывают на то, что развитие оползней началось через некоторое время после первых толчков землетрясения и продолжалось после окончания сейсмических колебаний. Другие оползни, возникшие вдоль береговых уступов вблизи Анкориджа, вызвали разрушение коммуникаций и хозяйственных построек, хотя движения там были не такими большими, как в районе Тернагейн-Хайтс (фото 4.7).

После землетрясения были использованы различные методы стабилизации грунта, в том числе выравнивание и укатывание склонов, устройство перемычек из уплотненного материала, помещаемого в траншеи у основания откоса оползней для повышения прочности пород на сдвиг. Несколько попыток уплотнить грунт в слоях со сравнительно малой плотностью, которые, как полагают, испытывали разжижение при землетрясении, не достигли успеха. При новом землетрясении примерно такой же магнитуды на этой площади возникнет, вероятно, дальнейшее оползание склона.

В Анкоридже разжижение привело к образованию суспензии, состоящей из частиц грунта, взвешенных в воде. Случай, когда взвешенные частицы находились, очевидно, не в воде, а в воздухе, отмечен в провинции Ганьсу (Китай) при землетрясении 16 декабря 1920 г. Холмы в провинции Ганьсу сложены лёссом, состоящим из тонких зерен, которые были принесены и отложены ветром. Лёссовые отложения широко распространены на юге и юго-востоке США. Если лёсс становится влажным, в нем обычно происходит сильная осадка, вызванная тем, что цемент лёсса, как правило, растворим в воде.

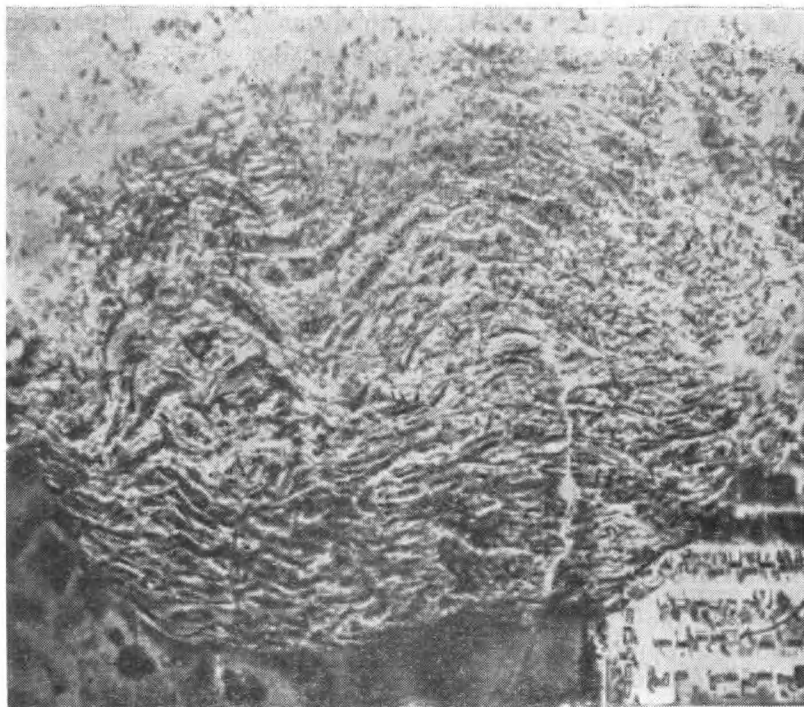


Фото 4.7. Аэрофотоснимок оползня Терпагейн-Хайтс, Аляска.  
О масштабе можно судить по виду домов в правом нижнем углу снимка.

Землетрясение 1920 г. вызвало в лёссовых отложениях Ганьсу потерю сцепления между частицами грунта, и вследствие малой проницаемости материала, не позволившей воздуху быстро выйти из этой массы, произошло разжижение. Оползни, захватившие большие площади склонов, ринулись на деревни и города; считается, что в этой катастрофе погибло до 200 тыс. человек. Хорошего специального описания этого события в западной литературе нет, а наше современное представление о том, что произошло во время землетрясения, основано на материалах посещения провинции Ганьсу западными путешественниками через 2 года после землетрясения. Их рассказы и фотографии нельзя считать ни полными, ни квалифицированными, и по ним трудно представить себе подробную картину механизма явления.

Подобные же катастрофы на лёссовых холмах Китая возникали и во время других землетрясений. В гл. 1 упоминается землетрясение 1556 г. у города Сианя в провинции Шэньси,

когда смерть настигла почти миллион человек, многие из которых погибли из-за обрушения лёссовых склонов.

**Подводные оползни, Ньюфаундленд, Канада, 1929 г.** Другой пример движения грунта, механизм которого пока не вполне ясен, — подводные оползни в открытом море у берегов Ньюфаундленда в ноябре 1929 г. Тогда произошло землетрясение, после которого без видимого движения грунта, один за другим оборвались семь подводных кабелей, проложенных по дну Атлантического океана. Последовательность разрывов кабелей и промежутки времени между отдельными разрывами позволили рассчитать ширину, длину и скорость подводного оползня, порожденного, очевидно, землетрясением. Ни один другой механизм, иной, чем скольжение или течение грунта, не представляется вероятным. Расстояние между исходным районом и положением последнего обрыва кабеля составило 470 км. Ширина оползня или оползней (возможно, их было несколько) была не меньше 150 км, из чего следует, что был захвачен огромный объем материала. Вычислено, что максимальная скорость движения грунта составила 93 км/мин и что у последнего обрыва кабеля этот поток все еще двигался со скоростью около 22 км/ч.

На конечном участке движения наклон дна океана исключительно мал: примерно  $0,5^\circ$  или меньше, поэтому приходится предполагать, что оползневая масса имела скорее всего характер плотной жидкости, а не твердого тела. Правдоподобным кажется такое объяснение механизма этого явления: землетрясение послужило толчком для оползня, развившегося в более крутой части океанского дна, где оно было сложено тонкозернистыми неустойчивыми породами. Зона скалывания или поверхность отрыва находилась на глубине порядка единиц или десятков метров ниже уровня дна океана. Вероятно, на этой глубине должно было произойти некоторое разжижение материала, чтобы развившийся оползень смог на сравнительно пологом склоне достичь столь большой скорости, что началось турбулентное перемешивание оползневого материала с морской водой. Если бы этого перемешивания не было, то едва ли блок горных пород океанского дна, имевших плотность хотя и сравнительно малую, но все-таки в том диапазоне, который характерен для твердых грунтов, смог бы пройти такое большое расстояние. При скорости 1—2 м/с верхний слой оползневой массы, двигавшейся под морской водой, должен был стать неустойчивым; его поверхность должна была создавать в воде волны, которые в конечном счете перемешивали грунт с водой. Вследствие такого перемешивания оползневая масса увеличивалась в объеме и становилась менее вязкой, ее скорость возрастала, что делало процесс перемешивания еще более турбулентным, и в результате обра-

зовался поток в общем жидкого материала, движущийся с некоторой постоянной скоростью. Этот вид течения материала обычно называют *мутьевыми*, или *турбидитными*, потоками. Материал потока, хотя он и имел небольшую плотность, был, очевидно, достаточно вязким и связным, чтобы вызвать обрывы кабелей, встретившихся на его пути. Точно такие же данные об обрывах кабелей свидетельствуют о ряде других случаев возникновения природных мутевых потоков этого типа, вызванных подводными оползнями после землетрясений, в других областях Мирового океана, в том числе у берегов северной Африки и Индонезии.

**Плотина Сан-Фернандо, Калифорния, 9 февраля 1971 г.** Землетрясение, разразившееся 9 февраля 1971 г. в долине Сан-Фернандо, Калифорния (см. раздел 1.4), вызвало в соседних горах Сан-Габриель тысячи обвалов всевозможных размеров, но наиболее важным проявлением оползневых движений был оползень, возникший под воздействием этого землетрясения на обращенном к верховьям долины откосе 60-метровой земляной плотины Сан-Фернандо. Хотя оползень развился полностью, уровень воды в водохранилище за этой плотинкой был, по благоприятному стечению обстоятельств, на необычно низком уровне, так что уцелевшая часть плотины оказалась достаточной, чтобы не выпустить воду из водохранилища в нижнюю часть долины. Однако вследствие обрушения плотины и опасности новых оползней при афтершоках землетрясения или из-за начатого по указанию властей быстрого спуска воды из водохранилища около 80 тыс. человек было эвакуировано из районов в нижней части долины.

Плотина была построена в период с 1912 по 1920 г. главным образом путем намыва, но затем в несколько приемов высота плотины была увеличена, и ее прочность была повышена добавлением и укаткой материала. Проведенный после землетрясения анализ показал, что циклические касательные напряжения, развившиеся в теле плотины при сотрясениях, привели к тому, что в отдельных зонах насыпи произошло разжижение. Это вызвало обрушение откоса плотины, обращенного вверх по течению, через короткое время после начала землетрясения. Обвалившаяся часть материала плотины соскользнула в верхний бьеф водохранилища и прошла вверх по долине расстояние от 100 до 200 м (фото 1.8).

Во время этого землетрясения частичный оползень произошел и на обращенном вниз по течению откосе верхней плотины Сан-Фернандо (несколько меньшего размера и построенной позднее), удерживавшей воду на некотором расстоянии от главной плотины. Часть материала испытала смещение примерно на 1 м с вращением. Если бы землетрясение продолжалось еще

некоторое время, то этот оползень развился бы, вероятно, полнее. При этом же землетрясении ряд оползней сошел и с берегов водохранилища Обрушение плотины Сан-Фернандо заставило провести обширные работы по переоценке устойчивости всех земляных плотин в сейсмических районах Калифорнии.

**Плывунные глины: Квебек (Канада) и Швеция.** Последние из описываемых случаев быстрого обрушения склонов характерны для явлений, часто встречающихся в областях развития определенных типов глин, особенно в Канаде, Норвегии и Швеции. Эти породы называются *плывунными глинами* (quick clays); соотношение напряжений и деформации в них указывает на их исключительную неустойчивость. Они формировались, по-видимому, в морских условиях, а затем были подняты выше уровня моря, так что соленая вода, заполнявшая их поры, была в результате фильтрации дождевых и грунтовых вод замещена пресной водой. В этих глинах при неплотной, рыхлой текстуре развивается сильное сцепление между частицами, так что в спокойном состоянии прочность этой породы очень высока. Однако когда глина нарушена скалыванием или перемята, сцепление исчезает и материал становится существенно жидкой суспензией глинистых частиц в воде.

На склонах, сложенных такими глинами, касательные напряжения у основания откоса могут превысить прочность породы на сдвиг. В зоне скалывания глина деформируется и теряет прочность, в результате чего в соседних зонах касательные напряжения увеличиваются, и эти зоны в свою очередь также подвергаются скалыванию и становятся непрочными. На некоторой критической стадии роста такой поверхности скола общая касательная нагрузка оказывается выше, чем уменьшающаяся прочность материала на сдвиг, и начинается оползень. Как только смещение оползневой массы превысит некоторую небольшую величину, материал вдоль плоскости скола становится существенно жидким и движение оползня ускоряется.

Хотя и вполне возможно, что перед обрушением наблюдения показали бы развитие неустойчивости, однако большинство таких потоков грунта возникает в плохо изученной сельской местности и поэтому они бывают неожиданными и могут оказаться весьма разрушительными. Одним таким оползнем было убито более 100 человек. Оползни развиваются в условиях довольно пологого рельефа, когда поверхность над береговыми уступами и невысокими обрывами имеет наклон всего в несколько градусов. Материал, сползающий в реку, может запрудить ее или может быть вынесен водой в нижнюю часть долины.

Такие явления периодически происходят в Канаде в долине реки Святого Лаврентия и ее притоков, а также вдоль различ-

ных водотоков в Норвегии. Большой оползень плывунных глин уничтожил значительную часть города Сурте на реке Гота в Швеции в 1950 г. Непосредственной причиной этого оползня послужила, возможно, работа копра, забивавшего сваи. Около 3 млн. м<sup>3</sup> грунта сместилось в сторону реки Гота, почти запрудив ее. В настоящее время оползание плывунных глин изучено достаточно хорошо, и изыскания, проводимые перед началом строительства в каждом конкретном районе, должны обнаружить потенциальную опасность, связанную с их присутствием. Старые оползни такого рода хорошо видны на аэрофотоснимках.

**Эксмут, Девон, Англия, декабрь 1839 г.** Среди оползней, которые начинаются и развиваются с умеренной скоростью, есть такие, которые возникают в приморских районах, где у основания береговых уступов, или обрывов, идет постоянный процесс эрозии. Обрушение обычно происходит после особенно сильных штормов, когда вымывается значительный объем материала и из-за этого резко уменьшается устойчивость склона. Одновременно в результате выпадения большого количества атмосферных осадков повышается уровень зеркала грунтовых вод и возрастает поровое давление в подстилающей толще. В качестве наглядного примера таких явлений можно привести оползень на побережье Девона в день рождества 1839 г., известный как оползень Эксмут, или Даулэнд (см. фото 4.8). Он захватил толстый пласт меловых отложений, лежащий на слоях песчаников и глин, причем и мел, и песчаник обладают сравнительно высокой водопроницаемостью, так что фильтрующаяся через них вода течет по поверхности слоев глин и глинистых сланцев и просачивается наружу у основания уступа. В результате водонасыщения и появления высокого порового давления после сильных дождей прочность глины на сдвиг уменьшается, и эта глина начинает действовать как поверхность скольжения для находящегося над ней блока пород. Объем эксмутского оползня достигал, возможно, 40 млн. м<sup>3</sup>, но благодаря слабой населенности этого района пострадало совсем немного людей. Оползень получил в свое время широкую известность и часто посещался туристами.

Из материала, сгрудившегося в море у подножия откоса этого оползня, образовался бар, который воспрепятствовал дальнейшему размыву основания берегового уступа; первоначально резкие формы раздробленных и оползших блоков сгладились и приобрели более округлые очертания. Арчибалд Гики, шотландский геолог, работавший в южной Англии, рассказал об этом в 1885 г. следующим образом: «Повсюду грубая изрезанность возникших раньше расщелин смягчена теперь роскошным покрывалом зелени, появлению которого в каждом укром-

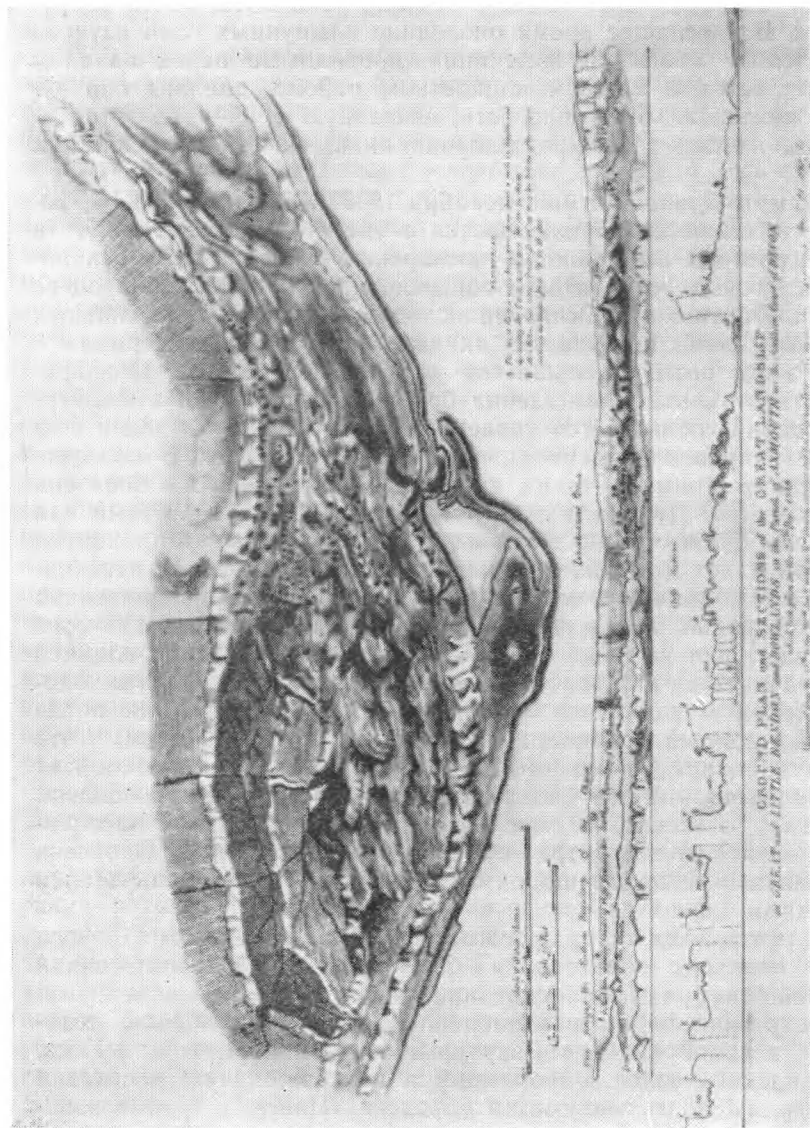


Фото 4.8. Зарисовка эксмутского оползня, Девон, Англия, 25 декабря 1839 г.  
Измерения проведены в январе 1840 г.



Фото 4.9. Оползни и береговая эрозия на побережье восточной Англии (фото Р. Ф. Скотта).

ном уголке благоприятствует мягкий климат этого южного побережья».

Такая переработка побережья морем происходит, конечно, во многих районах мира, но лучше всего, по-видимому, она изучена в Великобритании, так как разрушение земной поверхности имеет на этом густонаселенном острове большое значение. Южное и восточное обрывистые побережья Англии (фото 4.9) подвергаются эрозии в течение многих сотен лет и размыты до такой степени, что целый ряд некогда процветающих городов исчез теперь в волнах Северного моря. Другие площади, находящиеся сейчас на морском берегу, в прошлые времена относились к внутренним районам страны. На побережье южного Кента, где геологический разрез похож на разрез Эксмута, происходят крупные оползни, отражающие возобновление подвижек в массе горных пород, которая сползла когда-то со 150-метрового уступа и называется в этом месте «подошвой уступа». Крупные подвижки отмечались в 1877, 1896 и 1915 гг., а менее значительные — в 1859, 1865, 1937 и 1940 гг. Эти оползни были результатом морской эрозии подножия склона; в настоящее время их развитие сдерживается предпринятыми защитными мерами. Все оползни возникали между декабрем и мартом — в те периоды, когда уровень грунтовых вод в этих местах бывает в наивысшем положении.



**Скалы Тихоокеанского побережья и район Хайленд-Парк, Калифорния.** В южной Калифорнии имеются обширные площади, сложенные слабо сцементированными, сравнительно мало обводненными аллювиальными отложениями: песками; илами, галечниками. Цемент их легко растворяется в воде, так как он образовался благодаря многократному увлажнению и высушиванию пород при сезонных изменениях режима осадков. При этом для данной территории характерна высокая тектоническая и сейсмическая активность, так что приподнятые аллювиальные образования расщелены не только обычными для осадочных пород плоскостями напластования и системами трещин отдельности, но также разрывами и трещинами всевозможных размеров. В новейшее геологическое время в южной Калифорнии происходили вулканические извержения, в результате которых поверх накапливающегося аллювия отлагались тонкие слои пеплов. Слои вулканических пеплов затем тоже оказывались погребенными и превращались в монтмориллонитовые глины: этим объясняется присутствие такого материала в виде тонких прослоев среди песчаников и алевроитов. Указанный материал имеет низкую прочность на сдвиг и практически может рассматриваться как смазка между отдельными толщами горных пород; слои этого материала становились зонами скалывания, по которым развивались поверхности скольжения целого ряда оползней.

В районах южной Калифорнии летом дождей бывает мало или не бывает совсем, и только в дождливый сезон — с ноября по март — здесь выпадает до 500 мм осадков, причем это происходит за время трех-четырех штормов, сопровождающихся проливными дождями. Таким образом, если уж в каньонах и долинах начинается эрозия, то она бывает очень быстрой; трещины и разрывы, которые большую часть года остаются сухими, могут за короткое время наполниться водой. Вследствие этого на крутых бортах каньонов и вдоль береговых уступов в дождливые сезоны или же сразу после них часто возникают оползни.

В частности, на побережье у Санта-Моники [Санта-Моника — название хребта и города-курорта в юго-западной Калифорнии; в настоящее время город Санта-Моника слился с Лос-Анджелесом, вместе они занимают восточное побережье залива Санта-Моника. — *Перев.*] береговой уступ высотой 20—50 м сложен непрочными алевроитами и песчаниками и пронизан бесчисленными трещинами и разрывами. В 1959 г. здесь произошел крупный оползень, в результате чего пришлось перенести важную шоссейную дорогу, которая раньше шла вдоль подножия склона. В этом районе оползни заставляли несколько раз менять створ дороги (фото 4.10). Вообще говоря, на всей этой площади крупным оползням предшествует медленное сползание (крип)



Фото. 4.10. Древний, периодически возобновляющийся оползень. Приморское шоссе 101, Санта-Моника, штат Калифорния. Оползень занимает полукруговую площадь над дорогой, идущей по его периметру. Новая дорога видна в верхней части снимка.

грунта, и нередко его удастся обнаружить, так как район плотно населен и застроен.

К центру Лос-Анджелеса с севера примыкает жилой район Хайленд-Парк. Этот район построен на холмах, сложенных переслаивающимися алевроитами и песчаниками с редкими прослоями измененного вулканического пепла, которые описаны выше. Холмы рассечены каньонами, в которых в зимнее время резко ускоряются процессы эрозии. Хотя в этой местности естественная система дренирования склонов была сильно изменена людьми для повышения устойчивости, кое-что остается в прежнем положении даже в населенных районах. В январе 1969 г.

здесь в течение двух дней бушевала буря и лил проливной дождь. Вода сильно размыва склоны одного небольшого каньона в Хайленд-Парке. Блок породы, подрезанный ручьем, сполз в каньон и запрудил его; смещение этого блока лишило поддержки другой блок, находившийся выше, и он тоже пришел в движение. За ним в свою очередь последовал третий блок, и тем самым подвижки распространились вверх по склону холма. Человеческих жертв не было, но несколько домов было сильно повреждено.

Проведенные после этого оползня исследования показали, что восточный край оползшего блока представляет собой плоскость разрыва, вблизи которой материал был в сильно нарушенном состоянии из-за неоднократных подвижек по разрыву. Плоскости напластования, ограничивающие оползшие блоки снизу, наклонены под углом около  $12^\circ$  и идут параллельно поверхности склона. В верхней части одного из оползших блоков

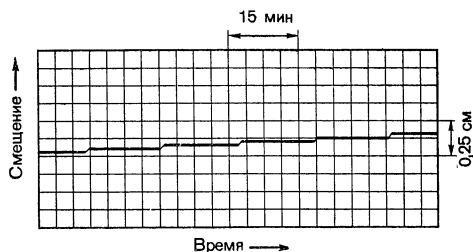


Фото 4.11. Фрагмент записи движения оползня, Калифорния (Р. Ф. Скотт).

была произведена выемка грунта, в результате чего обнаружилось, что скольжение произошло целиком по монтмориллонитовому слою, на глубине 5 м от дневной поверхности. Спустя день или два после оползня в этом месте были установлены соответствующие приборы и произведены детальные измерения ползучести верхнего блока, продолжавшего медленное движение и после главного смещения. Характер полученных записей показан на фиг. 4.11. Возможно, что медленное движение подобно тому процессу, который предшествовал главному смещению оползневого блока. Общее расстояние, пройденное самой нижней частью оползня, составило около 20 м; движение прекратилось, когда блок уперся в противоположный борт V-образного каньона.

**Портьюгиз-Бенд, Калифорния.** На аэрофотоснимках полуострова Палос-Вердес [между заливами Санта-Моника и Сан-Педро, непосредственно к югу от Лос-Анджелеса. — *Перев.*], сделанных в 1930—1940 годы (еще до того, как в результате роста населения вся эта площадь покрылась домами), можно увидеть, что на обширной площади в южной части полуострова, в районе,

называемом Портьюгиз-Бенд, развиты оползневые образования. Вероятно, движение оползня происходило в несколько эпизодов, и, по-видимому, оно не захватывало сразу всю оползневую массу. Вместо этого оползание одного участка склона понижало устойчивость соседнего участка, и тот спустя сколько-то лет, десятилетий или веков тоже приходил в движение. Вся площадь выглядит так, как будто на холмы наброшен смятый ковер. Несмотря на явные признаки неустойчивости склона, здесь не было принято никаких мер для предотвращения раздела (в 1950-е годы) территории на участки для частного владения и строительства домов.

В 1956 г. большой участок склона, площадью около 1 км<sup>2</sup>, начал двигаться по поверхности, наклоненной под углом всего лишь 6,5°; за несколько месяцев смещение достигло 20 м. В верхнем конце участка образовался уступ, а в самом оползневом теле появились достаточно большие трещины и разрывы (см. фото 4.11). Дорогу, которая шла через нижнюю часть оползающего склона, в последующие несколько лет пришлось неоднократно переносить на новое место. Дома, стоявшие на оползне или около его краев, оказались в опасном положении, и в большинстве случаев их также пришлось удалить. К апрелю 1974 г. максимальное расстояние, пройденное оползнем, составило приблизительно 70 м; движение все еще продолжалось в 1977 г. со скоростью около 3 м в год. Причина этого оползня была предметом судебного разбирательства между властями графства Лос-Анджелес и объединением домовладельцев. Ущерб, связанный с движением оползневой массы, оценивается суммой 10 млн. долл.

В большинстве домов, построенных на этой площади, не было канализации, а использовались сточные ямы, так что выливаемая в них вода уходила в этой зоне потенциального скольжения прямо в грунт. Постройка домов и прокладка улиц нарушили, конечно, естественный дренаж этой площади, а когда произошли оползневые смещения и разорвались водопроводные и дренажные трубы, приток грунтовых вод увеличился. Помимо всего этого, дорожное ведомство графства Лос-Анджелес в 1955—1956 гг. занималось строительством шоссе на север через холмы и на юг по склону Портьюгиз-Бенд до соединения с приморским шоссе. Из-за значительной крутизны склона пришлось сооружать большие насыпи, особенно на той площади, которая стала затем верхней частью оползневого тела. В августе 1956 г. рабочие, строившие дорогу, первыми заметили признаки постепенно нарастающего смещения грунта. Владельцы земельных участков этого района объединились и возбудили судебное дело против властей графства, заявив, что причиненный ущерб связан с сооружением дорожной насыпи. Обе стороны спора нашли экспер-

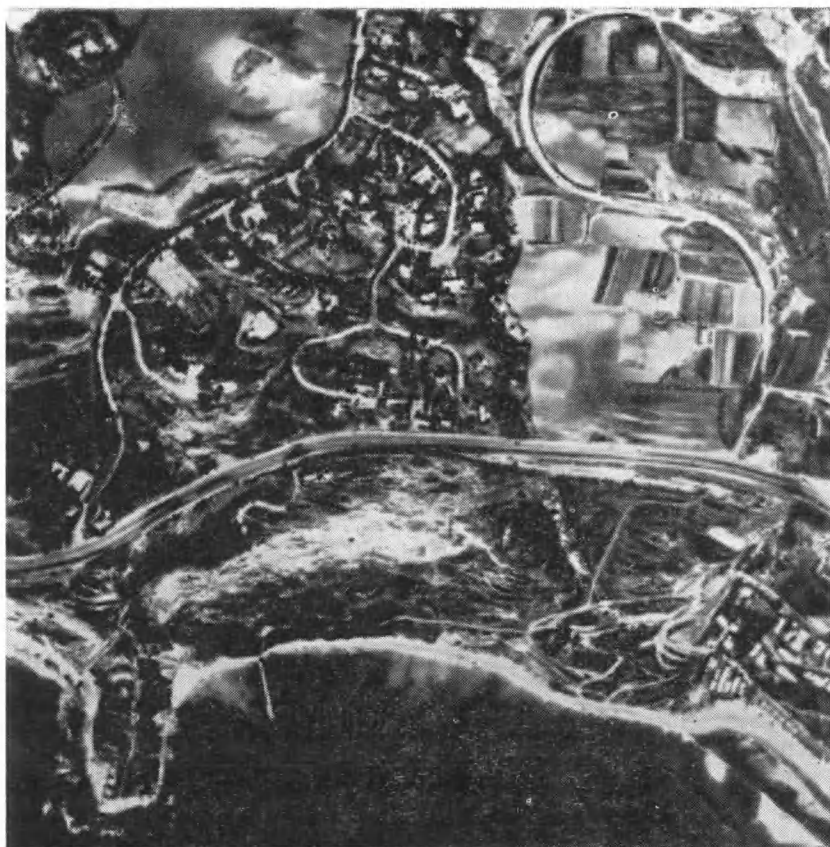


Фото 4.11. Оползень Портьюгиз-Бенд, Лос-Анджелес, штат Калифорния.

Правый край оползня проходит слева от домов (в нижнем правом углу снимка). В левой своей части оползень разрезан выступающей скалой. Участок с пересеченным холмистым рельефом, частично застроенный домами (в центре снимка)—поверхность оползневого тела.

тов, которые показали и то, что насыпь стала одной из причин разрушения склона, и то, что первичной причиной было изменение режима грунтовых вод на площади склона. В конце концов судья решил в пользу объединения домовладельцев, и они получили от графства компенсацию за ущерб. Делались различные оценки того, каких затрат потребуют те или иные меры, которые можно было предпринять для остановки этого оползня; все эти оценки были порядка 10 млн. долл. В настоящее время на описанной площади осталось сравнительно мало домов.

**Плотина Вайонт, Италия.** В конце 1950-х годов долина Вайонта — притока реки Пьяве в Италии — была перекрыта тонкой купольной плотиной высотой 267 м; позади плотины между крутыми бортами долины образовалось водохранилище. Изыскания, проводившиеся перед началом строительства, были сосредоточены на участке самой плотины, на берегах же будущего водохранилища было пробурено только несколько скважин. В ноябре 1960 г. произошла подвижка грунта на участке склона водохранилища. Медленное движение грунта продолжалось до тех пор, пока смещение не достигло 2,5 м, после чего, в октябре 1963 г., выше плотины на южном борту долины произошел крупный оползень. В водохранилище рухнуло примерно 250 млн. м<sup>3</sup> рыхлого и скального грунта. В результате этого возникло резкое смещение очень большого объема воды, и огромные волны, высота которых была на 100 м больше высоты плотины, хлынули и вверх и вниз по долине; погибло почти 3000 человек (см. раздел 3.1). В этом случае воздействие оползня было косвенным, но тем не менее катастрофическим.

Проведенные впоследствии исследования показали, что геологические структуры южного борта долины имели стулообразную форму, подобную структуре поверхности скольжения, показанной на фиг. 4.10, в, и что обрушение захватило сильно трещиноватые оолитовые известняки, залегающие вдоль поверхности скола. Крупные подвижки, возникшие перед конечным обрушением, указывают на то, что прочность материала понизилась до своего остаточного значения. Анализ показал, что возникновению неустойчивости оползневой массы способствовало и присутствие вдоль поверхности отрыва артезианских давлений. Выяснилось, что эта поверхность на 60% совпадала с плоскостями напластования в известняках. Сама плотина осталась цела, но сделалась бесполезной, так как водохранилище заполнилось оползневой обломочной массой.

## Список литературы

1. *Bader H.*, The Physics and Mechanics of Snow as a Material, Cold Regions, Science and Engineering, Part II, Section B, U. S Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, 1962.
2. *Browning J. M.*, Catastrophic Rock Slide, Mount Huascaran, North-Central Peru, May 31, 1970, Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 57, 1335—1341, 1973.
3. *Cruden D. M., Krahn J.*, A Re-examination of the Geology of the Frank Slide, Canadian Geotechnical Journal, 10, 581—591, 1973.
4. *Eckel E. B.*, Ed., Landslides and Engineering Practice, Highway Research Board Special Report 29, NAS-NRS Publication 544, 1958.
5. *Hunt C. B.*, Geology of Soils, San Francisco, Freeman, 1972.

6. *Kerr P. F.*, Quick Clay, *Scientific American*, **209**, 132—142, 1963.
7. *Kingery W. D.*, ed., *Ice and Snow*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1963.
8. *LaChapelle E.*, *Avalanche Forecasting, A Modern Synthesis*, Congress IUGG, 1966; International Association of Scientific Hydrology, Publication **69**, 410—417, 1966.
9. *Oura H.*, ed., *Physics of Snow and Ice, Section 4, Mechanism of Avalanches*, The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Tokyo, 1967.
10. «Performance of Earth and Earth-Supported Structures», **1**, Part, 1, Proceedings, Specialty Conference, American Society of Civil Engineers, Purdue University, June 1972.
11. Proceedings of the Conference on Stability and Conservation of Natural Slopes, Naples, Italy, 1971, in *Geologia Applicata e Idrogeologia*, **8**, 1974.
12. Report of the Tribunal Appointed to Inquire into the Disaster at Aberfan, London, Her Majesty's Stationary Office, 1967.
13. *Scott R. F.*, *Principles of Soil Mechanics*, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1963.
14. *Sharpe C. F. S.*, *Landslides and Related Phenomena*, New York, Columbia University Press, 1938, Reprinted by Cooper Square Publishers, New York, 1968.
15. *Skempton A. W.*, *Hutchinson J.*, Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations, State-of-the-Art Report, Proceedings Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969.
16. *Sorensen J. H.*, *Eriksen N. J.*, *Mileti D. S.*, Landslide Hazard in the United States, A Research Assessment, University of Colorado, Institute of Behavioral Science, Monograph Series No. NSF-RA E-75-009, Boulder, Colorado, 1975.
17. *Terzaghi K.*, Mechanism of Landslides, In: *Application of Geology to Engineering Practice*, Berkey Volume, Geological Society of America, 83—123, 1950.
18. The Great Alaska Earthquake of 1964, Engineering Volume, Washington, D. C., National Academy of Sciences, 1973.
19. *Zaruba Q.*, *Menci V.*, *Landslides and Their Control*, Amsterdam, Elsevier, 1969.
20. *Zienkiewicz O. C.*, *The Finite Element Method in Engineering Science*, New York, McGraw-Hill, 1971.

# ГЛАВА 5

## ОПАСНОСТЬ ОСЕДАНИЯ ГРУНТА

Бесконтрольное выкачивание из земных недр воды и нефти привело, особенно в двадцатом столетии, к тяжелым экономическим и культурным потерям. Слишком поздно было обнаружено, что земная поверхность при этом опускается, или оседает, ниже естественного уровня. В этой главе термин «оседание» (осадка, проседание, опускание) используется в широком смысле и означает любое смещение в общем случае плоской поверхности грунта под влиянием поверхностных или глубинных причин.

В целом главный вид опасного опускания грунта — это наблюдаемое визуально вертикальное нисходящее движение, захватывающее блюдцеобразные или чашеобразные участки земной коры. Однако если первоначально ровная поверхность по какой-то причине начинает прогибаться и приобретает такую форму, должны появиться и горизонтальные смещения. То, в какой мере они опасны для построек, зависит от величины и градиента опускания относительно к расстоянию от центра возмущения. Оседание грунта рассматривается в этой главе как результат приложения поверхностной или внутренней нагрузки или как следствие удаления или изменения глубинного материала. Опускание поверхности происходит, например, в верхних частях неустойчивых склонов, где этот процесс связан с обра-



зованием оползней или местных срывов, но этот вопрос уже освещен в предыдущей главе.

Воздействие оседания грунта на то или иное здание или сооружение зависит от соотношения размеров постройки и опускающегося участка. Опускание чашеобразной площади диаметром несколько километров не окажет сильного воздействия на одноэтажные строения и на здания в несколько этажей, расположенные внутри области, захваченной опусканием, если только этот процесс не увеличит опасность затопления территории. Однако в более протяженных сооружениях, таких, как каналы, а также, возможно, в больших мостах и плотинах могут при таких смещениях возникнуть очень большие напряжения. На сооружения меньшего размера воздействуют смещения грунта, захватывающие участки с поперечными размерами от единиц до сотен метров.

Смещения поверхности грунта происходят также в широком временном диапазоне. Пожалуй, наибольшим временным диапазоном характеризуются тектонические движения: при землетрясениях они могут осуществляться за считанные секунды (фото 5.1), вследствие удаления геологической поверхностной нагрузки — за сотни и тысячи лет, а при горообразовательных процессах и в результате дрейфа континентов — за десятки и сотни миллионов лет. Эти последние процессы оказывают на человеческую деятельность наименьшее влияние. Однако движения, связанные с поднятием земной поверхности после удаления ледовой нагрузки последнего оледенения, конечно, как и изменение рельефа, вызванное землетрясениями, могут оказать сильное воздействие на построенные людьми сооружения. Причиной оседания грунта, приводящего к наиболее тяжелым для построек последствиям, часто бывает сама деятельность человека на поверхности и под землей. Такие условия могут развиться за период времени, сравнимый со временем жизни сооружения. Оценивая опасность оседания грунта, необходимо знать и механизм, и величину, и время развития смещения.

## 5.1. Классификация явлений оседания грунта

Возможны различные классификации явлений оседания грунта, в том числе, например, такие, которые основаны на их масштабе или продолжительности, механизме или вероятных последствиях. Тем не менее скорость, с которой происходит опускание, обычно невелика, за исключением некоторых особо упоминаемых ниже случаев, так что классификация таких явлений по скорости или продолжительности не столь целесообразна, как, например, в случае оползней. Размер площадей, захва-



Фото 5.1. Морское дно у острова Монтагю, Аляска, обнажившееся после землетрясения 27 марта 1964 г. в заливе Принс-Вильям (см. гл. 1).

Келп (зона бурых водорослей) располагается теперь значительно выше уровня прилива. На врезке в увеличенном виде показан участок высохшего келпа.

тываемых опусканием, тесно связан с механизмом, вызывающим этот процесс, поэтому удобно провести классификацию, основанную только на этих двух соображениях.

**Размер.** Съёмки, проведенные после Аляскинского землетрясения в марте 1964 г. на обширной территории в пределах Аляски и соседних с ней Алеутских островов, показали значительные изменения высот поверхности (фиг. 1.2). На эти крупные региональные смещения наложались локальные движения, связанные с разными причинами, и в частности с эффектом уплотнения водонасыщенных грунтов при сейсмических

колебаниях. Непосредственное воздействие этих процессов на построенные людьми сооружения и косвенное воздействие на человеческую деятельность захватили обширные площади и все еще продолжают. Доки, гавани и береговые сооружения на некоторых участках оказались много выше нового среднего приливно-отливного уровня, в других местах многие постройки погрузились и оказались затопленными, так что многие строения пришлось переместить или построить заново. Чрезвычайно сильным было и долговременное воздействие на животный мир и растительность всего этого района. Поднятие прибрежных участков морского дна означало гибель многих форм раковинных организмов; изменение режима рек, образование песчаных отмелей и перестройка прибрежного рельефа привели к изменению путей движения рыбы и, следовательно, повлияли на рыболовство.

В прошлые ледниковые периоды, и особенно при последнем оледенении, которое резко пошло на убыль около 11 тыс. лет назад, отдельные участки земной коры подвергались нагрузке ледяных толщ мощностью до нескольких километров. Нагрузка эта продолжалась десятки тысяч лет. Поскольку площади, покрытые льдом, были велики по сравнению с мощностью коры, следствием этой нагрузки было постепенное погружение коры по мере того, как из-под нагруженных участков происходил отток менее вязкого мантийного материала. Когда лед растаял, удаление нагрузки с поверхности коры, опустившейся ранее ниже положения равновесия, вызвало поднятие коры снова к положению равновесия по мере того, как мантийный материал стекался под освободившиеся от нагрузки участки. Геофизики называют этот процесс *изостатическим выравниванием*; продолжительность его — десятки тысяч лет. Таким образом, отдельные участки земной коры все еще испытывают воздымание, вызванное выравниванием после удаления льда 11 тыс. лет назад. Сильнее других этим процессом захвачены Норвегия, Швеция, Финляндия и Дания (поднятие Фенноскандии); поднимаются также отдельные участки Северной Америки. Проявляется это в постепенном понижении (относительно этих площадей) уровня моря. На основании геологических данных по озерным и морским террасам можно сделать выводы о скорости этого движения в различные эпохи. На побережье Балтийского моря скорость поднятия достигает 1 м в столетие. Это движение способствует возникновению неустойчивости в наклоненных прибрежных участках морского дна и, возможно, вызывает длительно развивающиеся изменения в размещении осадков вокруг заливов.

Движение земной коры может происходить и на гораздо меньших площадях, чем на захваченных оледенением (см. раз-

дел 5.4). Вокруг естественных и искусственных водоемов наблюдались движения, которые отражают реакцию локальных участков коры на изменение нагрузки, связанной с уровнем воды в озере. Большое Соленое озеро в штате Юта представляет собой реликт более крупного древнего водоема, которому дали название озеро Бонневиль. Это озеро сократилось в размерах вследствие испарения, происходившего в течение последних тысячелетий; в результате местная нагрузка на земную кору уменьшилась и площадь стала подниматься. Нисходящее движение земной коры было вызвано весом воды озера Мид — водохранилища, образованного плотиной Гувер по границе штатов Невада и Аризона в США; то же самое происходит в районе озера Кариба в Африке (см. раздел 1.3).

Опускание поверхности происходит и в других районах, сравнимых по размеру с водохранилищами; оно бывает следствием иного вида человеческой деятельности: откачки воды, газа, нефти или извлечения твердого вещества из земных недр. Опускания, возникающие при этом на поверхности, обычно измеряются несколькими метрами или меньше и захватывают площади с поперечными размерами от сотен километров до сотен метров. Как правило, такие движения развиваются в течение десятиков лет.

Искусственно создаваемые поверхностные нагрузки оказывают влияние на несколько меньшие площади. При соответствующих условиях в нижележащих грунтах здание или плотина могут испытать осадку в диапазоне от нескольких сантиметров до нескольких метров и вызвать опускание поверхности на площади, в 2—3 раза превышающей собственные размеры сооружения. Проходка шахт и туннелей, выполняемая без необходимых мер предосторожности слишком близко к дневной поверхности, также вызывает смещение грунта примерно такого же масштаба. Наконец, наименьшие смещения, представляющие интерес для строительства (порядка нескольких сантиметров на участках размером в несколько метров), могут быть вызваны недостаточным уплотнением грунта при засыпке траншей, прорытых для канализационных или других труб.

**Механизм.** Медленное движение крупных плит, образующих стабильные области поверхности Земли, вызывает в пограничных районах напряжения, так что при подходящих условиях может произойти внезапная подвижка и возникнет землетрясение; в ином случае развиваются движения ползучести (крипа). Когда напряжения возрастают до того уровня, при котором происходят землетрясения, можно в некоторых случаях наблюдать поверхностное заметное смещение грунта.

Когда к поверхности Земли приложена большая нагрузка, как, например, нагрузка ледового чехла, верхние горизонты коры ведут себя как существенно твердое, упругое вещество, в то время как подстилающая мантия при высоких температурах и давлениях показывает вязкое поведение и под действием касательных напряжений, возникающих при нагрузке и разгрузке коры, начинает течь. Течение мантийного материала при медленной ползучести вызывает в этом случае заметное вертикальное перемещение коры. Касательные напряжения, создаваемые вязким движением подкорового мантийного материала, приводят также и к горизонтальным смещениям вышележащих блоков коры. Однако они существенно меньше, чем вертикальные смещения.

Наибольшие смещения поверхности, вызываемые искусственными причинами, возникают в результате удаления из недр твердого материала или флюидов, причем наиболее заметный эффект бывает связан с откачкой с различных глубин воды, нефти и газа. Иногда откачка воды ведет к трагическим для культурных ценностей последствиям, как, например, при наводнениях в Венеции (см. раздел 5.4).

Рассмотрим слой песка, залегающий на глубине, допустим, 100 м, перекрытый слоем водонепроницаемой глины и насыщенный водой. При нормальных условиях элементарный объем песка, располагающийся на определенной глубине, находится в равновесии. На него действует вертикальное полное давление, создаваемое весом грунта и воды в вышележащих слоях, а также латеральное полное давление, зависящее от вертикального давления и свойств вещества. Как показано в разделе 4.2, полное напряжение, присутствующее в грунте, можно представить в виде суммы эффективного напряжения, приложенного к твердой текстуре грунта, и порового давления жидкости, развивающегося во флюиде. Если пробурить в этом песчаном слое скважину и позволить воде подняться по этой скважине до той высоты, где достигается равновесие, то уровень воды будет отражать поровое давление в грунте у основания скважины.

В разделе 4.2 указано, что грунт может реагировать только на изменение эффективных напряжений. Например, какой-нибудь участок земли можно по всей площади нагрузить слоем насыпного грунта. В этом случае поверхностная нагрузка проявится в нижележащих элементах грунта повышением полного напряжения. Если в результате дренажа водонепроницаемого песка поровое давление сохраняет свое прежнее значение, то происходит увеличение эффективного напряжения и грунт уплотняется.

В другом случае, когда полное давление, действующее вертикально на элемент грунта, остается постоянным, а поровое

давление уменьшается, происходит увеличение эффективного напряжения и уплотнение грунта. Именно к этому приводит откачка воды из подземного горизонта через скважину или систему скважин. Чтобы извлечь воду из скважины, насосом создают разрежение и тем самым понижают уровень грунтовых вод, иначе говоря, понижают поровое давление в водоносном горизонте, из которого берут воду. Таким образом, если в водоносном слое пробурить несколько скважин и откачивать через каждую одинаковое количество воды, то этот слой будет сжиматься вертикально. Если же имеется только одна скважина или группа скважин, занимающая небольшую по сравнению с глубиной площадь, то опять происходит сжатие, но воздействие на напряжения и деформации в вышележащих породах носит более сложный характер. В приведенном выше примере понижение водяного давления в песчаном слое приведет также и к понижению порового давления в перекрывающей его пачке глин. Она тоже будет сжиматься, но медленнее, так как вода удаляется из глины с меньшей скоростью.

Величина опускания дневной поверхности зависит от того, насколько понизился уровень грунтовых вод, от сжимаемости и глубины залегания слоя, из которого откачивают воду, от жесткости и твердости вышележащих грунтов. Флюид, откачиваемый из рассматриваемого слоя путем уменьшения порового давления, может представлять собой воду, нефть или газ. Воду обычно берут из неглубоких слоев, сложенных довольно сильно сжимаемыми породами, а нефть и газ — из более глубоких слоев, имеющих меньшую сжимаемость. В соответствии с этим осадка грунта чаще наблюдается при выкачивании воды, чем при разработке нефтяных и газовых месторождений. Однако к значительному проседанию грунта может привести любой из таких процессов.

Оседание дневной поверхности может быть результатом любого процесса, при котором из грунта удаляется вода. Наблюдались смещения грунта, вызванные как естественным осушением местности, так и искусственным путем, например в окрестности печей для обжига кирпича или вблизи лесных полос. Деревья высасывают воду из грунта, испаряют и выделяют ее через листья. Осушение болот, для которых характерна значительная мощность сильно сжимаемых грунтов органического происхождения, может привести к очень большим смещениям дневной поверхности; именно по этой причине отдельные части области Фенс (в восточной Англии) опустились с начала прошлого века на 5—10 м.

Если говорить о смещениях меньшего масштаба, то из сказанного выше ясно, что опускание может возникнуть и в результате приложения поверхностной нагрузки вследствие

возрастания эффективного давления на нижележащие сжимаемые слои; постройка любого здания или сооружения приводит к некоторому движению поверхности.

При удалении твердого материала, в том числе при непосредственном извлечении породы из подземных выработок (при проходке шахт и туннелей), происходит другое явление. В этом случае напряженное состояние окружающих рыхлых или скальных пород изменяется, и вследствие этого породы испытывают как изменение объема, так и сдвиговые деформации. Как правило, постройка туннеля на небольшой глубине вызывает осадку грунта над ним. Однако если туннель или подземная выработка прокладываются в *некомпетентных породах* (т. е. в породах с очень слабым внутренним сцеплением, легко подвергающихся растрескиванию и дроблению) без надлежащего их укрепления, могут возникнуть и более серьезные последствия, а именно *обрушение кровли и целика*, при котором провалившаяся порода забивает туннель, а над ним остается полость. Материал, образующий стенки и кровлю этой полости, в свою очередь тоже обрушивается, так что возникшая щель распространяется кверху. Когда она достигает дневной поверхности, происходит окончательная резкая осадка грунта и образуется *каверна* (воронка), или *поглощающий колодец*. Последние стадии образования этой полости могут протекать довольно быстро, и часто мало что предвещает возникновение провала, особенно если туннель или подземная камера давно не используются и не контролируются горным надзором.

Сходный процесс развивается и в естественных условиях там, где под дневной поверхностью залегают известняковые образования. Известняки в какой-то мере растворимы в воде, а в жарком и влажном климате растворение их может протекать довольно активно. Вышележащие отложения прогибаются и затем обрушиваются в полости, образовавшиеся в известняках в результате растворения, при этом на поверхности возникают провалы и воронки. Там, где известняки занимают большую площадь, этот процесс создает характерные поверхностные формы, называемые *карстовым рельефом*, по названию местности в Югославии, где это явление широко развито. Обрушение поверхности отмечается также в вулканических областях над лавовыми трубками (см. гл. 2).

В некоторых типах почв и в мягких горных породах наблюдается явление иного рода. В разделах 1.2 и 4.6 описаны оползни, вызванные землетрясениями в Китае и развившиеся в лёссах. Лёсс — типичный пример мягких пород, так как его мелкие зерна образуют чрезвычайно рыхлую открытую текстуру, скрепленную минеральным цементом, растворимым в воде. Если лёссовые отложения, в сухом состоянии вполне прочные, твер-

дые и представляющие собой хорошее основание, подвергнуть переувлажнению, разбрызгивая или разливая воду по их поверхности, растворение цемента может привести к разрушению текстуры и просадке грунта. Поэтому такие материалы часто называют *просадочными грунтами*. Площадь просадки в этом случае четко ограничена участком затопления или увлажнения. Соседняя площадь в целом остается не нарушенной и обычно отделяется от площади опускания зияющими трещинами.

Лёссы — не единственный тип грунтов, в которых развивается этот процесс. В засушливых районах редко выпадающие дожди приводят к *внезапным наводнениям*, при которых вода быстро проносится по сухим прежде каньонам, долинам и оврагам (см. гл. 7). Вода подхватывает зерна сухого грунта и несет их во взвешенном состоянии, так что поток превращается в грязевой оползень или в грязевой поток, который широко растекается, достигнув нижней части долины, где наклон ее днища меньше. Материал не обязательно находится в водонасыщенном состоянии и может содержать сравнительно много воздуха, поэтому он образует отложения, которые при регулярном режиме наводнений, подходящем наклоне поверхности и соответствующей зернистости местных грунтов приобретают очень рыхлую текстуру. Из-за того что такие наводнения бывают нечасто, эти отложения не размываются, а накапливаются, достигая значительной мощности, как, например, вдоль западного борта долины Сан-Хоакин в южной Калифорнии, США. К образованию пористой текстуры грунта может привести, как полагают, и его промерзание. Когда такие отложения увлажняются при последующих ливнях или вследствие человеческой деятельности, их рыхлая текстура разрушается и могут образоваться воронки и кратеры проседания глубиной в несколько метров. Процесс, происходящий в таких материалах, обычно называется *гидроуплотнением*.

Помимо региональных подвижек, возникающих при землетрясениях, сейсмические колебания производят также местное воздействие, характер которого зависит от типа грунтов. Если грунт достаточно рыхлый и находится либо в сухом, либо в водонасыщенном состоянии, то при сотрясениях может произойти его уплотнение и, как обычное следствие этого, осадка. В случае водонасыщенного грунта колебания могут привести и к более тяжелым последствиям — к разжижению, которое вызывает серьезные разрушения зданий и сооружений, расположенных на таком грунте. Конечным результатом этого процесса, после того как избыточное поровое давление рассеется, опять-таки будет осадка дневной поверхности.

Один из завершающих механизмов, который необходимо здесь рассмотреть, приводит не к опусканию дневной поверхности,



обычному следствию изменения условий в горных породах, а к поднятию или вспучиванию грунта — явлению, которое часто встречается в засушливых районах мира в грунтах, содержащих минерал монтмориллонит. Частицы монтмориллонитовых глин имеют чрезвычайно малые размеры и пластинчатую структуру и способны вбирать в себя большое количество воды. Соответственно, если грунт, содержащий некоторую долю монтмориллонитовой глины, находится в сухом состоянии и вода поступает к нему доступ, то глина, поглощая воду, будет увеличиваться в объеме и вспучиваться, в результате чего произойдет поднятие дневной поверхности.

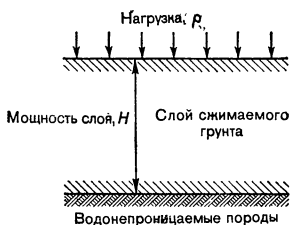
В общем случае из-за того, что грунты неоднородны, а степень поглощения (абсорбции) воды меняется от одного места к другому, поднятие редко бывает одинаковым на всем участке строительства и могут возникнуть дифференцированные движения, достаточные для того, чтобы повредить здание или сооружение. Случается, что в районе, где грунты обладают способностью вспучиваться, строят дома. Если присутствие таких глин вовремя не обнаружено, то это явление проявится только тогда, когда строительство будет закончено, жители поселятся в домах и начнут поливать сады и огороды или пользоваться сточными ямами. Проникновение воды в грунт вызовет его вспучивание, в результате чего произойдет неравномерное поднятие и растрескивание фундаментов домов и вследствие этого разрыв различных коммуникаций, что в конечном счете может привести к полному разрушению домов.

## 5.2. Анализ оседания грунта

В ряде случаев, например тогда, когда опускание дневной поверхности обусловлено тектоническими движениями, анализ этого опускания не может помочь решению проблемы. В частности, те районы Земли, в которых идет изостатическое выравнивание, сравнительно хорошо известны, и едва ли появятся новые такие районы в пределах того времени, которое представляет интерес для человечества. В районах, где происходит изостатическое поднятие, его скорость измерена и может быть учтена в той мере, в какой это важно для строительства, но изменить этот процесс человечество не в состоянии.

Таким образом, рассмотрение методики анализа ограничено здесь изучением тех видов опускания или просадки грунта, которые связаны с человеческой деятельностью; такие важные характеристики, как время, количественные величины и свойства вещества, обычно можно считать известными.

**Поверхностная нагрузка; уплотнение грунта.** Для простоты проанализируем здесь только случай одностороннего сжатия слоя при дополнительной нагрузке; в литературе, перечисленной в конце этой главы, рассматриваются более сложные задачи, о двух- и трехстороннем воздействии, решаемые путем анализа. На фиг. 5.1 показан сжимаемый водонасыщенный слой грунта мощностью  $H$ , залегающий на поверхности водонепроницаемых пород. Грунт обладает хорошей сжимаемостью по сравнению с породами водоупора, и можно считать, что осадка поверхности не будет следствием нагрузки на подстилающую толщу. Задача, как правило, делится на две части: 1) определение полной величины сжатия грунтового слоя, которое возникнет как конечный результат дополнительной нагрузки  $p$ , обусловленной, например, сооружением насыпи из уплотненного грунта на всей площади исследуемого участка; 2) расчет того, как такое сжатие будет развиваться во времени.



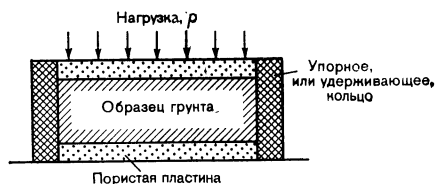
Фиг. 5.1. Осадка и уплотнение слоя грунта.

Величина полного сжатия представляет собой произведение сжимаемости слоя, его мощности и нагрузки  $p$ . То, как осадка возрастает до своей конечной величины, связано не со сжимаемостью грунта, а с другим его свойством. Для сжатия грунта необходимо, чтобы вода вышла из него, т. е. не должно быть препятствий оттоку избыточной воды. Скорость процесса зависит от быстроты движения воды через грунт и от наличия границ, через которые возможен дренаж. Способность грунта пропускать воду называется его *проницаемостью*; эта величина зависит в первую очередь от размера зерен материала. Такие крупнозернистые грунты, как хорошо отсортированный песок или гравий, обладают высокой проницаемостью, и вода может уходить из них сравнительно быстро. Таким образом, если слой грунта, показанный на фиг. 5.1, представляет собой песок или гравий, приложение нагрузки  $p$  немедленно повысит в нем поровое давление, но оно быстро рассеется в результате дренажа через поверхность. При мощности слоя ( $H$ ) в диапазоне от сантиметров до десятков метров время полного рассеяния будет меняться от нескольких секунд до нескольких минут. Таким

образом, осадка поверхности будет происходить одновременно с увеличением нагрузки.

С другой стороны, в глинистых и илистых грунтах проницаемость может быть чрезвычайно низкой, и избыточная вода уходит из них очень медленно. В случае таких мелкозернистых материалов осадка в слоях мощностью несколько метров достигает своей конечной величины только через месяцы или годы после приложения нагрузки. Время, необходимое для достижения уровня осадки, близкого к конечному, прямо пропорционально сжимаемости грунта, квадрату мощности слоя или дренажного пути (трассы дренажа) в слое глины и обратно пропорционально его (грунта) проницаемости. Процесс постепенного сжатия грунта под нагрузкой называется *уплотнением*.

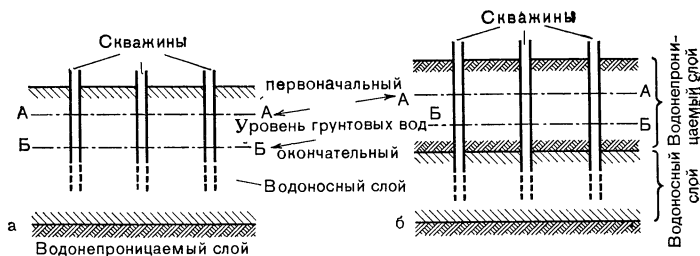
Если слой грунта, показанный на фиг. 5.1, лежит не на непроницаемой породе, а подстилается слоем более грубозернистого песка или гравия, через который вода также может дренироваться из сжимаемого слоя, длина дренажного пути сокра-



Фиг. 5.2. Схема испытания на уплотнение.

щается вдвое. В этом случае осадка поверхности или уплотнение слоя происходит вчетверо быстрее, так как продолжительность процесса зависит от квадрата дренажного пути.

Чтобы подсчитать величину и скорость развития осадки, необходимо отобрать образцы грунта из сжимаемого слоя и подвергнуть их испытанию на линейное уплотнение, как это показано на фиг. 5.2. Образцы берутся из керна буровых скважин и имеют дискообразную форму; их обычные размеры: диаметр 6,5 см, толщина 2 см. Эти пластинки грунта помещают в установку уплотнения, а сверху и снизу образец закрывают пористыми керамическими пластинками, насыщенными водой. Образец подвергают небольшой вертикальной нагрузке и измеряют скорость и конечную величину сжатия (обычно через сутки после начала опыта). Производится последовательное увеличение нагрузки, и каждый раз измеряется скорость сжатия и его конечное значение, пока нагрузка не достигнет величины, несколько большей, чем то давление, которое будет в конечном счете приложено к поверхности грунта. Ввиду изменчивости свойств грунта обычно испытывается столько образцов, чтобы можно было получить средние или представительные значения для всего слоя. В результате этих испытаний определяются



Фиг. 5.3. Извлечение воды или нефти через скважины из открытых и закрытых слоев.

сжимаемость грунта и характеристики его поведения во времени при том диапазоне давлений, который представляет интерес для изучения.

**Извлечение флюидов.** На фиг. 5.3 показаны два типичных упрощенных разреза горных пород, показывающих условия извлечения флюидов из-под земной поверхности. На фиг. 5.3, *a* представлен проницаемый слой, залегающий на непроницаемом материале и содержащий жидкость, уровень которой до начала откачки соответствовал линии АА. Обычно эта схема отражает положение, при котором производится откачка воды. На фиг. 5.3, *б* показан проницаемый слой (например, *водоносный горизонт*), содержащий флюид и ограниченный сверху непроницаемой толщей, через которую для извлечения флюида необходимо пробурить скважины. Такая схема разреза часто встречается при откачке воды и почти всегда соответствует условиям добычи таких флюидов, как природный газ или нефть. На фиг. 5.3, *a* водоносный слой *открыт* сверху, на фиг. 5.3, *б* он *закрыт*. Во втором случае флюид в проницаемом слое находится под некоторым давлением, так что когда в этом слое пробуривается скважина, уровень жидкости поднимается в ней до положения, показанного на фиг. 5.3, *б* линией АА. Если этот уровень оказывается выше дневной поверхности, то такие условия называются *артезианскими*; скважина будет фонтанировать. Если же этот уровень ниже дневной поверхности, то для извлечения флюида требуется откачка. Результатом откачки будет понижение уровня (или давления) флюида до положения, показанного на обеих схемах фиг. 5.3 линией ВВ.

Уменьшение флюидального давления повышает эффективные напряжения в слое, из которого извлекается флюид. В случае, показанном на фиг. 5.3, *a*, эффективное напряжение возрастает по двум причинам: во-первых, потому, что в нижних частях, где материал все еще остается водонасыщенным, возрастает *полное*

напряжение, что связано с переходом материала, находящегося между уровнями *АА* и *ББ*, из плавучего состояния в такое, когда вся его тяжесть давит на нижележащую зону; во-вторых, вследствие понижения порового давления в нижележащем материале. Возрастание эффективного напряжения приводит к тому, что ниже уровня *АА* материал сжимается. Обычно грунт, из которого удаляется вода, бывает сравнительно проницаем, поэтому и получается, что смещение дневной поверхности следует за понижением зеркала грунтовых вод непосредственно и немедленно. В этих случаях откачку прекращают, и естественный приток грунтовых вод возвращает их уровень от положения *ББ* к положению *АА*. Поведение большинства зернистых грунтов необратимо: подвергшись сжатию, они при снятии напряжений не расширяются или расширяются в очень малой степени. Поэтому повышение уровня грунтовых вод не приводит дневную поверхность в ее прежнее положение, в лучшем случае это только останавливает ее осадку.

В той обстановке, которая изображена на фиг. 5.3, б и которая возникает в результате откачки воды, нефти или газа, при удалении воды не происходит изменения полного напряжения в системе, так как присутствие непроницаемого верхнего слоя заставляет проницаемый слой оставаться полностью водонасыщенным. В этом случае понижение порового давления, обусловленное понижением эффективного напора жидкости от уровня *АА* к уровню *ББ*, вызывает соответствующее увеличение эффективного напряжения, и в результате слой, содержащий флюид, сжимается. Повышается эффективное напряжение и в ограничивающем (запирающем) слое, и он также сжимается, хотя и медленнее, так как его материал обычно мелкозернистый.

Скважины на воду обычно пробуривают в водоносные слои, находящиеся на глубинах десятков или сотен метров от дневной поверхности, и понижение зеркала подземных вод оказывает как мгновенное, так и постепенное действие, связанное с присутствием мелкозернистых грунтов. Извлечение нефти и газа производится обычно из слоев, находящихся в сотнях и тысячах метров от дневной поверхности. Проницаемые участки, в которых скапливаются нефть и газ, имеют, как правило, сложную структуру, так что анализ смещений поверхности, вызванных добычей нефти и газа, является трудной задачей. По мере того как нефть, газ или вода выкачиваются из недр в условиях, показанных на фиг. 5.3, б, флюидальное давление в продуктивной зоне понижается и количество добываемого флюида уменьшается. Иногда для того, чтобы повысить добычу или чтобы остановить проседание поверхности грунта, по краям нефтяного промысла производят закачку воды под землю, тем самым нагнетая давление в продуктивной зоне. Из-за необратимого поведения

зернистых материалов, упомянутого выше, это нагнетание не ведет к поднятию дневной поверхности и служит только для задержки ее опускания.

**Другие механизмы.** В разделе 5.1 был рассмотрен ряд процессов, приводящих к опусканию дневной поверхности, среди них удаление материала при проходке подземных выработок и туннелей, насыщение сжимаемых материалов водой и колебания грунта. В целом методы расчета для установления величины осадки, вызванной этими процессами, используются не так широко, как в случаях, описанных раньше. Особенно трудно рассчитать эффект на поверхности от проходки туннелей, в частности, потому, что он зависит от свойств материала, неизвестных условий проходки и от площадного или объемного характера задачи. Прочность крепления туннеля во время его сооружения оказывает важное влияние на напряжения и смещения, возникающие в окружающем материале.

Оценка величины уплотнения, которое происходит в блоке грунта определенного профиля в результате сейсмических колебаний, промышленных вибраций или в результате водонасыщения, может быть сделана на основе полевых или лабораторных испытаний. Для опытов по вибрационному уплотнению образцы грунта отбираются с разных глубин и, насколько это возможно, в ненарушенном состоянии; они подвергаются лабораторным испытаниям на вибрацию, позволяющим установить максимальное изменение плотности или объема, которое может выдержать материал. Оценивается интенсивность колебаний, которые могут возникнуть в природных условиях, и на основании всех этих соображений вычисляется величина ожидаемого опускания поверхности. Невозможно, конечно, провести такое контрольное полевое испытание, в котором грунт подвергся бы столь же сильным колебаниям, как при настоящем землетрясении.

### **5.3. Обнаружение проседания грунта и воздействие на этот процесс**

Процессы, вызывающие опускание поверхности грунта, протекают почти незаметно, и нередко они в течение долгого времени не вызывают подозрений об опасности. Поэтому чаще всего сведения о первых замеченных на поверхности явлениях поступают от бригад, обслуживающих шоссейные и железные дороги, и от домовладельцев. Дорожные бригады отмечают, что смещаются топографические реперы и другие закрепленные точки, а позднее, что отдельные отрезки дороги требуют необычно больших затрат на текущий ремонт; владельцы домов замечают

трещины, появляющиеся на асфальтированных дорожках и в стенах гаражей и домов. Точные данные о величине опускания и размерах захваченной им площади получают путем повторных топографических съемок и нивелирования; обычно этим занимаются наблюдатели, работающие в какой-нибудь правительственной организации. Измерения, проводимые на каждой опускающейся площади, должны привязываться к реперам или к памятникам, отстоящим достаточно далеко от этой площади, чтобы не быть затронутыми опусканием. В случае, если смещение поверхности вызывается крупными землетрясениями или интенсивной добычей флюидов, это требует очень значительных усилий и обычно связано с необходимостью частых повторных наблюдений на профилях длиной многие сотни и даже тысячи километров. При съемках в районах добычи флюидов решается, очевидно, очень трудная задача: определить, как изменяется поверхность, и увеличивается ли опускание со временем.

Не удивительно, что многие случаи проседания грунта остаются незамеченными. Зачастую невозможно ответить на вопрос, является ли опускание поверхности характерной чертой естественного развития данной области или оно представляет собой следствие, например, откачки воды, нефти или газа в определенном районе. Когда опускание обнаруживается по видимым поверхностным эффектам, то оказывается, что вызывающие его процессы идут уже долгое время. Поэтому для детального исследования движений поверхности необходим анализ результатов съемок, выполненных много лет назад и, как правило, с меньшей точностью, чем требовалось бы. Это станет яснее, если учесть, что величина опускания бывает обычно порядка 1—2 м на расстояниях в десятки километров, и развитие этого процесса происходит в течение нескольких лет.

Детальный анализ развития каждого отдельного участка опускания требует кропотливой работы по сопоставлению съемок, проведенных в разное время различными предприятиями и ведомствами; результаты соответственно бывают весьма неопределенными.

Там, где осадка грунта вызывается тяжестью построенных зданий, обычно производятся расчеты, призванные показать, не приведет ли дальнейшая неравномерная осадка к возникновению излишних напряжений в конструкции. Если новое здание намечается построить среди уже существующих, необходимо также проверить, не окажут ли те смещения, которые возникнут во время строительства и после его окончания, вредного воздействия на соседние старые постройки. Эти смещения появляются, как правило, под тяжестью нового сооружения, но они могут возникнуть и при движении временных подпорных стенок котлована к его центру, если выемка грунта проведена неправильно.

Возможны также уплотнение и осадка грунта на участке, смежном с котлованом, из-за того, что его вертикальные стенки становятся новой дренажной поверхностью для грунтовых вод. Отток воды к этой поверхности способствует падению порового давления и соответственно повышению эффективных напряжений, ведущему к сжатию грунта.

Там, где ожидается осадка здания, обычно проводятся периодические измерения высоты закрепленных точек, расположенных внутри интересующего сооружения и вокруг него. Незначительные изменения высоты можно обнаружить с помощью специальных уровнемерных приборов — гидронивелиров. Когда осадка имеет особо важное значение или достигает величины, критической для устойчивости строящегося здания или соседних построек, в качестве реперов используют трубы, помещаемые в скважинах, которые пробуриваются до коренных пород. Репер представляет собой трубу или стержень, которые защищены от подвижек грунта внешней трубой, помещенной в скважину. Внутренняя труба укрепляется в коренных породах цементом.

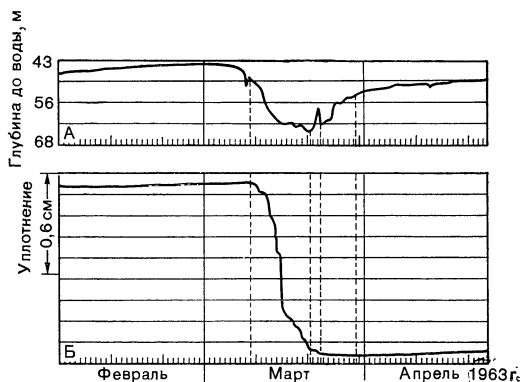
Иногда требуется узнать, какую роль играет в осадке каждый слой горных пород, слагающих разрез. В этом случае указатели внутренней трубы и оболочки можно закрепить в уплотняющемся материале на различных уровнях. Разность величин опускания между показаниями реперов, укрепленных на различных глубинах, даст величину сжатия слоя, находящегося между ними. В долине Сан-Хоакин (Калифорния) вода откачивалась из разных горизонтов, при этом наблюдалась осадка дневной поверхности (см. раздел 5.4). Чтобы определить величину сжатия в каждом водоносном слое и в окружающих породах, анкерные устройства датчиков закреплялись у основания внешних труб, помещенных в скважины, которые были пробурены до разных глубин (самая глубокая до 700 м). От анкеров к устьям скважин протягивался тонкий многожильный кабель из нержавеющей стали; натяжение кабеля осуществлялось противовесом. Непрерывно работавший самописец регистрировал опускание, получая сигналы по проводам, прикрепленным к кабелю. Регулируя уровень воды в соседних скважинах, можно было установить величину опускания, непосредственно связанную с изменением уровня воды или ее давления в каждом водоносном слое. На фиг. 5.4 показана типичная запись уровня воды и связанного с ним опускания поверхности. На этой записи видно, как влияют на величину уплотнения грунта изменения скорости откачки воды.

Воздействовать на движения земной коры, обусловленные тектоническими процессами, конечно, нельзя. Для неустойчивых или особенно важных сооружений, которые необходимо разместить в сейсмичных районах, можно принять только некоторые



меры предосторожности (пассивные). При проектировании ядерной электростанции, размещаемой на морском побережье, можно оценить то влияние, которое окажет на ее работу, например, опускание дневной поверхности на несколько метров относительно уровня моря. Вода для охлаждения агрегатов станции берется из моря и возвращается в него же; таким образом, изменение высоты размещения станции повлияет на циркуляцию воды в системе ее охлаждения. Это соображение не связано с вопросом о поведении электростанции при сильном землетрясении или о мерах ее защиты от цунами (см. раздел 1.5) и относится главным образом к проблемам работы станции в период после землетрясения.

Когда полевые исследования и анализ указывают на то, что постройка того или иного здания, насыпи или плотины вызовет



Фиг. 5.4. Опускание поверхности на площади Туларе — Уоско, Калифорния.

Уплотнение грунта и восстановление после деформации, наблюдавшиеся в районе Пиксли. А — изменение уровня воды в скважинах; Б — уплотнение грунта.

общую осадку более чем на 1—2 см, принимаются меры предосторожности. Иногда в основание сооружения забиваются сваи, входящие до более прочного слоя. В других случаях сооружения располагают на глубоком фундаменте, так чтобы вес вынутого грунта соответствовал весу здания; из-за сходства этой обстановки с плавучестью корабля такое решение задачи называется устройством *плавающего (висячего) основания*. Перед началом строительства можно создать нагрузку на грунт и вызвать тем самым осадку примерно такой же величины, которую дало бы построенное здание. Это обычно делается путем насыпания грунта в виде валов или холмов; после того как необходимый эффект получен, грунт удаляют и начинают строительство. Уплотняющее действие таких насыпей иногда можно усилить устройством колодцев или скважин для понижения уровня грунтовых вод; механизм этого явления описан раньше.

В случае необходимости можно так сконструировать сооружение, чтобы при значительной осадке сохранялось бы его

безопасность и работоспособность. Для этого надо сделать постройку либо чрезвычайно жесткой, чтобы она оседала как единое целое, без дифференциальных смещений, либо очень гибкой, чтобы в отдельных элементах конструкции при осадке не возникало сильных напряжений. Для ядерной электростанции следует использовать жесткую конструкцию, а для склада, в котором грузы (например, бумага или стальные листы) укладываются штабелями, — очень гибкую. Смещения, которые возникают в последнем случае, можно, как правило, свести к минимуму путем периодического выравнивания настила.

Из-за того что сжатие в слое грунта, возникающее в результате нагрузки или удаления воды, необратимо, оседание больших участков поверхности, развивающееся при определенных условиях (например, при откачке воды или нефти), можно только приостановить; направить процесс в обратную сторону нельзя. Сжатие вызывается падением флюидального давления; когда это давление стабилизируется или поднимается, осадка прекращается. В различных районах для остановки или замедления осадки грунта применялся метод *нагнетания давления* в уплотненных участках. Давление можно поднимать или поддерживать, например, путем закачки воды по периферии нефтяного поля. Помимо того, что она замедляет или прекращает опускание поверхности, закачка воды способствует увеличению добычи нефти. Прекращение осадки при подъеме уровня грунтовых вод хорошо видно на фиг. 5.4.

#### 5.4. Описание отдельных случаев оседания дневной поверхности

**Фенноскандия; озеро Бонневиль, Юта (США).** При последнем оледенении весь Скандинавский полуостров был покрыт ледяным панцирем, толщина которого равнялась примерно 2 км, а диаметр 1600 км. Оледенение продолжалось примерно 7—10 тыс. лет — достаточно долго для того, чтобы на площади, занятой льдом, земная кора прогнулась и чтобы этот процесс отразился на движениях коры на расстоянии многих километров от края этой площади. Если бы нагрузка сохранялась достаточно долго и было достигнуто равновесие, то в результате лед и поддерживающая его кора должны были бы плавать на поверхности жидкой мантии на некотором уровне равновесия — подобно тому как корабль держится на воде.

Однако представляется вероятным, что ледяная нагрузка существовала не так долго, и равновесие достигнуто не было. Подсчитано, что к моменту, когда ледники начали отступать, максимальное прогибание площади подо льдом составляло около

250 м по сравнению с нынешним положением. Удаление льда знаменовало начало медленного возвращения прогнутой части коры к новому равновесию, этот процесс не завершился до сих пор.

Эффект погружения или поднятия коры проявляется во всех тех местах, где действует (или действовала) нагрузка или где она снимается (снята). Величина изменения высот и, следовательно, чувствительность коры к изменению нагрузки зависят от величины этой нагрузки и от размера площади, к которой она приложена. Вероятно, кора приходит в движение там, где размер такой площади превышает толщину коры, составляющую в разных частях мира от 15 до 50 км. Таким образом, любые природные образования или искусственные сооружения диаметром 50 км или больше, существующие не менее десятка лет, уже дают эффект, поддающийся измерению современными методами. При повторном нивелировании, выполняемом периодически через небольшое количество лет, удастся выделить вертикальные смещения порядка одного сантиметра на расстояниях порядка 100 км.

В мире имеется некоторое количество созданных человеком озер, достаточно больших, чтобы вызвать заметные изменения высот. Такие движения обнаружены у озера Мид в Аризоне (величина прогибания за 15 лет составила 18 см) и у озера Кариба (Замбия), но и ряд других резервуаров, таких, как Братское водохранилище (СССР) и озеро Вольты (Гана), также достаточно велики, чтобы произвести такой же эффект. Осушение польдеров залива Зейдерзе (Эйсселмер) (см. раздел 7.4) в Нидерландах вызвало, вероятно, некоторое поднятие.

Хорошо изучена естественная структура площади вокруг Большого Соленого озера (штат Юта), где измерены изменения высоты поверхности. Эта площадь раньше представляла собой значительно более крупное озеро, которому дано название «озеро Бонневиль». В течение многих тысяч лет скорость испарения из этого озера превышала приток воды из водосборного бассейна, так что озеро постепенно сокращалось в размерах. В этом случае уменьшение нагрузки воды приводило к развитию восходящих движений коры. Скорость этих движений, измеренная путем тщательных съемок, составляет в нашу эпоху около 20 см за столетие. В прежние эпохи, судя по положению и возрасту поднятых террас, эта скорость была несколько выше. Движения такой величины в районах водохранилищ и в районах, подобных озеру Бонневиль, расположенных далеко от моря, не представляют, вероятно, геологической опасности.

Погружение коры, несомненно, связано также с крупными бассейнами активного осадконакопления. Однако скорость отложения материала бывает 0,3 м или меньше за 1000 лет, так что

опускание должно происходить чрезвычайно медленно и может вуалироваться последовательным уплотнением самих осадков.

**Поверхностная нагрузка: падающая Пизанская башня (Италия).** Если грунт основания представлен крупнозернистыми песками и гравием в сравнительно плотном состоянии, величина вертикального смещения при постройке любого обычного сооружения бывает порядка сантиметра или меньше и вследствие высокой проницаемости таких материалов изменения происходят сразу же после приложения нагрузки. При проектировании строительства такую осадку, как правило, можно легко учесть. Однако возведение крупного здания на кровле толстого слоя сжимаемых глин может вызвать осадку в 1 м или больше, и развитие ее может происходить в течение десятков или сотен лет.

Поскольку механика уплотнения и осадки грунта стала более или менее ясной только в 20-е или 30-е годы нашего столетия, существует целый ряд известных зданий, построенных еще до того, как эти сведения были накоплены; из таких зданий наиболее знаменита падающая башня в Пизе (Италия). Строительство кафедрального собора, для которого эта башня должна была служить колокольней. Строительство колокольни на таком удалении от собора можно считать свидетельством того, что некоторые строители знали о сложностях, связанных со строительством на грунте, слагающем эту площадь, так как и сам собор, построенный на 100 лет раньше, несет на себе явные следы значительной дифференциальной осадки и следовавшего за ней ремонта.

Спустя некоторое время после начала строительства был замечен наклон башни, и работы были остановлены на так называемом «уровне 1185 года» — чуть выше третьей галереи. Башня стояла в таком виде почти 100 лет, вплоть до 1274 г., когда работы возобновились. Потребовалось еще 10 лет, чтобы довести здание до седьмого яруса, оставалось построить уже немного: только один самый верхний ярус и шатер для колоколов, но оказалось, что наклон башни заметно усилился, и работы пришлось снова остановить. К этому времени, по имеющимся оценкам, вертикальная проекция карниза седьмого этажа отклонилась от основания башни почти на метр. К 1350 г., когда это отклонение превысило уже 1,5 м, закончились продолжавшиеся 5 лет работы по сооружению колокольного шатра, или галереи, и строительство было наконец завершено.

Наклон башни продолжал увеличиваться; в настоящее время отклонение карниза седьмого этажа составляет чуть больше 5 м и все еще увеличивается со скоростью около 0,02 мм в год. При высоте башни 59 м (от подошвы фундамента) угол ее наклона составляет почти 5°. Каждый раз, когда строительство возоб-

новлялось, делались попытки выпрямить башню, так что в своем окончательном виде она имеет слегка изогнутую форму («форму банана») — как дерево, растущее на медленно оползающем склоне. Еще одна особенность Пизанской башни, на которую обращают внимание гораздо реже, — это то, что со времени постройки она осела в среднем на 2 м и вход в нее сейчас расположен на 2 м ниже поверхности земли.

Причиной наклона башни считается присутствие в субстрате 2-метрового слоя сжимаемой глины, кровля которого располагается всего лишь на полметра ниже массивного фундамента башни. Глина залегает на 4-метровом слое песка, который в свою очередь лежит на более мощных глинистых отложениях. Первоначально фундамент был заложен на глубине всего лишь 2 м от поверхности — слишком мелко для такого тяжелого здания. В результате наклона башни давление на грунт в пониженной части площади возросло, а с противоположной стороны уменьшилось. Максимальное давление составляет в настоящее время  $9,8 \text{ кг/см}^2$ , минимальное  $2,7 \text{ кг/см}^2$ . В области больших напряжений происходит более сильная осадка, и поэтому движение башни, как и раньше, увеличивает ее неустойчивость.

По-видимому, основание башни частично утратило несущую способность уже на ранних стадиях строительства, возможно, из-за сколов в тонком слое глины и в подстилающих песках. Это сразу же должно было вызвать резкий наклон. Строители могли его заметить, и именно этот наклон был, вероятно, причиной первой остановки работ. С течением времени избыточное поровое давление рассеялось, глина под нагрузкой стала плотнее и прочнее, так что она могла выдерживать возрастающее давление в начале второй стадии строительства. Очевидно, это было самое тревожное время, так как вскоре скорость наклона и осадки стала возрастать. Примерно ко времени постройки 5-го этажа, в 1278 г., основание башни потеряло прочность, и все сооружение едва не обрушилось. Этого не произошло только из-за чрезвычайно медленного продвижения строительства, в результате чего в глине осуществлялись дренаж и уплотнение, и под действием увеличивающейся нагрузки глина снова приобрела необходимую прочность. Продолжающиеся ныне движения являются, вероятно, следствием вязкого течения или ползучести в подстилающих грунтах при сравнительно постоянном объеме и под действием очень высоких напряжений.

Ряд других средневековых башен в Италии и в других местах также наклонены, но меньше, чем Пизанская.

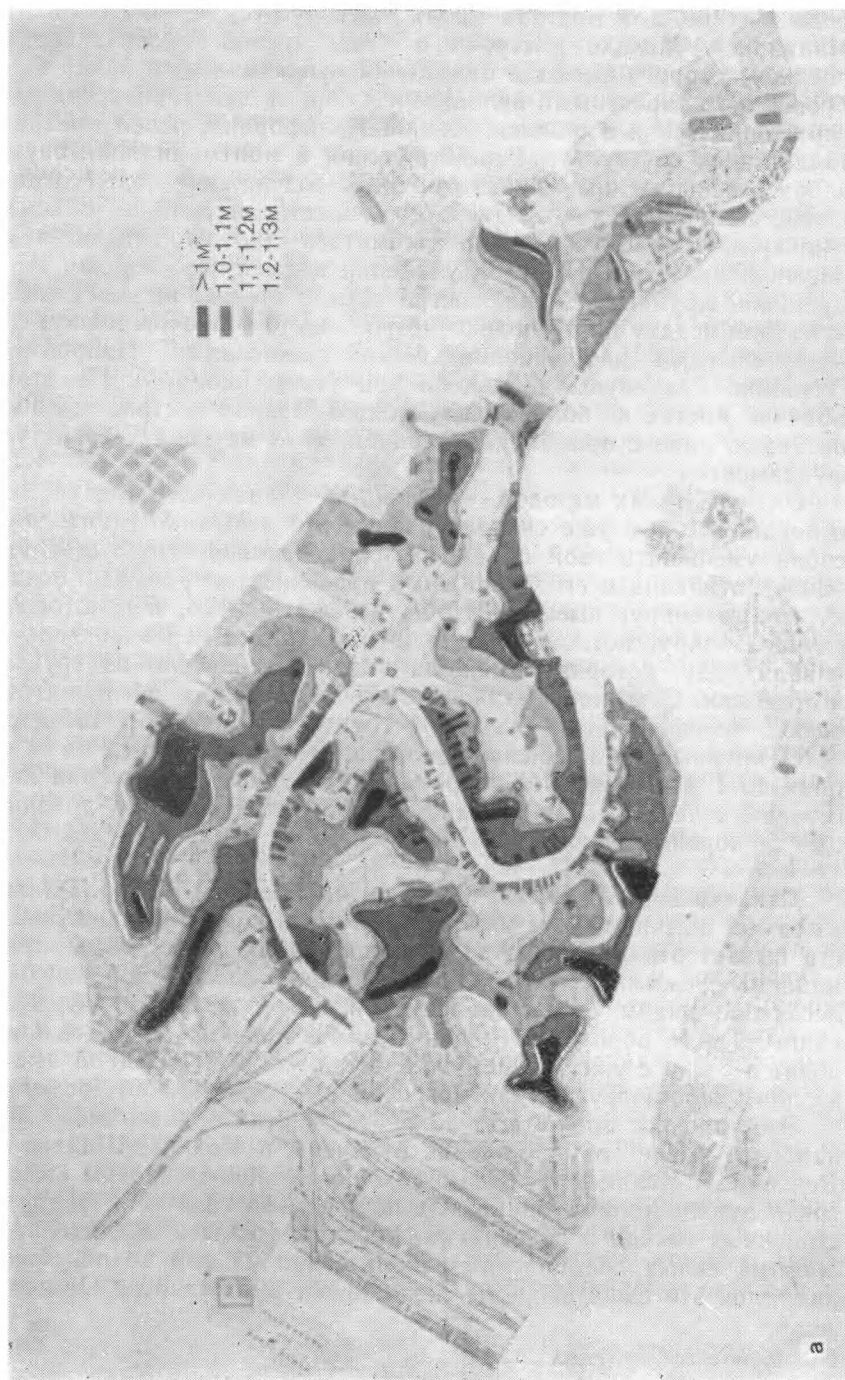
Проблемы осадки грунта, показанные на примере истории Пизанской башни, часто возникают во многих районах мира — всюду, где под крупными городами залегают мощные пласты сравнительно мягких глин. Это характерно, например, для го-

рода Мехико, для Бостона (штат Массачусетс) и Чикаго (штат Иллинойс). Мехико построен в чаше древнего озера, среди осадков которого имеются отложения вулканического пепла, выброшенного окрестными вулканами во время доисторических извержений. Как и в районах южной Калифорнии, пепел превратился здесь в результате выветривания в монтмориллонитовую глину, имеющую чрезвычайно высокое содержание воды (отношение веса воды к весу твердого вещества в единице объема глины) и способную сильно сжиматься либо под действием внешней нагрузки, либо при удалении воды путем откачки или дренажа. Крупные здания, построенные в Мехико на этой глине, испытали осадку на несколько метров, часто сопровождавшуюся значительными дифференциальными движениями. Например, Базилика Гваделупы наклонена под углом около  $5^{\circ}$ . По этой причине многие из более новых зданий Мехико построены либо на сваях, либо с применением современных методов устройства фундаментов.

Один из таких методов — устройство плавающего (висячего) основания, о чем уже сказано раньше, но в Мехико глина способна уменьшать свой объем настолько сильно, что существование котлована и его дренажных поверхностей вызывает осадку грунта вокруг выемки. Чтобы избежать этого, в некоторых случаях вокруг котлована делали скважины и через них закачивали воду, которая замещала воду, вытекавшую из грунта в котлован. С помощью такого способа удавалось воспрепятствовать периферийному оседанию грунта. В Бостоне (Массачусетс) крупные здания испытывали за 20—30 лет осадку на глубину до 1 м, и наиболее современные крупные сооружения построены теперь на сваях длиной приблизительно 35 м, достигающих до коренных пород.

**Откачка воды: Мехико, Мексика, и Венеция, Италия.** Одной из самых обычных, хотя и скрытых причин опускания поверхности бывает откачка воды из скважин, пробуренных в водопроницаемые, сжимаемые породы или в проницаемые породы, залегающие рядом с непроницаемыми, но сжимаемыми слоями глины. Таким образом, откачка воды из скважин и колодцев приводит в связи с уплотнением материала как к мгновенной осадке поверхности грунта, так и к осадке, растянутой во времени.

Этот процесс происходит во многих частях земного шара, но наиболее яркие его проявления отмечены в Мехико, Шанхае и Венеции. В Мехико, грунтовые условия которого описаны выше, среди вулканогенных глинистых пород имеются и слои водонасыщенных песков и галечников. Городские власти и владельцы промышленных предприятий использовали их для водоснабжения: слои эти были вскрыты скважинами и колодцами. Откачка



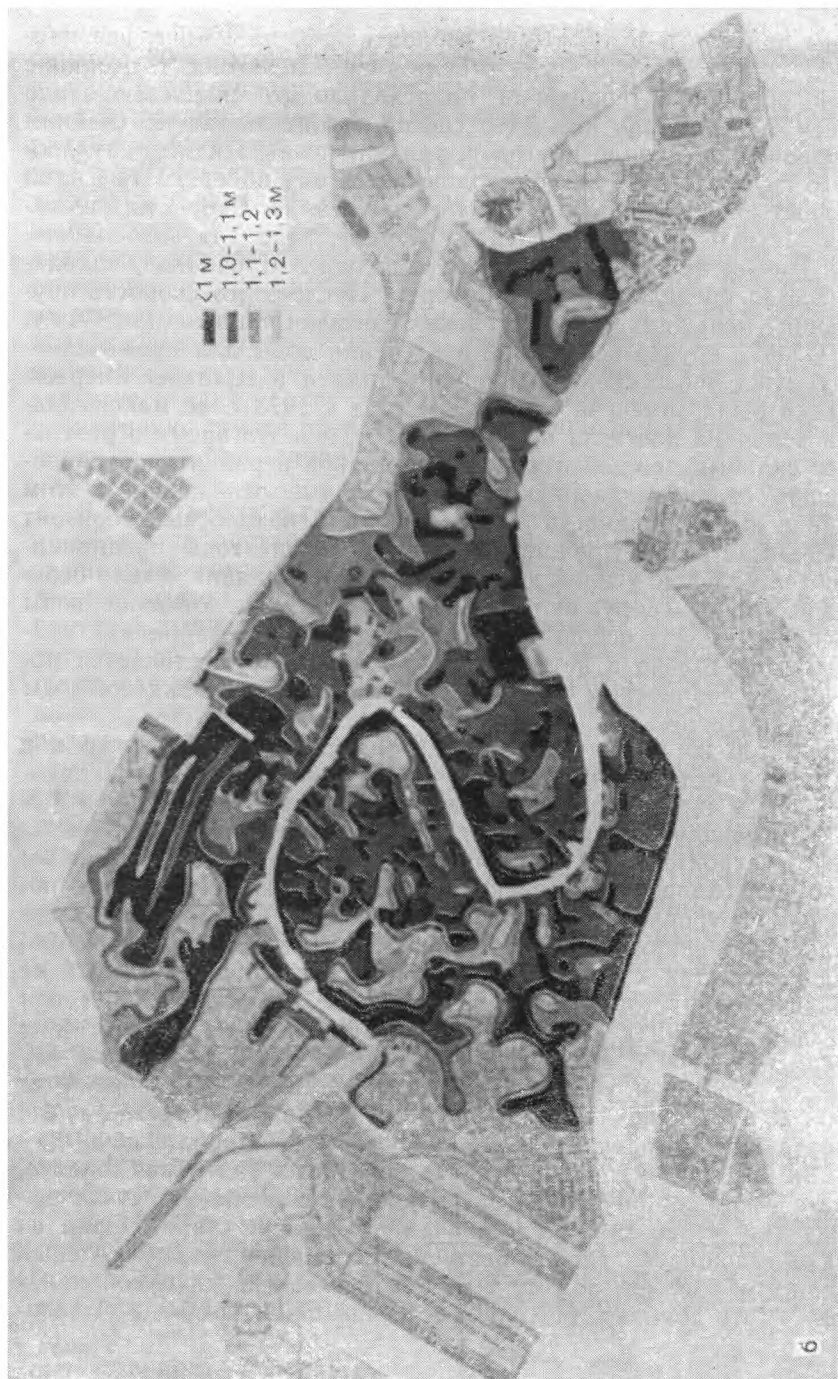


Фото 5.2. Районы Венеции, затопляемые при высоком уровне моря.  
а — в 1908 г., б — в 1961 г. (Р. Colombo, Rivista Italiana di Geotechnica, 6, 7-30, Marzo 1972).



воды привела к тому, что за период с 1880 до 1970 г. вся площадь города Мехико осела в целом на 7 м; в 1952 г. оседание этой обширной территории происходило со скоростью около 30 см в год. Стало ясно, что способ строительства на свайном основании не вполне пригоден, так как из-за осадки окружающего грунта здание как бы поднимается над поверхностью с той скоростью, с какой происходит ее опускание. Скорость опускания Мехико не уменьшалась до тех пор, пока для водоснабжения города не стали использовать воду из источников, находящихся за пределами его территории. После этого скорость опускания уменьшилась до нескольких сантиметров в год (в 1974 г.).

Осадка грунта вследствие извлечения воды для промышленных нужд через скважины происходила и в Шанхае. Впервые осадка была замечена около 1921 г., а к 1973 г. ее максимальная величина достигла примерно 2,4 м, и в это время в результате сильных дождей и высоких приливов в районе порта произошло сильное наводнение. Четвертичные отложения в этом районе имеют мощность 300 м, а первый водоносный горизонт располагается на глубине 75 м. В последние годы предпринимаются большие усилия для прекращения оседания: вдоль береговой линии сооружаются подпорные стенки, откачки воды (используемой в основном для охлаждения на фабриках) производится только в летнее время, а зимой осуществляется пополнение водоносных слоев путем закачки в них дождевой воды через скважины.

По той же причине происходит опускание поверхности и в Венеции, но в этом случае откачка воды производится главным образом в окружающих ее промышленных районах. Если в Мехико опускание поверхности доставляет много беспокойства в смысле строительных и технических затруднений, то в Венеции такое опускание означает катастрофу, так как весь город построен на уровне моря. Опускание дневной поверхности развивалось в Венеции со скоростью около 1 см в год и все еще продолжается, так как решение проблемы водоснабжения пока не найдено. В настоящее время отдельные районы Венеции при высоких приливах затопляются (см. раздел 7.4), а сочетание таких приливов с неблагоприятными погодными условиями вызывает огромный ущерб. Изменение обстановки за период от 1908 до 1961 г. показано на фото 5.2, где можно увидеть разные очертания площадей, затопляемых при высоких приливах.

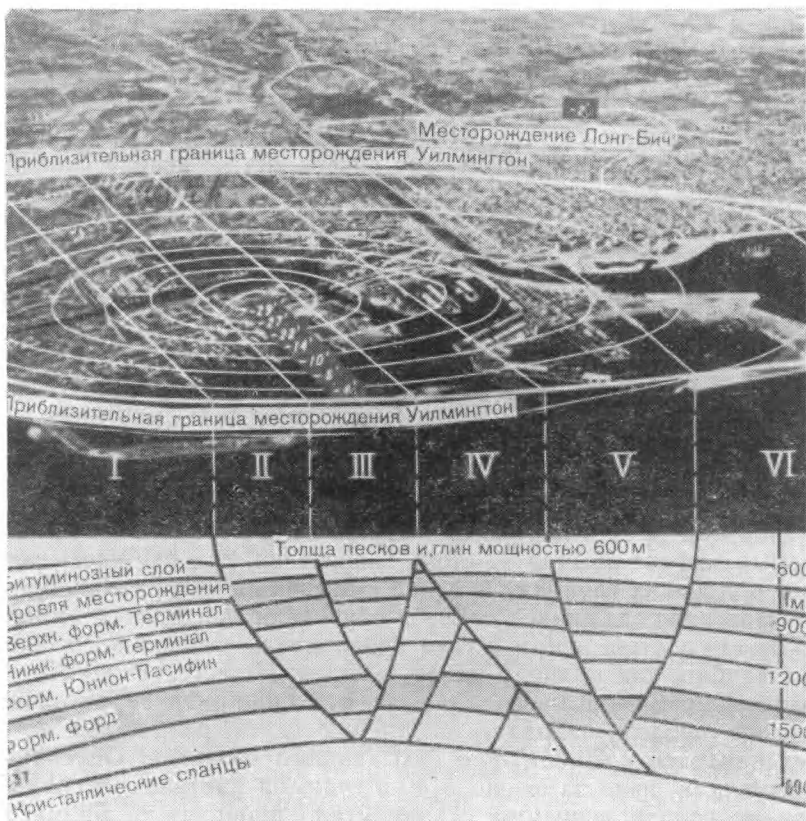
За пределами городов откачка грунтовых вод тоже, конечно, часто вызывает опускание поверхности, но в общем случае эффект там менее заметен и причиняет меньше хлопот. Одна из таких площадей, где существенные изменения наблюдались (главным образом потому, что она пересечена системой каналов), — это долина Сан-Хоакин в Калифорнии, где вода выкачи-

валась из-под земли для сельскохозяйственных надобностей начиная с 80-х годов прошлого века. В некоторых районах этой долины осадка поверхности, связанная с откачкой воды, достигла 4 м; осадка на 1—2 м отмечена на площади в тысячи квадратных километров.

Геологическая служба США провела в долине Сан-Хоакин тщательные измерения опускания поверхности с использованием измерителей уплотнения, описанных выше; эти измерения показали, что три четверти общей величины наблюдаемой осадки произошло в слое от поверхности до глубины 250 м. В том районе долины Сан-Хоакин, где отмечено наибольшее опускание, на поверхности грунта появилось несколько трещин, вызванных, очевидно, растяжением при искривлении этой поверхности в результате осадки. Такие экстремальные изменения напряженного состояния грунта представляют потенциальную опасность для построенных там зданий.

**Добыча нефти и газа: Лонг-Бич, Калифорния.** Как указывалось раньше, обстановка, возникающая при добыче нефти и газа, подобна тому, что происходит при откачке воды, но наблюдаемый эффект обычно не столь значителен, так как здесь речь идет о больших глубинах и менее сжимаемых материалах. Большинство наблюдавшихся случаев опускания приходится на площади, где добыча нефти и газа проводилась с довольно небольших глубин, как правило менее 1—2 км. Известен случай с городом Лонг-Бич, Калифорния, где под обширной территорией, занятой городом, находятся скопления нефти, разработка которых началась в 20-е и 30-е годы нашего столетия. Опускание поверхности было замечено в 40-х годах, а растущее беспокойство по поводу величины осадки стало проявляться примерно к 1950 г., когда вертикальное смещение поверхности достигло нескольких метров. Поскольку значительная часть области, захваченной опусканием, находилась на уровне моря или близко к этому уровню, на некоторых участках пришлось для защиты построек от опасности затопления сооружать дамбы и подпорные стенки. Вертикальные движения были так велики, что на разных глубинах возникли послойные горизонтальные срывы; многие нефтяные скважины были повреждены этими сколовыми деформациями. В отдельных случаях внезапное образование срывов на небольших глубинах вызывало сейсмические колебания. Изолинии опускания поверхности, а также геологический профиль через район Лонг-Бич показаны на фиг. 5.5.

К 1960 г. максимальное опускание поверхности достигло почти 10 м, и были предприняты меры для исправления положения. Они состояли в закачке воды по периферии нефтяных полей с целью повышения в них давления или остановки



Фиг. 5.5. Изолинии опускания (в футах) поверхности в Лонг-Биче, Калифорния, и геологический профиль через этот район.

процесса падения давления, приводившего к осадке. В целом эти меры оказались успешными в деле прекращения дальнейшей осадки, хотя, по объясненным раньше причинам, они не могли привести к восстановлению прежнего уровня поверхности. В настоящее время в районе Лонг-Бич не происходит или почти не происходит никаких вертикальных движений.

Еще один участок добычи нефти и газа из сравнительно неглубоких горизонтов располагается в районе Болдуин-Хилс (Лос-Анджелес, Калифорния), где между 1925 и 1960 гг. произошла осадка на величину до 3 м. В этом районе также местами появились трещины на поверхности грунта, но неизвестно, в какой мере это связано с опусканием поверхности. В том месте, где можно было ожидать максимальных растягивающих

напряжений, в 1950 г. было сооружено водохранилище Болдуин-Хилс. Наряду со многими другими сейсмически активными районами южной Калифорнии район Болдуин-Хилс исполосован геологическими разрывами; некоторые из них пересекают ложе водохранилища. В декабре 1963 г. в результате просачивания воды через плотину произошел прорыв этого водохранилища (см. раздел 7.4).

Оседание земной поверхности наблюдалось и во многих других районах мира, где разрабатываются нефтяные и газовые месторождения; например, в окрестностях Ниигаты в Японии и озера Маракайбо в Венесуэле.

**Горные работы.** Извлечение из шахт твердого материала, например руд, а чаще всего угля, и строительство туннелей также вызывают движение поверхности. Затрагиваемая этим явлением площадь располагается непосредственно над шахтой или туннелем; осадка над полостью шахты происходит из-за раскапывания и удаления рыхлого грунта или скальных пород. Возникающие в результате этого характерные воронки на неровной поверхности, волнистость на дорогах и заполненные водой понижения — все это типично для некоторых областей Шотландии и Англии, а также и для некоторых районов на востоке США. Главная опасность связана с непрерывным обветшанием и разрушением старых и чаще всего не отмеченных на карте горных выработок. Современные методы проходки шахт и туннелей редко приводят к проседанию поверхности, вызывающему повреждение построек.

Особый вид опускания поверхности, происходящего в результате удаления материала снизу, — это обрушение лавовых труб, которые образуются в движущихся лавовых потоках. При остывании поверхность такого потока затвердевает и образует своего рода каменную крышу, под которой продолжается течение жидкой лавы. При определенных условиях источник, питающий лавовый поток, может быть отрезан, и лава вытекает тогда из-под твердой кровли (см. гл. 2). После этого, если кровля достаточно тонкая, она обрушивается, и образуется провал характерной извилистой формы. Обрушение может произойти не сразу, а спустя какое-то время после излияния лавы как результат выветривания или химического изменения вещества горной породы.

Когда в разрезе присутствуют слои известняков, а годовое количество осадков велико, известняки растворяются и их материал выносятся грунтовыми водами; при этом образуются подземные полости, кровля которых также в некоторых случаях обрушивается или прогибается, что приводит к возникновению депрессий на дневной поверхности. Испещренный воронками

рельеф, возникающий в результате этого процесса, часто встречается в южной Европе, а также в южных и центральных районах США. Опасность для зданий и сооружений создается в том случае, если их приходится строить над полостями в известняках. Следовательно, в тех местах, где подозревается существование такой геологической обстановки, необходимо проводить детальное бурение для того, чтобы установить целостность нижележащего известнякового массива. Необходимо обращать специальное внимание, например, на то, чтобы нижние концы свай не оказались над такой полостью или рядом с ней.

Еще одно проявление подобного механизма оседания поверхности встречается в арктических областях, где оледенение, происходившее в прошлые времена, привело в отдельных местах к появлению крупных масс и глыб льда, которые были перекрыты затем, при отступлении ледников, обломочным материалом. Таким образом, лед в условиях Арктики можно считать горной породой и наряду с другими породами одним из компонентов, образующих грунты до тех пор, пока температура остается достаточно низкой. Если же температура повышается, ледяные глыбы начинают таять и дневная поверхность над ними оседает, образуя воронки. Локальные понижения, возникающие при этом процессе, называют *ледниковыми котлами*. В арктических областях при проведении изыскательских работ под основание какого-либо сооружения необходимо специально обращать внимание на присутствие линз ископаемого льда, так как отопление будущего здания неизбежно вызовет в этом случае серьезные осложнения.

## Список литературы

- 1 Association of Engineering Geologists: Geology, Seismicity, and Environmental Impact, Special Publication, October 1973.
- 2 Bull W. B., Geologic factors affecting compaction of deposits in a land-subsidence area, Bulletin of the Geological Society of America, 84, 3783—3802, 1973
- 3 Land Subsidence, Publication 89, IASH-UNESCO-WMO, 1969.
- 4 Legget R. F., Geology and Engineering, 2nd. ed, New York, McGraw-Hill, 1962.
- 5 Legget R. F., Cities and Geology, New York, McGraw-Hill, 1973. (Имеется русский перевод: Р. Леггет, Города и геология, «Мир», М., 1976.)
- 6 Poland J. F., Land Subsidence Due to Fluid Withdrawal, Geological Society of America, Eng. Geol. Review, 2, 1970.
- 7 State of California, The Resources Agency, Landslides and Subsidence, Geologic Hazards Conference, Los Angeles, Calif., 1965.
- 8 Zötl J. G., Karsthydrogeologie, Springer-Verlag, Vienna — New York, 1974.

# ГЛАВА 6

## ОПАСНОСТЬ СНЕЖНЫХ ЛАВИН

### 6.1. Введение

Летописи горных восхождений содержат много описаний внезапной гибели людей от снежных лавин. Например, в 1937 г. восхождение на коварный пик Нангапарбат (высотой почти 9 км) в Гималаях стоило жизни 16 участникам немецкой команды альпинистов, застигнутым лавиной. Спортсмены, покоряющие вершины Гималаев, Анд, горных хребтов Аляски и даже Альп, должны быть постоянно начеку из-за опасности возникновения лавин. По этой причине начиная с прошлого столетия, особенно в альпийских странах, постоянно изучается лавинная опасность. Особенно большое значение имеют работы Швейцарского федерального института исследования снегов и лавин.

Во многих отношениях лавины, возникающие в снежном покрове, напоминают определенные виды оползней, но имеются и существенные различия. Как материал, снег можно охарактеризовать теми же механическими свойствами, что и грунт: сцеплением, углом внутреннего трения и плотностью, связанными между собой сложной зависимостью. Когда снег выпадает на наклонную поверхность и скапливается на ней, то условия, от которых зависит, возникнет лавина или нет, подобны тем, которые создаются в случае оползания тонкого слоя грунта на длинном склоне. Иными словами, снег будет оставаться на месте, если его сопротивление сдвигу на всех глубинах будет

превышать касательные напряжения, развивающиеся под действием тяжести снега и в результате наклона поверхности. Если же прочность на сдвиг окажется меньше составляющей веса, направленной параллельно склону, то возникает лавина.

Какая толщина снежного покрова приводит его к обрушению, зависит от свойств снега (таких, как плотность, сцепление, трение) и от угла наклона поверхности точно так же, как это показано для грунта, находящегося на бесконечном склоне (см. фиг. 4.8 и относящийся к ней текст). Глубина снежного покрова, при которой напряжения становятся больше прочности, обычно называется *критической глубиной*.

Однако на этом сходство между оползнями снега и грунта кончается. Не бывает снежных лавин, которые захватывали бы материал на большую глубину (как в некоторых случаях срывов рыхлых и скальных грунтов) и двигались по поверхности скола, имеющей форму дуги или чего-либо в этом роде. Кроме того, физические процессы, воздействующие на механические свойства снега, полностью отличаются от тех, которые определяют сопротивление сдвигу в грунтах. Хотя грунт — это сложный материал, некоторые аспекты условий, влияющих на его прочность, изучены довольно хорошо, а химические процессы, в результате которых изменяется прочность того или иного слоя или участка в грунте, продолжаются в течение многих лет. Более быстрые изменения прочности связаны в общем случае с изменениями порового давления воды и водонасыщенностью материала. В отличие от этого физические условия, структура частиц льда, слагающих снежную массу, и характер связи между ними меняются непрерывно.

Давление, температура и миграция водяного пара постоянно меняют свойства снежного покрова по всей его глубине. Например, новый снег, выпавший при очень низкой температуре, может быть вовсе лишен сцепления. Его сопротивление сдвигу эквивалентно сопротивлению сухого песка, которое обусловлено только трением. Поэтому он не может удерживаться на склоне, угол которого круче угла его внутреннего трения, поэтому во время снежных бурь на крутых склонах возникают осывы (т. е. соскальзывание верхнего слоя снега) и поверхностные срывы. Если склон положе угла внутреннего трения материала, то снег первое время остается на месте. Затем солнечное облучение, изменение температуры и миграция водяного пара через толщу снега делают его свойства иными, увеличивают его плотность и сцепление, которые непрерывно меняются со временем и оказываются различными в зависимости от глубины снежного покрова. В какой-то момент соответствующее сочетание этих свойств может привести к тому, что некоторый слой снега станет неустойчивым и начнется его скольжение.

В каждом данном районе возможность возникновения лавин, их частота и размеры в большой степени определяются погодой и рельефом. Различные комбинации метеорологических условий приводят к возникновению разных видов лавин, которые могут срываться и во время сильных метелей, и сразу же после них, и спустя долгое время, или же происходят в результате условий, создавшихся после нескольких снегопадов. Как и в случае оползней, разнообразие возможных видов лавин породило целый ряд систем классификации.

## 6.2. Классификация лавин и их механизм

Лавины не имеют большого разнообразия форм, характерного для оползней, поэтому схемы классификации, предложенные для лавин, в основных чертах сходны между собой и различаются только в отдельных деталях и в описании механизма движения. В отличие от оползней лавины — это быстро проходящие явления, которые возникают каждую зиму в холмистых или гористых районах, где бывают сильные снегопады. Следы лавин в конце концов исчезают (см. фото 6.1).

В некоторых районах возможность возникновения лавин делает опасными обширные горные леса, так как лавины становятся еще более разрушительными, когда они несут с собой бревна и стволы больших деревьев. Построенные на склонах здания и сооружения, которые могут оказаться на пути лавин, немногочисленны: опоры подъемников на лыжных трассах, мачты электропередач, иногда участки шоссейных и железных дорог и горнопромышленные сооружения. Поскольку лавины проходят каждый год, за редким исключением, по одному и тому же пути, то, если это возможно, постройки там не размещают. Лавины опасны главным образом для горнолыжников и альпинистов, совершающих восхождения по заснеженным склонам (или по более низким участкам склонов, под теми зонами, где возникают лавины), а также для жилищ и других построек в нижних частях склона, если лавина пройдет дальше, чем обычно. Напомним (см. гл. 4), что оползни развиваются в течение периодов времени, продолжительность которых доходит до сотен и тысяч лет, и могут возникнуть в уже застроенных районах, так что усилия исследователей направляются либо на анализ явления уже после оползня, либо на расчет устойчивости склонов в районах предполагаемого строительства.

Борьба с лавинами требует другого подхода. Необходимо проектировать защитные сооружения для шоссейных и железных дорог, линий связи и других коммуникаций в районах, где лавины отмечались раньше, и, кроме того, в горнолыжных



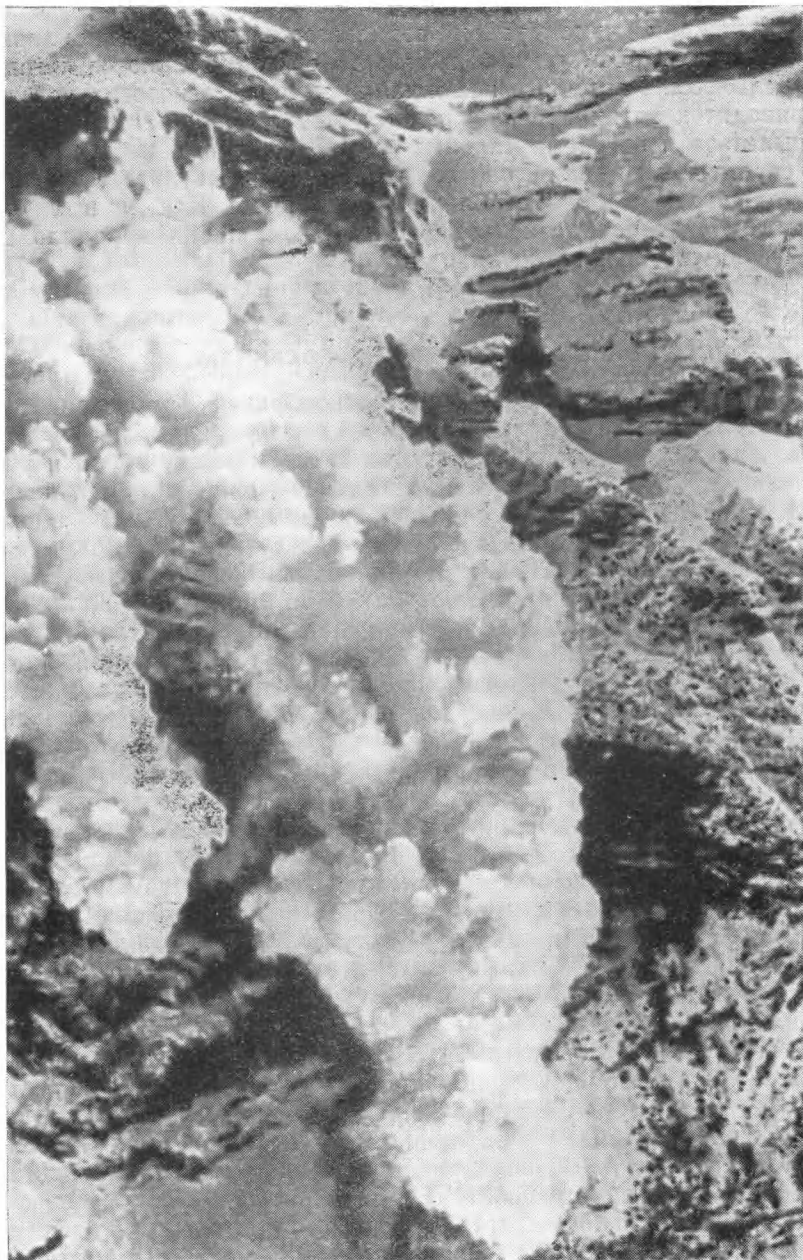


Фото 6.1. «Прыгающая» снежная лавина, низвергающаяся с горного склона.  
Из кн.: «Лавины», изд-во Словацкой Академии наук, Братислава, 1967.

районах обычно проводится ежедневная оценка устойчивости снежных склонов, направленная на своевременное принятие предупредительных мер. Эти меры чаще всего состоят в том, чтобы искусственно вызвать лавины в то время, когда их опасность можно свести к минимуму. Оползни же можно произвольно вызвать лишь в редких случаях, и это делается только во время строительства с целью практической проверки поведения материала по сравнению с результатами лабораторных и теоретических исследований. Схемы классификации (см. табл. 6.1) отражают эти различия.

**Таблица 6.1**

**Классификация лавин**

Движение	Тип снежного покрова	Условия возникно- вения	Размеры	Характерные особенности
Первичное (во время снегопада)	Сухой снег	Склон круче, чем угол внутреннего трения снега	Малые	Поверхност- ные снежные потоки и осывы
Вторичное (после сне- гопадов)	Свежевыпав- ший снег на корке наста	Внешний толчок	Малые или средние	Куски снеж- ной корки, снежная крошка
	Снежные корки	Осадка ниже- лежащего снега	Средние	Крупные пластины наста
	Влажный поверхност- ный слой	Солнечная радиация, теплый ветер, дождь	Малые	Влажная масса, мед- ленное спол- зание
	Глубинный иней	Конструктив- ная перекри- сталлизация	Средние или большие	Крупные блоки или целые слои
	Влажный снег	Теплая по- года, слабое основание	Средние до очень боль- ших	Крупные блоки, движу- щиеся с не- большой или средней скоростью

Система классификации лавин, представленная в табл. 6.1, ниже кратко описана. Тип развивающегося скольжения сильно зависит от того, как идет процесс перекристаллизации в слое выпавшего снега. Если падающий снег сухой и очень холодный, то движение поверхности происходит путем периодического сползания или стекания верхнего слоя без русел (осовы); при более теплой погоде снег приобретает некоторое сцепление, так

как отдельные объемные и плоские кристаллики снега, лежа на поверхность склона, слипаются. В этом случае накопление снега на склоне во время метели может привести к тому, что снежный слой достигает критической толщины, при которой он начинает соскальзывать, и образует пластинообразную лавину. Если во время снежной бури скольжение не возникает, то затем в слое снега могут развиваться те или иные процессы, которые приведут либо к повышению, либо к понижению устойчивости этого слоя. При соответствующих погодных условиях происходит *деструктивная перекристаллизация* снега, когда частицы его распадаются на более мелкие зерна. В результате снег становится более плотным, компактным, а значит, и более связным. В целом деструктивная перекристаллизация ведет к укреплению склона, так что возникновение лавин становится менее вероятным. Перекристаллизация в снежном покрове не бывает одинаковой на всех глубинах.

Противоположный процесс, когда первоначально мелкие частицы снега становятся крупными путем сублимации водяного пара, называется *конструктивной перекристаллизацией*. Текстура снежного покрова становится менее однородной: между частицами большого размера возникают крупные промежутки (поры). В худшем случае этот процесс по не совсем еще понятным причинам происходит на некоторой глубине под поверхностью снежного покрова, так что возникает слой, состоящий из округлых кусочков льда с очень малым сцеплением; этот слой называют *глубинным инеем*. Его сопротивление сдвигу чрезвычайно мало. При крайних обстоятельствах в глубине снежной толщи образуются такие крупные полости, что в конце концов часть снежного покрова, расположенная над ними, удерживается только в результате сцепления со смежными (по периферии) частями покрова. В этих условиях на наиболее крутой части склона по краю крупной пластины снега будут возникать трещины и сколы, а когда они достигнут критической длины, пластина отколется от окружающего материала и образуется лавина. Вначале пластина будет двигаться как единое целое, по мере скольжения по склону она разобьется на мелкие куски. Если сцепление в снеге будет слабое, это может привести к образованию стремительного потока частиц снега, взвешенных в воздухе. Это эквивалентно явлению разжижения, рассмотренному раньше в связи с описанием оползней. Лавина превращается в стекающий по склону поток плотного материала. Под влиянием соответствующих метеорологических условий и особенностей рельефа снежная лавина может снова изменить свой характер: в ней начнет выделяться тепло и из сухой зернистой массы в начале скольжения она превратится в конце пути в сильно влажный и плотный материал.

В зависимости от того, когда возникает скольжение, образуются различные виды пластинообразных лавин. Пластина может отколоться во время сильной метели или сразу же после нее и состоять из одной «порции» снега, в других случаях она становится неустойчивой после нескольких снегопадов, перемежавшихся с периодами *фёнов* (фён — теплый сухой ветер), и может состоять из серии слоев снега. В последнем случае снежная масса бывает значительно более плотной, и, следовательно, лавина может оказаться более разрушительной. Оттаивание и замерзание поверхностных слоев снега в солнечные периоды также может привести к образованию поверхности низкого трения, по которой легко будет соскальзывать новый снег.

Возникновение остальных видов лавин, указанных в приведенной здесь системе классификации, зависит, как это можно видеть, от метеорологических условий во время и после снегопада: сам новый снег может оказаться сравнительно сухим, влажным или мокрым. На свойства лавины оказывает воздействие и рельеф. На открытом плоском склоне образуются лавины, продвигающиеся широким фронтом, а при наличии оврагов и лощин снежные лавины собираются в узкие и глубокие потоки материала [так называемые *лотковые лавины*. — *Перев.*].

Из приведенного обсуждения становится ясно, что размер лавин меняется от небольших безвредных осовов, возникающих на открытых склонах, с перемещением снега на несколько метров к потокам среднего размера, энергии которых достаточно для того, чтобы убить оказавшегося на склоне человека, и до крупных смертоносных лавин, сметающих все на своем пути. На верхнем конце этой шкалы находятся те сравнительно редкие лавины, которые считаются катастрофическими; они возникают при исключительных, необычных метеорологических условиях на склонах определенной формы. Например, если метели не прекращаются в течение всей зимы и создают очень толстый снежный покров без увеличения прочности нижних его слоев, то затем, с приближением весны, в результате процессов, развивающихся при возрастании солнечной радиации, возникает лавина, которая захватывает весь накопившийся на склоне снег вплоть до поверхности грунта или скальных пород. В таких случаях со склона может сорваться соответственно громадная масса материала сравнительно большой плотности.

В Японии принята классификация лавин по размеру, на основе оценки веса захваченного материала. Эта классификация в какой-то мере напоминает магнитудную шкалу Рихтера для землетрясений (см. раздел 1.2), так как в ней вводится понятие *магнитуды массы* (ММ) — величины, соответствующей десятичному логарифму массы снега (в тоннах). По этой шкале величина ММ для небольших лавин бывает меньше 1, для средних

лавин — от 1 до 3, для крупных лавин ММ составляет 3—5. Отмечено один или два случая, когда магнитуа массы лавины, возможно, достигала 7.

Снег может испытывать на склоне медленное движение (крип) со скоростью порядка несколько метров за недели или месяцы, но эта ползучесть имеет значение только как показатель того, что здесь может возникнуть лавина. В отличие от оползней все потенциально разрушительные лавины движутся, как правило, со сравнительно высокой скоростью: от нескольких километров в час до 200—300 км/ч. На станции исследования снегов в Японии искусственно вызванные лавины изучались с помощью кинокамер; диапазон средних скоростей лавин составлял 40—60 км/ч. Скорость лавины зависит, конечно, от крутизны склона, от плотности снега и его сопротивления сдвигу и от длины пройденного пути.

### 6.3. Анализ и исследование лавин; меры воздействия

**Анализ.** Поскольку многие лавины несут в себе значительное количество обломков горных пород, они оказывают сильное воздействие на геологическое развитие земной поверхности. Повторяющиеся лавины переносят большое количество неотсортированных обломков горных пород к подножию склона и способствуют эрозии. Лавины возникают на склонах любой крутизны, однако наиболее крупные лавины образуются при углах склона от 25 до 40°. Лавины наиболее вероятны на очень крутых склонах, но здесь вступает в действие и некий компенсационный эффект: на склонах, крутизна которых больше 45°, накапливается мало снега, так как он непрерывно соскальзывает с них во время метелей. Таким образом, для очень крутых склонов массивные снежные лавины не характерны.

Анализ лавины или ее механизма зависит, как и в случае оползней, от установления свойств материала в том месте, где лавина возникает. Однако в изучении лавин имеются некоторые специфические сложности. Такие исследования оказываются более трудными, так как все свойства: плотность снега, его сопротивление сдвигу и глубина покрова — очень быстро меняются во времени. Очень мешают определению свойств снега его мягкость и чувствительность к изменениям температуры. Если же удастся взять образцы снега, то трудно доставить их в лабораторию, сохранив те свойства, которыми он обладал *in situ*, так как для этого надо поддерживать те же условия температуры и давления водяного пара. Эти условия необходимо определить

прежде всего, но правильно измерить температуру на разных глубинах снежного покрова нелегко. Тепловое равновесие в снеге зависит от температуры воздуха и температуры грунта, от скорости ветра и от условий теплового излучения у поверхности снежного покрова. Кроме как при специальных научных исследованиях температура снега обычно не измеряется; не проводят и лабораторных испытаний.

При полевых работах пытаются определить на склоне возможно большее число параметров, характеризующих свойства снега. Для этой цели используют разнообразные приспособления, в том числе трубы для отбора образцов и инструменты для испытания на проникание, дающие сведения о плотности снега и его прочности на сдвиг. По отношению к снегу трудно, конечно, провести испытание на сдвиг, такое же, как для грунтов. Поэтому нельзя с уверенностью определить количественное воздействие различных переменных на прочность снега, и анализ возможности срыва в лавиноопасных областях в меньшей степени, чем в случае оползней, базируется на учете действующих сил. Вместо этого главное внимание уделяется количественным зависимостям, установленным между метеорологическими условиями и глубиной снежного покрова, а также особым причинам, вызывающим различные типы лавин. Опасность возникновения лавины оценивается путем сравнения условий данного снегопада с условиями, приводившими к образованию лавин на том же склоне в прошлом.

Например, снег, выпадающий на крутой склон горы при низкой температуре и почти полном безветрии, будет легко ссыпаться вниз (как песок); в тех же случаях, но при более сильном ветре, снег становится более компактным и приобретает некоторую связность, так что в конце концов может возникнуть *пластинообразная лавина сухого снега* (сухой осов). Когда снег накапливается быстро при сравнительно высокой температуре на склоне, поверхность которого покрыта слоем *наста* (ледяной коркой, образующейся из тающего и снова замерзающего снега), возникает обстановка, чреватая угрозой *мокрой пластинообразной лавины* (мокрого осова). Ввиду местных особенностей для прогноза лавинной опасности в каждом районе требуется некоторый опыт учета метеорологических условий и характера склона.

Помимо всех этих трудностей, необходимо учитывать еще одно соображение: изучение возможности возникновения лавин на том или ином склоне представляет собой опасность для исследователя, так как пока необходимые свойства снега приходится измерять на месте. Снег может прийти в движение как раз во время таких измерений.



Фото 6.2а. Барьеры для защиты от лавин.

Бетонные надолбы, используемые как постоянные сооружения для торможения и отвода лавин на склонах над одним из городков в Карпатах. Из кн. «Лавины», изд-во Словацкой Академии наук, Братислава, 1967.

**Меры воздействия.** Имеются способы как пассивной, так и активной защиты от лавин. В зоне отрыва возникновению лавины можно помешать использованием отражателей ветра и снегозащитных щитов, которые воздействуют на оседание снега на подветренных склонах; отрыв масс можно предотвратить, соорудив подпорные стальные или бетонные стены, которые создадут уравнивающее усилие. Террасы и разрушающие барьеры, сооружаемые на склонах, могут замедлить движение снега или отклонить лавину. Там, где в лавиноопасных районах необходимо разместить какие-нибудь постройки, их надо огородить щитами или стенками, предназначенными для отведения снежной массы (см. фото 6.2). Измерения давлений, создаваемых стекающим снегом, уже проведены, так что сведе-



Фото 6.26. Современные стальные тормозящие барьеры.

Из кн.: «Лавины», изд-во Словацкой Академии наук, Братислава, 1967.

ния, необходимые для проектирования защитных сооружений, имеются. Однако в районах частого возникновения крупных лавин лучшая защита от них — это упрятать сооружение под землю: например, провести шоссейную или железную дорогу через гору по туннелю. При длительном использовании затраты на строительство туннеля окажутся меньшими, чем стоимость содержания, непрерывного текущего ремонта и ликвидации повреждений, причиняемых лавинами на открытых участках дорог.

Активный способ воздействия на лавины состоит в их искусственном провоцировании в заранее выбранное время и при



соблюдении мер безопасности, с тем чтобы они не возникли естественным путем и не были неожиданными. В мировых горнолыжных центрах имеются постоянные патрули лавинной опасности, которые следят за состоянием склонов и погодными условиями. Вместо того чтобы удалять лыжников и скалолазов со склонов в периоды опасности, используется практика намеренного вызова лавин в то время, когда склоны свободны; тем самым опасность удается ликвидировать.

Для провоцирования лавин используются такие способы, как возбуждение вибраций, вызываемых источниками сильного звука или ударами. В настоящее время чаще всего используется способ обстрела головных частей потенциальных срывов разрывными снарядами. При благоприятном рельефе можно поместить заряды в снег у вершины склона или на соседнем гребне, с тем чтобы взорвать нависающие карнизы или подтолкнуть потенциальную лавину. Для обстрела используются различные орудия, в том числе обыкновенная артиллерия, минометы, пневматические пушки. В различных районах США эта практика получила широкое распространение, так что несчастные случаи от лавин стали там сравнительно редкими в отличие от Европы, где каждый год лавины различного вида уносят в среднем около 100 человеческих жизней.

#### **6.4. Описание отдельных лавин**

В некоторых отношениях лавины не столь разнообразны, как оползни: все виды лавин, причем всевозможного размера, возникают в горных районах с обильным выпадением снега. Поэтому, чтобы дать представление о важности проблемы, связанной с лавинами, весьма поучительно рассмотреть некоторые крупные и наиболее яркие случаи.

**Пик Уаскаран, Перу, 1962 г.** В Южной Америке, недалеко от северной оконечности Анд, у параллели 9° ю. ш. находится пик Уаскаран (высотой 6700 м), названный по имени одного из вождей инков Уаскара. На пике Уаскаран остались реликты последней ледниковой эпохи в виде вершинного ледника и снежного поля толщиной несколько сотен метров. В определенное время года массы льда и снега откалываются от края ледника и на высоких склонах возникают лавины.

10 января 1962 г. от главного ледника отделился крупный блок снега и льда, объем которого был позднее оценен величиной 3 млн. м<sup>3</sup>; вся эта масса свалилась вниз с высоты почти 1 км (по вертикали). В результате этого сильнейшего удара из снега и льда образовалась плотная туча взвешенных в воздухе частиц, которая понеслась с громадной скоростью и энергией по

подгорной долине; на своем пути эта движущаяся масса захватывала каменные глыбы, песок и глину; снежная лавина стала одновременно и грязевым оползнем. Прямо на пути этой массы на высоте около 2700 м лежал городок Ранраирка и располагалось еще шесть деревень. К тому времени, когда лавина достигла города, она спустилась уже примерно на 3500 м и объем ее увеличился, как оценивали, до 13 млн. м<sup>3</sup>. Город, деревни, мосты и дороги были полностью уничтожены, а там, где оползень остановился, местная река была запружена.

Образовавшаяся плотина была в конце концов прорвана поднявшейся рекой, и тогда произошло разрушительное наводнение, которое повредило все мосты в нижней части долины. В этой катастрофе было убито около 4 тыс. человек. Расстояние примерно в 20 км лавина преодолела приблизительно за 7 минут, так что ее средняя скорость была примерно 170 км/ч.

Это стихийное бедствие почти полностью повторилось восемь лет спустя, при землетрясении 1970 г., что описано в разделах 1.4 и 4.6. В 1970 г. горные породы, слагающие верхнюю часть склонов пика Уаскаран, играли, по-видимому, большую роль в образовании оползня или грязевого потока, чем в 1962 г. Описанные события — всего лишь самые недавние эпизоды в длительной истории ледовых и горных обвалов на склонах пика Уаскаран.

**Кэмп-Ледюк, Британская Колумбия, Канада, 1965 г.** Название Кэмп-Ледюк было дано поселку горняков в канадских Скалистых горах, где в 1965 г. началась разработка очень крупного меднорудного месторождения. В феврале 1965 г. в поселке было 154 человека, которые занимались предварительными работами по прокладке штолен. Месторождение удалось открыть в результате отступления ледника; оно находилось высоко в горах, в районе, где за год часто выпадает более 15 м снега. Поселок был построен на выступающем гребне в расчете на то, что снежные лавины будут рассекаются этим гребнем и спускаться по разные стороны от него.

Однако 18 февраля с горного склона над поселком сорвалась очень крупная лавина; она уничтожила южную половину поселка, а затем повредила постройки у входа в штольню. Действительное количество сорвавшегося снега было только частью того объема, который мог участвовать в лавине, и соответственно ущерб мог быть еще большим. Но и без того лавина накрыла в поселке 70 человек. Из них 43 человека были спасены в результате последовавших аварийных поисков и раскопок, а 27 человек погибло.

С точки зрения специалиста по обнаружению лавин и борьбе с ними, это бедствие можно было предотвратить, так как можно

было предсказать возможность возникновения лавины и ее путь по этой площади, а поселок можно было разместить в более защищенном месте. Кроме того, можно было обеспечить безопасность возведением искусственных сооружений.

**Карпаты, территория Чехословакии.** В Карпатах были проведены специальные исследования причин возникновения лавин. Чаще всего они отмечаются там в хребтах Низкие Татры и Большая Фатра. Отрыв снежных масс происходит в этих горах, как правило, на высотах 1700—2000 м. Длина пути лавин меняется от менее 1 до 3 км и более.

Для анализа были выбраны два периода: зима 1955/56 г. и зима 1961/62 г. В обоих случаях было много нового снега. В марте 1956 г. была переменная пасмурная погода с дождем и снегом в низменных районах и значительными снегопадами в горах. Затем такая погода сменилась штормовыми ветрами, в результате чего произошли крупные подвижки снежного покрова, а на подветренных склонах образовались карнизы, создавшие благоприятную обстановку для образования лавин. В Татрах и на Фатре произошло много крупных срывов снежного покрова, причинивших в ряде случаев значительный ущерб. Среди них была лавина, возникшая 8 марта 1956 г. на покрытых альпийскими лугами склонах Татр у города Ждьяр и принесшая смерть 16 рабочим лесничества.

Зимой 1961/62 г. состояние снега не способствовало образованию лавин вплоть до февраля 1962 г., а затем холодный сырой воздух вызвал такое быстрое увеличение снежного покрова, что силы сцепления между старым и новым снегом еле-еле уравнивали на критических склонах силы растяжения. Эти нестабильные условия привели к возникновению множества крупных лавин чуть ли не на всей территории Карпат.

## Список литературы (см. также раздел 4.7)

1. *Atwater M*, The Avalanche Hunters, Philadelphia, PA., Macrae Smith Co., 1968.
2. *Knapp G. L.*, ed., Avalanches, A Bibliography, Wash., D. C., U. S. Dept. of the Interior, Water Resources Scient. Inform. Center, WRSIC 72—216, 1972.
3. *Quervain M*, Avalanche Classification, Congress IUGG 1957, Toronto, International Association of Scientific Hydrology, Publ. 46, IV, 1958.
4. *Seligman G*, Snow Structure and Ski Fields, London, Macmillan, 1936.
5. Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, International Symposium on Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches, Davos, Switzerland, 1965
6. U. S. Forest Service, Avalanche Handbook, Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, 1952.
7. U. S. Forest Service, Snow Avalanches, Handbook No. 194, Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, 1961.

# ГЛАВА 7

## ОПАСНОСТЬ НАВОДНЕНИЙ

### 7.1. Введение

**Великое Австралийское наводнение 1974 г.** Резкие переходы от засух к проливным дождям, вызывающим наводнения, давно известны в Австралии. В январе 1974 г. пришедший из Тиморского моря муссон распространился на всю северную часть континента, вызвав настоящий потоп на северо-западе страны и в районе залива Карпентария. В Западной Австралии в середине января в течение 17 часов в виде дождя выпало 48 см осадков, города Брум и Дарвин были частично затоплены и эвакуированы. Наводнение охватило всю — от горизонта до горизонта — территорию в тылу этих городов, где в обычное время раскаленное солнце светило над пыльными сухими руслами рек.

К 20 января в северо-западном Квинсленде вода поднялась выше телеграфных столбов. Люди в селениях, отрезанных от остального мира поднимающейся водой, в отчаянии ждали помощи. Это было самое большое наводнение, которое испытала эта область в нынешнем столетии, и величайшее национальное бедствие Австралии. На западе Квинсленда оказались отрезанными шесть крупных городов. 31 января при сильном ливне на крайнем западе Квинсленда выпало 14,3 см воды. Чтобы сохранить запасы угля, была прекращена добыча меди на полковине знаменитых шахт Маунт-Айза. Реки, по которым вода текла к заливу Карпентария, разлились и соединились между

собой; вода покрыла районы у залива на ширину 150 км. В это же время дальше к югу, в штате Новый Южный Уэльс, дожди не прекращались неделя за неделей, вода залила обширные площади на северо-западе, и затопленные пастбища были усеяны трупами сотен тысяч овец. Для жителей Алис-Спрингса и других отрезанных от мира населенных пунктов в центральной Австралии и Квинсленде продовольствие сбрасывалось с самолетов.

В конце января бедствие продолжало разрастаться: циклоны продвигались дальше вдоль побережья Квинсленда. Вышла из берегов река Брисбен, текущая через город Брисбен (с населением 800 тыс. человек), столицу штата Квинсленд. К 30 января эта обычно тихая река имела, при взгляде с самолета, невероятный облик (см. фото 7.1): она была шириной больше 3 км и в университетском районе Сан-Лусия разлилась еще шире, затопив промышленные пригороды. Выше Санта-Лусии в направлении города Ипсуич вода залила, насколько хватало взгляда, пойму на многие километры. Всевозможные обломки и мусор из домов, с ферм и промышленных предприятий неслись по поверхности потока в океан.

Ущерб, причиненный наводнением в Брисбене и Ипсуиче, был огромен. В Ипсуиче было разрушено 1200 домов; наводнение парализовало центр Брисбена, 20 тыс. человек остались там без крова. По меньшей мере 15 человек погибло.

Как это ни удивительно, предупреждения о возможности такой катастрофы в Брисбене делались неоднократно. При всей своей силе наводнение 1974 г. уступает тому разгулу стихий, который привел к наводнению в 1893 г., когда в течение трех недель 10 тыс. (из 90 тыс.) жителей Брисбена лишились крова, а на ликвидацию последствий катастрофы потребовались долгие годы. Опустошительный характер наводнения 1893 г. был связан с длительными проливными дождями; целых пять циклонов прошло вдоль побережья Квинсленда, потоп охватил районы вокруг Брисбена и на юго-востоке штата. Самые сильные дожди начались 1 февраля 1893 г., а к 4 февраля высота воды в городе Брисбен составила 2,5 м.

Бурлящий поток наводнения 1893 г. нес из Ипсуича многочисленные остатки разрушенных домов, обломки всяческой утвари, трупы животных. Пятого февраля вода смыла стальной железнодорожный мост Индорупилли, перед которым скопилась масса разных обломков; суда и землечерпалки сорвало с якорей и поволокло вниз по течению. Шестого февраля развалился мост Виктория, его северный конец погрузился в реку. К 11 февраля дождь пошел с новой силой. 17 февраля на леса, дома и корабли обрушился настоящий водяной ураган, который принес жестокие разрушения. Третья волна наводнения захлестнула долину реки



Фото 7.1. Аэрофотоснимок, показывающий затопление города Брисбен (Квинсленд, Австралия) во время сильнейшего наводнения в январе 1974 г.

Брисбен и прогнала людей из домов, затопив их. К 21 февраля потоп отступил, унес с собой 35 человеческих жизней.

Геологические данные и легенды аборигенов указывают на то, что до колонизации района Брисбена европейцами там были и еще более крупные наводнения, чем в 1893 и 1974 гг. Сегодня опасность таких явлений усилилась, так как леса и луга, которые когда-то могли поглощать воду при сильных ливнях, теперь уничтожены, дождь ударяет уже не в землю, а в дорожные покрытия и крыши домов, и вода с повышенной скоростью стекает в ручьи, пруды и овраги. Многие долины ручьев засыпаны и тем самым увеличена нагрузка на остальные.

Сооружения, предназначенные для регулирования стока, такие, как противопаводковая плотина Сомерсет в верховьях реки Брисбен, оказались малы и не смогли спасти город от крупного наводнения 1974 года. По требованию общественности было решено провести исследование того, как можно предотвратить в будущем такие катастрофы. Пересматриваются законы о землепользовании в пойменных районах города. Подверглась проверке работа плотины Сомерсет как заслона во время наводнения 1974 года; рассматриваются законопроекты, запрещающие оголять склоны холмов.

Свое отношение к опасности наводнений выразил австралийский министр д-р Мосс Кэсс. Он заявил: «В поймах рек не избежать паводков, но это не значит, что мы не можем сделать ничего, чтобы свести к минимуму ущерб, причиняемый наводнениями. Австралийцам следовало бы помнить, что во многих районах наводнение и засуха являются правилом, а исключением надо считать хорошие годы. Серьезные наводнения были в этих районах не только в 1974 году, но и в 1971, 1961, 1956, 1955 и 1950 годах — шесть сильных наводнений за половину активного периода жизни одного поколения. Если не считать небольших участков, человек просто ничего не может сделать для того, чтобы предотвратить обширные наводнения или засуху. Просто невозможно построить плотины, которые защитили бы от затопления все пойменные области в периоды исключительно сильных дождей. Часто приводят вполне обоснованные соображения о целесообразности использования затопляемых земель для сельского хозяйства и другой деятельности. Однако при планировании таких предприятий необходимо в полной мере предвидеть и возможные потери. Чтобы уменьшить воздействие наводнений посредством оборудования безопасных укрытий для движимого имущества и предметов первой необходимости, требуются, по-видимому, частные капиталовложения».

Программа уменьшения ущерба от стихийных бедствий проводится, однако, и в общенациональном масштабе. Затраты австралийского правительства на новое строительство и ремонт-

ные работы после наводнения 1974 г. составили не менее 75 млн. долл. Правительство штата Квинсленд предоставило субсидии на строительство жилищ в размере 4500 долл. на каждого домовладельца, так как страхование от наводнений было развито мало. Имеется план, согласно которому федеральное правительство и власти штата должны совместно создать организацию для борьбы с последствиями стихийных бедствий, опирающуюся на особый национальный страховой фонд. Детали страхования предстоит еще разработать (о страховании от наводнений в США см. гл. 8).

**Гибель произведений искусства: Флоренция.** Наводнения, как и пожары, представляют собой одну из главных причин гибели сокровищ культуры. Наглядным примером этого служат неоднократно случаи затопления Флоренции, Италия, одной из мировых сокровищниц искусства. «Фиренце белла» — прекрасная Флоренция — расположена на реке Арно в том месте, где река, выйдя из Апеннин, но еще не достигнув богатых пойменных районов перед Пизой, остается довольно узкой. Река затопляла Флоренцию много раз, причем наводнения 1333, 1557, 1844 и 1966 годов были особенно разрушительными.

4 ноября 1966 г. бурные воды реки затопили великий город Возрождения. Весь город спал — жители не были предупреждены и не подозревали о беде, а стремительный поток поднялся уже выше отметок, показывавших наивысший уровень воды при прошлых наводнениях. В 7 часов 26 минут во всем городе остановились электрические часы; яростные волны смыли мост Сан-Никколо, а узкие улицы стали превращаться в грохочущие водопады, волочащие каменные глыбы и автомобили.

За два дня, 3 и 4 ноября, в бассейне реки Арно выпало около одной трети среднегодовой нормы осадков. В это же время в северной Италии было затоплено 750 деревень и 5000 км дорог. На площади от долины реки По до Тосканы утонуло около ста человек и 50 тыс. голов скота. 3 ноября была спущена вода из крупных противопаводковых водохранилищ Пенна и Леване на реке Арно, и огромные массы воды устремились вниз по долине. После катастрофы была назначена правительственная комиссия для выяснения того, не была ли допущена преступная ошибка теми, кто отвечал за работу шлюзов плотин.

Максимальный уровень наводнения в городе составил 6 м. Вода принесла много мусора и грязи, сильно повредившей многие церкви и дома, имеющие архитектурную ценность (фото 7.2). Исторические документы Государственного архива (Аркивo-ди-Стато) и Центральной национальной библиотеки были испорчены на вполне современный лад: они пропитались плавающим на поверхности воды нефтью из системы центрального отопления.





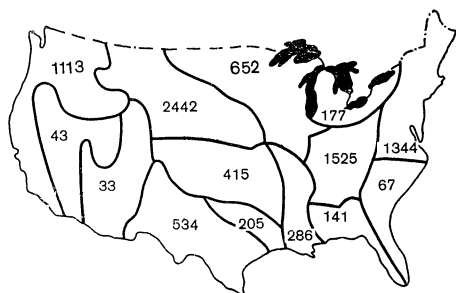
Фото 7.2. Грязь и разрушения в церкви Сан-Ремиджо во Флоренции после катастрофического наводнения в ноябре 1966 г.

Во Флоренции в Государственной библиотеке, крупнейшем книжном собрании Италии, насчитывающем более 3 млн. томов, было повреждено более полутора миллионов книг, многие из которых относятся к эпохе Возрождения. Когда уровень воды понизился, добровольцы, надев противогазы (для защиты от зловония сточных вод и гниющих кожаных книжных переплетов), принялись выносить тысячи этих бесценных книг из подвалов, залитых черной грязью.

Среди погибших шедевров наиболее известны этрусские коллекции Археологического музея и «Распятие» Чимабуэ [флорентийского живописца XIII в. — *Перев.*] из собрания церкви Сан-

та-Кроче. В результате международных усилий по спасению и реставрации произведений искусства общие потери, хотя и очень тяжелые, были, по всей видимости, меньше, чем при прошлых наводнениях.

**Опасность возрастает.** Из всех неистовств природы наводнения бывают особенно разрушительными, поскольку люди и объекты их деятельности находятся обычно на пути потоков. Мы платим высокую цену — как в виде причиняемого ущерба, так и в виде затрат на борьбу с наводнениями — за строительство на аллювиальных равнинах и жизнь в глубоких речных долинах. Многие цивилизации боролись за то, чтобы плодородные земли по берегам мощных рек стали источниками жизни. Наши далекие предки жили в долинах Нила, Тигра, Евфрата, Инда и



Фиг. 7.1. Оценка ущерба от наводнений (в млн. долл.) в разных районах США за период с 1925 по 1968 г. По данным министерства торговли США, 1969 г.

Хуанхэ в условиях, благоприятных для человека и для сбора обильных урожаев и в то же время чреватых бедствиями.

В обстановке промышленного роста Европы, Азии, Северной Америки и Австралии было удобно, а часто и необходимо селиться в поймах, так как реки давали питьевую воду, пищу и возможность перевозки грузов. В результате города вышли на берега рек, на плодородные дельты и низменные прибрежные равнины. Пока поселения были небольшими, соответственно и ущерб был невелик, и не делалось больших усилий, чтобы его избежать. Но города росли, и опасность наводнений становилась все более острой.

Невозможно подсчитать, сколько времени, сил и денег затрачено во многих странах на строительство сооружений для защиты от наводнений и уменьшения связанного с ними риска, и все-таки каждый год многие тысячи людей расплачиваются за наводнения своей жизнью и имуществом. Каждый год печальный итог растет (фиг. 7.1 и табл. 7.1), так как мало областей не подвержено опасности наводнений. Несомненно, потери, связанные с наводнениями, подстерегают нас и в дальнейшем, но

Таблица 7.1

Годовой ущерб от наводнений в США (в млн. долл.) по данным Совета по водным ресурсам США, 1948 г. «Верховьями» названы те части бассейнов, где площадь области водосбора составляет 100 тыс. га или меньше; «низовьями» названы районы ниже этой области

Районы	1957 г.		1966 г.		1980 г.		2000 г.		2020 г.	
	Низовья	Верховья	Низовья	Верховья	Низовья	Верховья	Низовья	Верховья	Низовья	Верховья
Атлантическое побережье, север	64,3	62,6	63,1	70,7	75,6	91,2	89,8	120,9	116,2	163,3
Юг Атлантического побережья и Мексиканский залив	46,7	109,6	44,1	123,8	55,8	183,2	74,8	267,3	90,4	383,7
Великие озера	12,3	29,8	13,0	33,7	15,8	43,8	21,0	57,2	27,7	76,1
Огайо	78,7	49,2	73,9	55,6	99,5	68,3	151,0	90,9	237,0	116,6
Теннесси	3,5	27,3	4,9	30,9	7,6	42,6	8,3	58,3	6	80,2
Верхнее течение Миссисипи	60,0	52,0	64,5	68,5	96,0	101,9	151,0	143,2	218,0	197,2
Нижнее течение Миссисипи	66,0	38,5	86,8	43,5	117,2	55,3	164,2	73,5	224,5	100,1
Сури, Ред-Ривер и Рейни-Ривер	5,8	13,5	5,6	15,3	6,4	18,4	7,5	24,1	8,6	32,2
Миссури	101,4	148,1	44,0	167,3	69,0	222,3	118,0	302,7	221,0	430,1

Арканзас, Уайт-Ривер и Ред-Ривер	48,6	129,2	50,0	146,0	61,6	184,0	90,6	245,3	127,0	330,0
Техас и побережье Мексиканского залива	32,5	49,5	28,2	55,9	39,5	86,1	59,3	125,3	86,4	178,4
Рио-Гранде	12,2	10,4	14,7	11,8	14,8	19,5	15,8	30,9	18,8	44,9
Верхнее течение Колорадо	0,9	16,9	13,0	19,1	19,0	27,4	30,3	42,1	57,0	62,1
Нижнее течение Колорадо	5,4	25,8	10,0	29,1	20,2	59,3	42,2	93,3	96,7	141,3
Большой Бассейн	3,0	8,4	4,1	9,5	6,7	17,5	10,2	27,5	14,1	42,0
Река Колумбия, север Тихоокеанского побережья	52,2	106,7	52,1	120,6	73,6	170,1	120,6	235,3	197,7	325,8
Калифорния	36,9	67,2	61,6	75,9	102,1	134,3	185,9	211,0	262,6	311,2
Аляска	3,2	в	4,3	в	5,6	в	8,4	в	12,4	в
Гавайские острова	1,2	10,6	1,8	12,2	2,2	16,8	2,8	23,7	3,6	34,0
Пуэрто-Рико и Виргинские острова	2,6	3,8	2,9	4,3	3,2	6,0	3,5	8,5	4,0	12,0
Всего (округлено)	637	959	643	1094	891	1548	1355	2181	2024	3061

а Оценка предполагаемого ущерба основана на данных о работе существующих противопаводковых сооружений б Результаты расчетов неизвестны в Нет данных

надо надеяться, что они будут уменьшаться по мере развития знаний и техники.

Имеются, очевидно, два общих решения проблемы, хотя они и трудновыполнимы: 1) выделить опасную площадь и не допускать размещения на ней населенных пунктов и 2) если промышленное и сельскохозяйственное значение данного района настолько велико, что обязательно требуется защита от наводнений, необходимо возвести сооружения для регулирования стока и уменьшения паводков. Но даже и в этом случае мы должны ясно представлять себе опасность того, что может возникнуть наводнение чрезвычайной силы, от которого эти сооружения не помогут.

**Типы наводнений.** Наводнения — это разливы рек или поднятие уровня океана, которые причиняют ущерб или создают угрозу; они возникают разным путем. Чаще всего бывают наводнения *дождевого речного* типа, они и есть главная тема этой главы. Второй важный тип — *затопление побережья*, происходящее при неожиданном относительном подъеме уровня моря, что может быть связано со штормом (наводнение нагонного типа), цунами (гл. 3) или с опусканием поверхности суши.

Реже возникают наводнения, связанные с другими причинами: с таянием снега, заторами при ледоходе, таянием льда при оттепели, с разрушением защитных сооружений, таких, как плотины или дамбы, а также связанные с прорывами и разрушением ледников, с оползнями или выплескиванием вулканического озера (фиг. 2.8). Недостаточная пропускная способность водоотводов в населенных пунктах и *сплошное наводнение* (sheet flooding) при очень сильных ливнях также могут стать причиной затопления домов и сельскохозяйственных угодий. Крупнейшие наводнения, отмеченные в США начиная с 1844 г., перечислены в табл. 7.2.

Грозовой дождь, выпадающий на обширной площади водосбора реки, мигрирующий штормовой фронт или внедрение тропических воздушных масс — все это повышает уровень течения воды в реке, так что она может разлиться и затопить свою *пойму* — широкую плоскую область, идущую вдоль русла реки. Многие реки, например По в Италии, Нил в Египте и Миссисипи в США, как правило, каждый год заливают часть своих пойм. Примерно раз в двадцать лет они затопляют значительную часть поймы, а раз в столетие наводнение достигает очень высокого уровня.

Величина речного стока и уровень, до которого поднимается вода, зависят от естественных факторов, таких, как изменение температуры, приводящее к таянию снега, и от факторов, связанных с постройкой плотин и ограждающих дамб. Масштаб

Таблица 7.2

Крупнейшие разрушительные наводнения в США (ущерб более 100 млн. долл. в ценах 1975 г.). Составил У. Л. Хорн

Год	Название реки или местности	Оценка ущерба в млн. долларов	Причина наводнения
1844	Верхнее течение реки Миссисипи	Нет данных	Ливень
1862	Калифорния	То же	Ливень
1889	Джонстаун, Пенсильвания	»	Прорыв плотины
1900	Галвестон, Техас	650	Ураган
1903	Река Пассейк — река Делавэр	150	Ливень, прорыв плотины
1903	Река Миссури	880	Ливень
1913	Река Огайо	3300	Ливень
1913	Река Бразос — река Колорадо, Техас	190	Ураган
1921	Река Арканзас	200	Ливень
1926	Майами, Флорида	300	Ураган, прилив
1927	Новая Англия	420	Ливень
1927	Нижнее течение реки Миссисипи	3000	Ливень
1928	Плотина Сент-Франсис, Калифорния	150	Прорыв плотины
1936	Северо-восток США	2800	Ливень
1936	Бассейн реки Огайо	850	Дождь, таяние снега
1937	Бассейн реки Огайо	3700	Ливень
1938	Калифорния	710	Ливень
1942	Среднеатлантическое побережье	110	Ливень
1943	Центр США	1250	Ливень
1944	Южная Флорида	200	Ураган, прилив
1944	Бассейн реки Миссури	720	Ливень
1945	Бассейн реки Гудзон	130	Ливень
1945	Южная Флорида	170	Ураган, прилив
1945	Бассейн реки Огайо	200	Ливень
1947	Бассейн реки Миссури	1200	Ливень
1948	Бассейн реки Колумбия	400	Ливень
1950	Река Сан-Хоакин (Калифорния)	140	Ливень
1951	Бассейн реки Канзас	3750	Ливень
1952	Бассейн реки Миссури	550	Дождь, таяние снега
1952	Бассейн верхнего течения реки Миссисипи	100	Ливень
1954	Новая Англия	950	Ураган
1955	Северо-восток США: от Новой Англии до Северной Каролины	1800	Ураган
1955	Калифорния, Орегон, Невада, Айдахо	700	Ливень
1957	Юго-восток штата Кентукки	200	Ливень
1957	Техас	330	Ливень
1959	Огайо и соседние штаты	260	Ливень
1961	Побережье Техаса	1100	Ураган «Карла»
1963	От Алабамы до Западной Виргинии и Огайо	200	Ливень
1964	Флорида	200	Ураган

Год	Название реки или местности	Оценка ущерба в млн. долларов	Причина паводнения
1964	Бассейн реки Огайо	200	Ливень
1964	Орегон, северная Калифорния, юг штата Вашингтон	1000	Ливень
1965	Южная Флорида и Луизиана	2500	Ураган «Бетси»
1965	Бассейн верхнего течения реки Миссисипи	370	Дождь, таяние снега
1965	Река Платт	1100	Ливень
1965	Река Арканзас	100	Ливень
1969	Миссисипи, Виргиния	2200	Ураган «Камилла»
1969	Южная Калифорния	300	Ливень
1972	Рapid-Сити, Южная Дакота	120	Внезапный паводок
1972	Все восточное побережье США	3000	Ураган «Агнеса»
1973	Бассейн реки Миссисипи	420	Ливень

наводнения определяется величиной связанного с ним материального ущерба и воздействием на образ жизни людей на берегах реки.

Возможно, чаще всего сильные ливневые наводнения происходят в Азии и на Дальнем Востоке. Рекордное выпадение осадков отмечено в Фукико [Цзицзыкоу? — *Перев.*] на Тайване в 1913 г. и в Багио на Филиппинах в 1911 г. — 200 см дождя выпало за 72 и 63 часа соответственно. Отдельные части Индии затопляются каждый год; часто значительный ущерб связан с дождями при юго-западных муссонах. Это штормовые ветры, дующие с Индийского океана в сторону суши с июня по сентябрь, приносящие большие объемы воды. При муссонах особенно сильно вздуваются крупные реки — Брахмапутра и Ганг, однако и все другие реки южной Азии также вносят свою долю в периодические ливневые наводнения. В 1953 г. произошло наводнение Годавари — самое сильное за 50 лет, а в 1955 г. многие реки Индии достигли самого высокого уровня из когда-либо отмечавшихся.

Южный Китай регулярно подвергается воздействию тропических воздушных масс и циклонов (тайфунов) тропического происхождения, приносящих большое количество осадков. В июле 1931 г. проливной дождь вызвал в долине реки Янцзы наводнение, самое сильное со времени начала гидрологических наблюдений. Один из наиболее плотно населенных районов мира ежегодно затопляется паводковыми водами реки Хуанхэ, которая вот уже 4 тыс. лет опустошает наводнениями селения, на ее берегах, и прозвана «горем Китая» (см. раздел 7.4).

Регулярные разливы Нила в течение тысячелетий используются в Египте для полива и возобновления плодородия почв, но размер ежегодных паводков предсказать нельзя, пока массы влажного воздуха с южной Атлантики не достигнут, пройдя через всю Африку, верховьев Голубого Нила на Абиссинском нагорье.

Особенно сильное влияние оказывают дожди на реки США. Южные штаты подвергаются воздействию тропических ураганов, приходящих с Мексиканского залива и центральной Атлантики. Западные штаты оказываются на пути штормовых ветров, сопровождающихся затяжными дождями. Над центральными штатами происходит столкновение влажного тропического воздуха Мексиканского залива с полярными материковыми воздушными массами. Разлив реки Канзас в июле 1951 г. привел к одному из сильнейших в этом столетии наводнений, связанных с ливневыми дождями.

Наводнения, вызываемые ураганами, являются обычным явлением на побережье и Вест-, и Ост-Индии. Высокие приливы и дующие с океана ветры часто, хотя и не так регулярно, обрушиваются на берега северной Европы. В 1099 г. штормовой прилив затопил берега Англии, Нидерландов и Бельгии, погибло почти 2000 человек. Тропические штормы, такие, как ураган «Карла» который опустошил тexasское побережье США в сентябре 1961 г., приносят большой ущерб (в 1961 г. — 1100 млн. долл.), причиняемый сильными ветрами и высокими приливными волнами. Ураган «Бетси» (сентябрь 1965 г.) уничтожил *застрахованного* имущества на сумму 715 млн. долл.

Иногда возникает необычное взаимное пространственное расположение Земли, Луны и Солнца, приводящее к исключительно высоким приливам; это случалось за последние 300 лет около 20 раз. Низменные участки побережья, например город Венеция, могут оказаться сильно затопленными, если неблагоприятные ветры совпадут с такими высокими приливами. В подобных условиях в марте 1962 г. сильные ураганные ветры обрушились на побережье штатов Нью-Йорк, Делавэр и Северная Каролина, они причинили ущерб на большой площади и унесли 40 человеческих жизней.

Наводнения, возникающие на побережье в результате цунами, принесли большой ущерб Японии; не один раз такие случаи отмечены на Гавайских островах (например, в апреле 1946 г.), в Лиссабоне (в 1755 г.), в Кресент-Сити, Калифорния, США (1964 г.). Более подробно цунами рассмотрены в гл. 3.

Таяние снегов чаще всего дает добавочную воду при наводнениях, связанных с дождями, но в отдельных случаях и само может стать причиной крупного наводнения. Резкая оттепель ускоряет таяние, и накопление воды приводит к ее прорыву.



Однако такие паводки в отличие от дождевых медленно достигают максимального уровня, и это дает время для предупреждения тех, кто находится в опасности, и для принятия защитных мер.

Наводнения, вызванные таянием снегов и охватившие в марте и апреле 1961 г. верхнюю часть бассейна реки Миссисипи, типичны для северных широт. Оттепель в середине февраля привела к таянию какой-то части накопившегося снега, вода собралась в верхней корке почвенного слоя и снова замерзла; в марте выпало много снега, а затем температура повысилась. Во время сильного дождя началось таяние снега; оно ускорилося благодаря дальнейшему потеплению, и дождевые и талые воды затопили большую площадь. Много воды вынесли притоки и местные ручьи, в результате чего сильно пострадали районы вдоль главных рек. Трагические последствия вызвало таяние снега и образование грязевого потока, хлынувшего из кратера вулкана Руапеху, в Новой Зеландии в 1953 г. (см. раздел. 2.2).

Если после долгой холодной зимы резко начинается оттепель, то может оказаться, что речной лед почти не размягчается, и его ломка происходит не так легко, как обычно. Вздущаяся река разламывает ледовый панцирь на большие жесткие куски и пластины, которые образуют заторы в узких местах русла или у мостов, создавая тем самым запруды. Река выше затора разливается, а когда напор воды преодолевает запруду, волна наводнения распространяется по долине, принося разрушения.

Прорывы ледниковых вод могут вызвать наводнения с чрезвычайно высоким расходом воды. Внезапное высвобождение воды, скопившейся под ледником, называют исландским словом *йёкудльхлауп*. Озеро Талсекуа в Британской Колумбии, Канада, образовалось в долине, упирающейся в ледник, когда уровень озера доходит до определенной высоты, вода поднимает ледниковый лед, начинает вытекать по мелким трещинам и туннелям в леднике, и в конце концов происходит резкий спуск озера. Йёкудльхлауп в июле 1958 г. за три дня понизил уровень озера на 60 м.

В Западной Европе и в США в этом столетии отмечено около 34 случаев прорыва плотин; когда резко разрушаются такие сооружения, могут возникнуть крупные наводнения с опустошительными последствиями. Плотина Сент-Франсис высотой 62,5 м, построенная на одном из притоков реки Санта-Клара примерно в 70 км к северу от Лос-Анджелеса, была прорвана около полуночи 12 марта 1928 г. В результате разрушения плотины за один час высвободилось 46,5 млн. м<sup>3</sup> воды (мощность потока составляла 11—14 тыс. м<sup>3</sup>/с). Обрушение другой калифорнийской плотины — Болдуин-Хилс — описано в разделе 7.4. В Мальпасе, Франция, в 1959 г. и на реке Титон, Айдахо, в 1976 г.

также произошло разрушение плотин, но в последнем случае это не было связано с геологией.

Оползание крупных земляных масс иногда приводит к образованию временной плотины; скапливающаяся позади нее вода может вызвать наводнение либо перелившись через запруду, либо прорвав ее. Так, лавина, сорвавшаяся в 1962 г. с горы Уаскаран, создала временную плотину из обломочного материала, после чего произошло серьезное наводнение (см. раздел 6.4). В случае, который имел место в 1963 г. у плотины Вайонт, лавина земли и камня соскользнула в водохранилище (см. гл. 3 и 4) и вытолкнула громадный водяной вал, который перекатился через плотину и пронесся по узкой долине.

В разделе 7.2 описаны некоторые важные причины, приводящие к разрушительным ливневым наводнениям в долинах рек. Почему только некоторые бури производят такие наводнения? В отдельных районах сильный дождь случается редко, и бывает так, что накануне катастрофического наводнения никто не подозревает о нем; в других районах угрозу наводнения можно предсказать за несколько недель или дней.

**Влияние геологических факторов на формирование наводнений.** При наводнениях затопляется местность, размывается грунт, несущиеся по воде обломки ударяются о постройки и мосты; ценное имущество покрывается слоем грязи. Поскольку все эти виды ущерба связаны и с геологическим строением того бассейна, из которого вода поступает в затопляемый район, при оценке опасности наводнений геологическая карта области является полезным дополнением к метеорологическим и гидрологическим картам и аэрофотоснимкам.

При любой силе дождя величина стока зависит от растительности и от характеристик почвенного слоя и горных пород, на которые выпадают осадки. Размываемость поверхности области стока определяется ее физическими свойствами и покрывающей ее растительностью. Следовательно, состав и количество материала, смываемого со склонов в русла рек и уносимого ими вниз по долине, зависит от свойств поверхностных пород и почв. Характер обломочного материала, отлагающегося при наводнениях, также зависит от геологических факторов; например, если область водосбора сложена плохо консолидированными, тонкозернистыми осадочными образованиями, то отлагающийся материал будет состоять из грязи и ила; если же эта область сложена главным образом прочными породами, то среди продуктов размыва будет более грубый материал. Величина отношения грубого материала к тонкому определяется количеством осадков, крутизной склонов, а также физическими свойствами пород, слагающих речной бассейн.

Некоторая доля выпадающих на площадь осадков перехватывается растительностью — дождевые капли задерживаются на листьях; в сильно залесенных или покрытых густой травой районах влага, выпадающая в виде легкого дождя, вообще не достигает земли и возвращается затем в атмосферу посредством испарения. Доля перехваченной воды уменьшается по мере того, как листва насыщается ею, и становится незначительной во время длительных сильных дождей. Эта доля не связана с геологическими условиями, если не считать того, что на характер и плотность растительного покрова влияет состав почв, покрывающих данную площадь.

Дождь может выпадать прямо на водонепроницаемую поверхность, например на обнажения скальных пород, на крыши или на дорожные мостовые, и тогда вода стекает вниз по склону. Часть стока 1) задерживается в трещинах и понижениях поверхности, 2) испаряется или 3) поглощается почвенным слоем или проницаемыми трещиноватыми породами, лежащими на пути воды. Дождевая вода может пролиться и над областью развития проницаемых пород и сразу же просочиться в нижележащие образования; часть этой воды возвращается к поверхности в результате капиллярного эффекта, всасывается корневой системой и теряется затем в процессе испарения и транспирации. Какое-то количество просачивающейся воды достигает уровня грунтовых вод, создает избыточное давление и заставляет грунтовые воды перемещаться латерально; этот подземный поток обычно соединяется на пониженных участках с поверхностными водами. Движение воды через интерстиции почвенного слоя и трещины горных пород происходит обычно гораздо медленнее, чем стекание по поверхности, так что эта вода достигает рек и ручьев значительно позднее и не увеличивает силу паводкового потока.

В некоторых районах сильно проницаемые отложения отделяются от подстилающих пород неглубокими непроницаемыми границами. В этих случаях фильтрующаяся вода может двигаться латерально со скоростью, сравнимой со скоростью поверхностного стока, и такой вид глубинного течения воды называется *подземным ливневым потоком*. Когда такой поток достигает русла водотока одновременно с поверхностными водами, эти два потока соединяются и наводнение усиливается. Подземный ливневый поток образуется в грубообломочных грунтах, таких, как делювиальные и оползневые отложения. Быстрые подземные потоки возникают и в районах, сложенных карбонатными породами — известняками и доломитами. Эти породы растворяются грунтовыми водами, имеющими некоторую кислотность; в результате в породах образуются каналы растворения и пещеры, открывающиеся на поверхность. Такие подземные

полости, известные как *карстовые*, часто заполняются потоками подземных вод, кое-где целые реки уходят под землю в тех местах, где они прорезают породы такого типа.

Максимальное количество воды, поглощаемой при определенных условиях, называется инфильтрационной емкостью речного бассейна или какой-то его части. Среди важных факторов, влияющих на способность поверхностных и подстилающих пород впитывать воду, надо указать 1) их влажность, 2) водопроницаемость, 3) мощность слоя и 4) глубину, до которой распространяются в них норки животных, ходы червей и насекомых, остатки сгнивших корней. Наибольшее значение из этих факторов имеет обычно влажность (влагосодержание) почвы. Поэтому в большинстве районов инфильтрационная емкость наиболее высока в начале сильного дождя, когда поры в грунте пустые, и уменьшается при затяжном дожде. Поверхностный ливневый поток возникает только в том случае, если скорость выпадения осадков превышает скорость инфильтрации. Когда это происходит, понижения на поверхности переполняются водой и образуется ливневый поток. Объем воды, необходимый для заполнения всевозможных воронок и неровностей рельефа, называется *запасом воды* в понижениях рельефа; в зависимости от свойств поверхности эта вода в конце концов либо возвращается в атмосферу, либо медленно просачивается в грунт.

Из общего количества ливневых осадков часть теряется в процессе испарения и транспирации, а часть уходит по интерстициям почвенного слоя и трещинам горных пород. Та доля осадков, которая не перехватывается листвой и непроницаемыми поверхностями, не теряется при испарении и транспирации и не задерживается при медленной инфильтрации, образует быстрые ливневые потоки, усиливающие наводнение.

Потоки могут быть названы *размывающими* (эрозионными) или *намывающими* (аккумулятивными) в зависимости от того, уносят они материал или откладывают его. Способность потока переносить взвешенный в воде материал зависит от расхода воды, глубины и скорости потока. Если поток несет материала меньше, чем позволяют эти его характеристики, и течет по размываемым породам, то он производит выпаивающее (эродирующее) действие. Прочные изверженные и метаморфические породы, а также хорошо уплотненные осадочные образования обычно размываются медленно, и, следовательно, искусственные сооружения, построенные на таких породах, при наводнениях редко оказываются подмытыми. И наоборот, рыхлые отложения, выветрелые и химически измененные породы менее устойчивы и едва ли могут считаться хорошим основанием для построек, возводимых на территориях, которые подвержены воздействию быстро текущей воды.

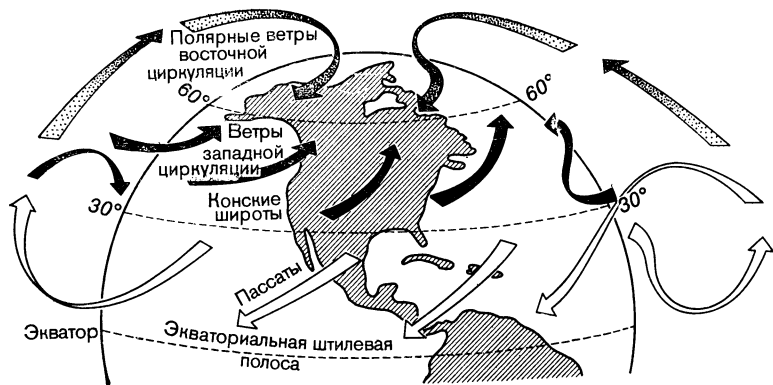
Ливневые потоки смывают материал скальных и рыхлых пород со склонов, расположенных в бассейне реки, и несут этот материал к ее руслу. Там, где склоны крутые и сложены рыхлыми породами или покрыты слабо консолидированным почвенным слоем, после сильных ливней возникают лавины, оползни или грязевые потоки (см. гл. 4). Такие движущиеся массы ударяют в оказавшиеся на пути постройки и повреждают их. Твердый материал, смытый со склонов в области водосбора, задерживается в руслах рек и ручьев и затем уносится потоками, обычно в период наводнений.

Так могут возникать запруды в глубоких каньонах, прорезанных в непрочных породах. Подобное время от времени случается на реках, пересекающих северные береговые хребты Калифорнии, которые сложены в основном породами францисканской формации — комплексом выветрелых и разрушенных глинистых сланцев, песчаников, кремнистых и изверженных пород, настолько подверженных оползанию, что образуемый ими рельеф называют «беспокойным» (*restless topography*). Характерной особенностью этого района является постоянная возможность возникновения крупных оползней, способных перекрыть долину и образовать значительное озеро. Переполнение такого озера и последующее обрушение высокой оползневой плотины приводят к возникновению разрушительного водяного вала, который может пронестись по низовьям долины, плотно застроенным типовыми домами.

Озеро Эрткуэйк («Землетрясение»), одно из достопримечательностей долины реки Мадисон в штате Монтана, образовалось в результате того, что реку завалил крупный оползень, сорвавшийся в 1959 г. при землетрясении Хебген-Лейк. Этот оползень содержал как грубый, так и тонкообломочный материал, причем большая часть тонкого материала оказалась на той стороне оползневого тела, которая была выше по долине. Такое случайное сочетание условий послужило причиной того, что образовавшаяся плотина имела как бы защитный фильтр, который воспрепятствовал эрозии и подмыву плотины, когда вода стала переливаться через нее. Иначе сложилась судьба других оползневых плотин. Некоторые из них, особенно в Андах (в Южной Америке), разрушились, в результате чего возникли опустошительные потоки, состоящие из камня, грязи и воды.

## 7.2. Некоторые данные о наводнениях

**Штормы.** Вращение Земли отклоняет течение нагретого воздуха, поднимающегося над экватором и смещающегося к полюсам. Как показано на фиг. 7.2, когда более холодный воздух



Фиг. 7.2. Схема движения воздуха в северном полушарии.

достигает широты  $30^\circ$ , то часть его уходит в северном полушарии на восток, образуя субтропическое струйное течение. Значительная часть этого воздуха замедляется и опускается в районе «конских широт»<sup>1</sup>, замещая там поднимающийся экваториальный воздух. Воздух, движущийся (в северном полушарии) на юг, поворачивает на запад и образует пассаты, а часть опускавшихся воздушных масс движется на север и затем отклоняется на восток, создавая ветры западной циркуляции, дующие в средних широтах.

Не весь воздух опускается у средних широт из верхних слоев атмосферы; некоторая его часть продолжает двигаться на север, охлаждаясь путем излучения тепла, и в конце концов опускается в районе Северного полюса. Двигаясь на юг, этот полярный воздух попадает в зону преимущественной западной циркуляции и принимает вид огромных поверхностных вихрей, причем в местах столкновения потоков образуются ячеи высокого и низкого давления. В областях высокого давления холодный, тяжелый воздух под действием вращения Земли постепенно вовлекается в спиральное движение в направлении по часовой стрелке. Зарождаясь на севере, такие вихревые потоки устремляются на юг и, например над Северной Америкой, могут дойти зимой даже до Мексики. Обычно диаметр подобной спирали составляет несколько сотен километров, но некоторые из них могут захватывать всю территорию США к востоку от Скалистых гор. Между ячейками высокого давления располагаются ячейки низкого давления, в которых вращение происходит (в северном полушарии) против часовой стрелки. С этими центрами низкого давления

<sup>1</sup> Конские широты —  $30-35^\circ$ , штилевая полоса в океанах. — *Прим. перев.*

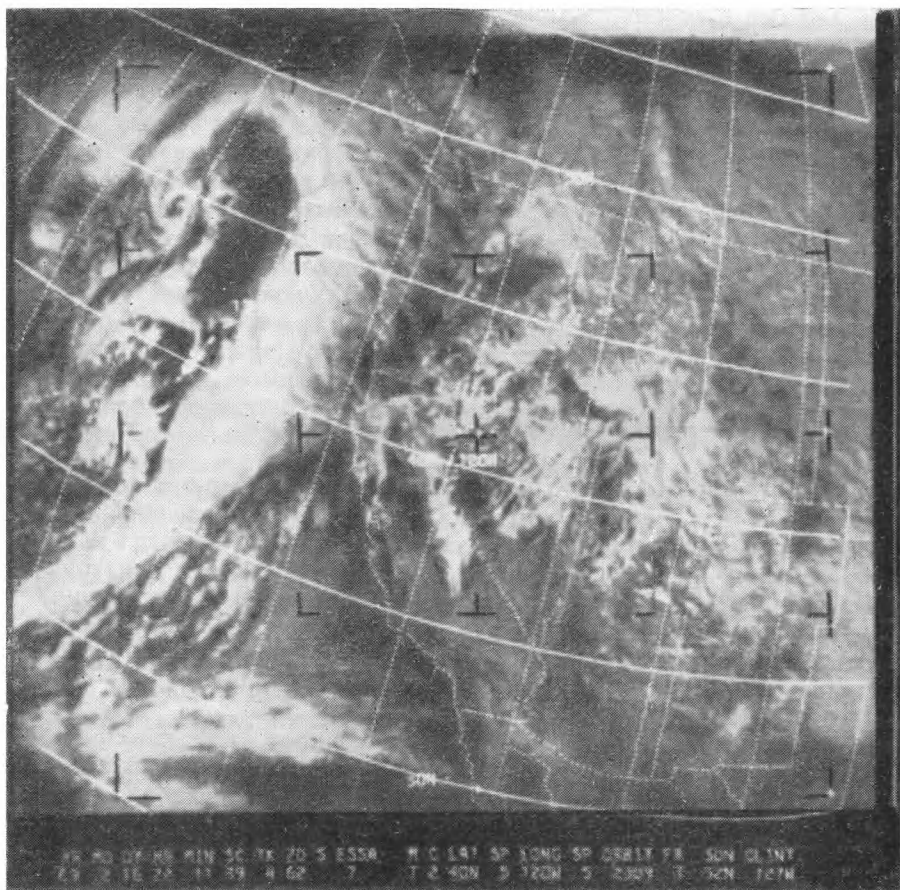


Фото 7.3. Снимок из космоса, на котором ясно виден атмосферный фронт, приближающийся к Западному побережью США.

связаны атмосферные фронты, представляющие собой границы между теплыми и холодными воздушными массами; вдоль этих фронтов образуются тучи и выпадают осадки.

Эти главные черты погодного механизма Земли хорошо изучены метеорологами, но правильное использование имеющихся данных для предсказания штормов, при которых выделяется много влаги, все еще больше относится к области искусства, чем к науке. Каждый год приносит новые сведения и более совершенные физические модели, космические снимки обширных областей земной поверхности на непрерывной основе стали важ-

ным подспорьем синоптиков (см. фото 7.3). По серии таких снимков можно проследить ячеи высокого и низкого давления, нанести на карту движение фронтов и произвести оценку количества осадков, продолжительности атмосферных явлений, вероятности возникновения штормов.

Например, в Калифорнии дожди выпадают главным образом в зимнюю половину года, примерно от октября до апреля. В эти периоды тихоокеанская ячея высокого давления ослабевает и смещается к югу, а алеутский центр низкого давления усиливается. Мигрирующий штормовой фронт, формирующийся в центральных и западных районах Тихого океана, вливается в алеутский центр низкого давления и делает его более активным. В середине зимы и в весенние месяцы штормы смещаются дальше к югу. Прохождение центров низкого давления и связанных с ними атмосферных фронтов над территорией Калифорнии вызывает там зимние дожди.

Благодаря особенностям рельефа Калифорнии с его меридионально ориентированными горными хребтами выпадение осадков связано там в основном с подъемом влажных воздушных масс по мере того, как фронты преодолевают горные барьеры. Когда теплая воздушная масса поднимается, она занимает больший объем и охлаждается, водяной пар конденсируется и вода выпадает в виде дождя. Механизм подъема воздуха, связанный с фронтами и с центрами низкого давления, также играет свою роль в выпадении *осадков в горных районах* (orographic gain).

Сильные дожди в Калифорнии возникают при таких погодных условиях, когда алеутский центр низкого давления смещается на юго-восток и сдвигает полосу мигрирующих штормов к югу, так что образуется сильный воздушный поток в сторону Калифорнии. Прохождение нескольких штормов, разделенных только небольшими перерывами, вызывает затяжные дожди. Поскольку подъем воздуха в горы играет такую важную роль, ясно, что обильные дожди обусловлены сильными ветрами (особенно в нижнем 3-километровом слое атмосферы) и высокой влажностью воздуха.

Атмосферный уровень, на котором дождь сменяется снегом, зависит от вида шторма и от географического положения местности. Уровень замерзания может подниматься до 3000 м и опускаться до 600 м. Особенно опасны в смысле возникновения наводнений теплые штормы, так как осадки в этом случае даже на больших высотах выпадают в виде дождя и сразу же стекают по склонам, а не остаются в виде снежного покрова. Если на горных склонах присутствует старый снежный покров, то под влиянием теплых проливных дождей он тает, и талые воды усиливают ливневый поток.



Из-за большой крутизны склонов речных каньонов в горных районах Калифорнии ливневые потоки имеют там большую скорость. Максимальный сток, по данным многих гидрологических станций, расположенных в предгорьях, происходит в течение нескольких часов после окончания самых сильных ливней, выпадающих в горных районах. Если русла рек не могут вместить всю стекающую со склонов воду и если повреждаются защитные дамбы, вода разливается по днищу долины и затопляет соседние земли.

Мощные ливневые потоки обусловлены также и состоянием грунтов на горных склонах. Если почвенный слой оказался водонасыщенным в результате недавно прошедших дождей, при новом шторме грунт впитывает мало воды и ее большая часть стекает со склонов. Доля дождевой воды, образующая непосредственный сток, меняется примерно от 15% при ливнях, начинающихся сразу же после продолжительного сухого периода, до 60%, когда дождь падает на влажную землю.

На ограниченных площадях наводнение может возникнуть от сильных местных ливней. Например, если среди общей штормовой облачной массы появляется конвективный поток, то это приводит к грозам. Бурные грозовые дожди, захватывающие площади порядка 25—130 км<sup>2</sup>, вызывают мощные ливневые потоки, переполняющие ручьи и реки. В горных и пустынных районах южной Калифорнии грозы обычно бывают в конце лета и осенью. Воздушные массы в это время идут в южную Калифорнию от Мексиканского залива, пересекая Техас, Нью-Мексико и Аризону. В южном конце долины Сан-Хракин (см. фото 7.6) при этих грозах возникают значительные грязевые потоки.

Таким образом, для работ, направленных на борьбу с наводнениями в любых районах мира, предсказание штормов имеет очень важное значение. Если бы такой прогноз делался с указанием ожидаемого количества осадков, можно было бы заранее освободить водохранилища, расположенные в верхних частях речных долин, для задержания ливневых потоков, эвакуировать население из тех районов, которым угрожает явная опасность, и подготовить соответствующее оборудование для борьбы с наводнением.

**Русла рек и ручьев.** При изучении проблемы штормов, в результате которых возникают наводнения, первостепенное значение имеет вопрос о *руслах водотоков*. Эти русла должны отводить ливневые потоки в те места, где они не принесут ущерба, но вдоль самих этих русел живет большая часть мирового населения: ведь в течение всего геологического времени реки и ручьи формировали аллювиальные отложения, которые являются самыми лучшими сельскохозяйственными землями.



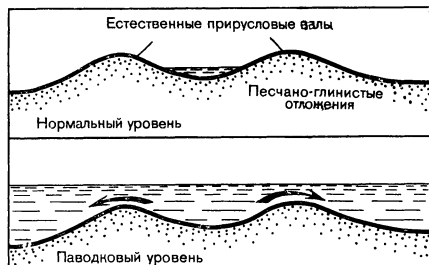
Фото 7.4. Наводнение в графстве Лос-Анджелес, Калифорния, февраль 1969 г.

Ревущий поток вырвался из каньона Биг-Туджанга и уничтожил мосты Футхил-Булвар (верхний мост) и Вентуорт-Пис.

Русла водотоков непрерывно меняют свое положение; это можно легко увидеть, сравнивая карты речной сети, составленные в прошедшие годы, с современным положением русел (см. фото 7.4). В результате эрозии материал размывается в одном месте и откладывается в другом. Поднятие и падение уровня реки в связи с увеличением и уменьшением скорости течения способствуют эрозионной деятельности.

Помимо того, что реки меняют количество материала на разных участках русла, текущая вода сносит размывтый материал из области водосбора в более низкие части русла. В результате этого русла водотоков, проходящие по почти плоским долинам,

часто располагаются на аллювиальных гребнях. участки земли, непосредственно прилегающие к реке, оказываются выше, чем более удаленные площади (фиг. 7.3). Когда речной поток не может уместиться в свое русло, он разливается по соседним пониженным территориям. В природных условиях русла рек имеют сравнительно ограниченные размеры и пропускают только небольшую часть общего расхода во время паводка. Пониженные участки земли по бокам русла — пойма — забирают большую часть паводковых вод, получая и задерживая большую массу твердого материала, который и осаждается на дне долины. Деятельность человека коренным образом меняет эту обстановку.



Фиг. 7.3. Речное русло на аллювиальном гребне.

В табл. 7.3 показано изменение высоты русла водотока на примере меженных измерений уреза воды в устье реки Юба у Мэрисвилла, Калифорния. Главной причиной повышения уреза

Таблица 7.3

Записи измерений уреза воды на реке Юба, Калифорния

Год	Высота, м	Год	Высота, м
1850	12,1	1905	17,9
1860	13,4	1910	17,0
1870	14,7	1920	16,1
1880	16,8	1930	14,6
1890	16,8	1940	14,4

воды на 6 м за 55 лет был вынос обломков горных пород, попавших в русло реки в результате гидравлической (т.е. с помощью гидромониторов) разработки полезных ископаемых в пределах водосборной области (вдоль склона Сьерра-Невады). В начале нашего века гидравлическая разработка была в Калифорнии запрещена. Такое постепенное накопление осадков, как в приведенном примере, медленно понижает пропускную способность русла для паводковых потоков, так что для компенсации

повышения дна реки и восстановления ее пропускной способности приходится сооружать дамбы.

Русла рек и ручьев в засушливых районах едва ли могут быть постоянными. Процесс эрозии приводит к переносу материала на поверхность поймы и к отложению его в виде конусов выноса. Для зданий, построенных на таких конусах, велика угроза повреждения от наводнений. Отдельные наводнения постепенно размывают непрочный материал, и в какой-то момент паводковый поток может покинуть старое русло. Река Хуанхэ вырвалась в 1852 г. из сложной системы ограждавших ее дамб и защитных стен, перенесла свое русло на 600 км к северу и стала впадать не в Желтое море, а в залив Бохайвань.

Постоянные гидрологические измерения в естественных руслах рек имеют важнейшее значение не только для специалистов по наводнениям, но и для всех тех, кто занимается использованием водных ресурсов. Система оборудования для непрерывной регистрации уровня воды в русле потока называется *гидрологической станцией*. Ее следует располагать у того сечения русла, где изменения будут минимальными, так как для постоянной регистрации необходимо выбирать стабильный профиль реки. Оборудование станции состоит, как правило, из плавучего механизма, помещаемого в специальный колодец, который устраивается возле русла реки и сообщается с ним. Периодически измеряя скорость потока, устанавливают связь между характеристиками течения и состоянием реки. К сожалению, расположение станции делает ее очень уязвимой в периоды наводнений, хотя последние усовершенствования в методах измерения и регистрации уровня воды до какой-то степени уменьшили эту опасность.

Система русел водотоков обеспечивает естественный дренаж речного бассейна, приобретая со временем способность уносить большую часть текущих вод бассейна. В верховьях русла велики, на крутых склонах они врезаны сильнее; в нижней части долин речные русла и затопляемые площади получают и распределяют весь сток. Во время наводнения высота воды в любой точке — это результат поступления воды из различных притоков. Знание того, где бывает максимальная волна наводнения и как она распространяется вниз по долине, имеет важное значение для работ по регулированию стока по данной речной системе, для выпуска предупреждений о наводнениях и для подготовки к ним.

Когда паводковая волна максимальной высоты смещается вниз по долине, накапливая воду, поступающую из притоков, и захватывая содержимое водоемов, это называется «бегущим паводком». Различные приемы разработаны для анализа этого явления, но во всех случаях возникает практически одна и та же

проблема: каков объем воды и какова скорость движения паводковой волны, когда на своем пути она входит в водохранилище и выходит из него? Недостаток данных и времени ограничивает число участков русла, где эта задача может быть решена, но использование быстродействующих ЭВМ с большой памятью сильно увеличивает эти возможности.

Русла крупных водотоков обладают значительной емкостью для приема и переноса паводковых потоков. Если к этой емкости добавить емкость обводных каналов, входящих в гидротехническую систему, то создаются значительные возможности для регулирования стока во время наводнений. В крупных речных системах емкость русел может быть очень большой. В бассейне реки Огайо она составляет около  $7 \cdot 10^{10}$  м<sup>3</sup>, и в этой речной системе полный паводковый сток может уместиться в руслах водотоков за один раз.

**Дожди.** Одна из фаз круговорота воды — выпадение дождя — настолько обычное явление, что мы привыкли думать о нем так, будто нам хорошо известно, как часто он идет, насколько силен и как меняется. Но на самом деле это не так.

Количество осадков устанавливается по количеству воды, накапливающейся в открытом стакане. На метеостанции определяется только то, сколько дождя выпало в определенной точке водосборной области, а поскольку на общее количество атмосферных осадков в бассейне реки влияют и ветер, и окружающая растительность, и размер территории, получаемые данные мало представительны. Использование таких данных для больших площадей представляет собой рискованную экстраполяцию; влияние гроз часто не учитывается вовсе.

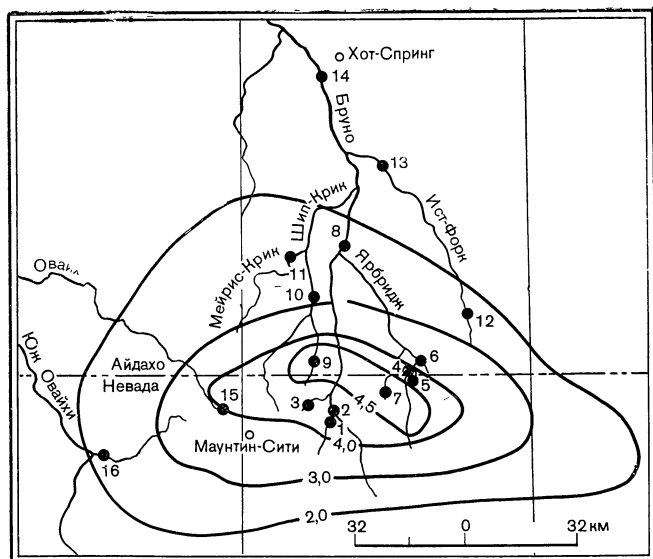
Например, в Калифорнии грозы сильно увеличивают весенний сток рек и ручьев Сьерра-Невады, но до последнего времени нельзя было сказать насколько. За последние несколько лет в разных местах Сьерра-Невады на больших высотах (до 3400 м) были размещены автоматические метеостанции, записывающие количество атмосферных осадков. На площади 230 км<sup>2</sup> проводились измерения грозовой активности, для чего самописцы забрасывались в горы вертолетами в апреле или мае и снимались поздней осенью, до начала снегопадов.

При установке дождемеров должны соблюдаться определенные правила, обеспечивающие представительность получаемой сводки. К сожалению, многие данные, пригодные для анализа и оперативного использования, получают не из представительных мест, а с постов в аэропортах и на высотных домах в крупнейших городах: при размещении таких постов предпочтение отдается удобству.

В США за установку и содержание метеостанций отвечает Национальная служба погоды, которая собирает, анализирует и публикует основные данные в тесном сотрудничестве с местными организациями и отдельными корреспондентами. Полученные данные поступают в распоряжение тех организаций, которые непосредственно занимаются работами по предупреждению наводнений и борьбе с ними. Время подготовки дождя составляет, как правило, одни сутки. Оперативные сведения поступают каждый час или каждые шесть часов. Сводки данных, составляемые четыре раза в сутки, называют *синоптическими* [от греческого *sinoptikos* — обзирающий всё вместе. — Перев.], так как наблюдатели собирают данные в одно и то же время во всем мире независимо от часовых поясов. Только на очень небольшом числе станций наблюдения выполняются через такие малые интервалы, что получаемая запись действительно отражает истинную картину того, как возрастает количество осадков во время дождя.

*Магниту́да* (т. е. размер, масштаб), *продолжительность* и *сила* бурь, или штормов, — это один из главных факторов, используемых при расчете паводковых потоков. Эти величины подвергаются детальному изучению и оценке при проектировании строительства. Столь же большое значение имеют характеристики водосборной площади, или речного бассейна, и способность русла принять прогнозируемые потоки. Из сообщений о крупных разрушительных наводнениях явствует, что все эти факторы находятся в весьма сложной взаимосвязи. В декабре 1964 г. на северном побережье Калифорнии произошло наводнение. Количество выпавших в это время осадков составило около 75 см. Бассейны в тех местах сильно изрезаны из-за частых нашествий штормовых фронтов и из-за того, что породы легко поддаются эрозии. В более обширных бассейнах, таких, как бассейн Миссисипи, для того, чтобы началось наводнение, достаточно значительно меньшего количества осадков.

Для обработки данных о штормовых осадках используются разнообразные методы. Результаты измерений общего количества осадков, выпадающих на той или иной площади в виде дождя, представляют, как правило, в виде карт или схем. Для изображения особенностей распределения общего количества штормовых дождевых осадков на площади бассейна на карте этого бассейна проводят *изогиеты* — линии равного количества осадков (см. фиг. 7.4). Карты изогией можно составить и для определенного интервала времени какого-нибудь одного значительного шторма. Если в пределах площади, охватываемой штормом, имеется несколько метеостанций, то карта изогией достаточно четко отразит распределение дождевых осадков,

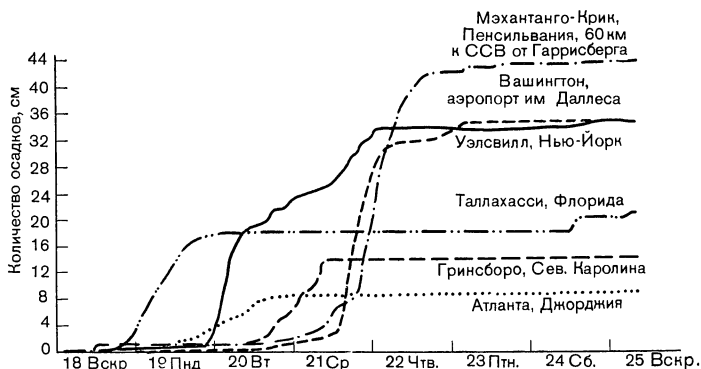


Фиг. 7.4. Изогнеты (линии равного количества дождевых осадков) для небольшой водосборной области за полный период продолжительности шторма.

Сплошные кружки с номерами обозначают положение метеостанций.

однако обычно она может дать только грубое приближение к истинной картине.

Эффективным способом представления вариаций выпадения дождевых осадков, как и общего количества штормовых осад-



Фиг. 7.5. Кумулятивные кривые выпадения дождевых осадков для отдельных мест во время урагана «Агнеса», восток США, 18—25 июня 1972 г.

ков, регистрируемых на данной метеостанции, является построение кумулятивных кривых выпадения осадков. Тщательно подобрав станции, можно быстро и наглядно изобразить особенности проявления шторма на выбранной площади. Фиг. 7.5 показывает продвижение урагана «Агнеса» по территории США в 1972 г. (см. раздел 7.4). Кривая для Таллахасси, Флорида, показывает количество осадков, выпавших в первые сутки урагана, 18—19 июня. За сутки, закончившиеся утром 21 июня, дожди распространились на значительную часть Восточного побережья США.

Кривая для Уэлсвилла, штат Нью-Йорк, показывает, что самые сильные дожди (до 15 см осадков) пролились в начальный период. В течение следующих суток — до утра 22 июня — наибольшее количество осадков выпало в меридиональной полосе, проходящей в центральной части Пенсильвании, а в последний день шторма, 24 июня, только в редких местах количество осадков было больше 1 см.

**Снег и снеготаяние.** Таяние снега может быть единственной причиной наводнения и паводковых потоков и может стать дополнительным источником воды, если на снежный покров проливается дождь. С другой стороны, снежный покров иногда значительно задерживает ожидаемый дождевой паводок. Однако с таянием снега связана очень серьезная опасность наводнений во всех тех местах, где его выпадает много и где за зиму накапливается обширный снежный покров. Например, в Европе значительные паводки возникают в результате снеготаяния в приальпийских областях, особенно в бассейне реки По (в северной Италии) и в долине нижнего Рейна.

Особый вид паводков, вызываемых снеготаянием, наблюдается в Калифорнии — главным образом в южной части Сьерра-Невады, где горные хребты поднимаются выше 5000 м. После особенно снежных зим (например, в 1938, 1952, 1967 и 1969 гг.) резкое повышение температуры в период с апреля по июнь приводит к появлению большого объема талых вод, переполняющих горные реки. Для таких наводнений характерны не резкие максимумы, как во время ливней, а скорее периоды постоянно высокой воды, продолжающиеся несколько недель или месяцев. Водохранилища, сооружаемые в верхних частях склонов и предгорьях, в особо снежные годы бывают не в состоянии принять такой объем талых вод, так что гидротехникам приходится выпускать большие объемы воды в равнинные реки.

Снежный покров содержит большие запасы воды. В регионах с умеренным климатом, например в Центральной Европе, нормальное годовое количество осадков составляет 500—1000 мм. В отличие от этого в калифорнийской Сьерре толщина снежного



покрова часто достигает 5—6,5 м. В качестве иллюстрации в табл. 7.4 показано содержание воды, эквивалентное толщине

**Таблица 7.4**

**Данные о снежном покрове в Калифорнии (апрель 1939 г.)**

Речной бассейн	Высота, м	Высота снежного покрова, см	Содержание воды, см
Станисло	2300	401	198
Мерсед	2650	468	224
Кавиа	2620	498	257
Кинг	3140	361	175

снежного покрова для бассейнов четырех рек Калифорнии. Этот объем воды примерно равен количеству осадков, выпадающих при тропических ливнях, но опасность наводнений в рассматриваемых случаях зависит от скорости и продолжительности снеготаяния.

Для описания и прогноза снеготаяния, происходящего в различных речных бассейнах, разработаны многочисленные математические модели. В табл. 7.5 приведены значения скорости

**Таблица 7.5**

**Скорость снеготаяния в бассейне реки Колумбии, США**

Период		Скорость таяния снега, см/(град·сут)
от	до	
1 декабря 1949 г.	21 января 1950 г.	0,229
21 января 1950 г.	26 января	0,914
15 февраля	28 февраля	0,914
28 февраля	1 марта	0,457
1 марта	22 марта	0,205
22 марта	18 апреля	0,320
18 апреля	8 мая	0,549
8 мая	1 июля	0,457

<sup>1</sup> Пересчитано в градусы Цельсия; в оригинале даны значения, рассчитанные для температур, измеренных по шкале Фаренгейта — *Перее*.

снеготаяния, использованные при изучении этого процесса в бассейне реки Колумбии. Дождь часто считают фактором, усиливающим таяние снега, и роль *теплого* дождя действительно такова, потому что он размывает плотный снежный покров и быстро приносит тепло в его внутренние части, тем самым спо-

собствуя таянию. Однако часто дождевая вода задерживается снежным покровом и мало влияет на его таяние. В качестве важного фактора повышения температуры большее значение имеет теплый ветер.

Простым и практичным инструментом для измерения глубины снега является снегомерная рейка. Это вертикальная стойка, на которой через равные интервалы укреплены горизонтальные поперечины. Снегомер красят в черный цвет и устанавливают в открытой части горного склона, так что его можно фотографировать с самолета и периодически получать сведения о развитии снежного покрова или распространять наблюдения, получаемые наземным путем, на недоступные области.

Созданные в последнее время приборы, а также наблюдения за снежным покровом из космоса позволяют получать много новых гидрологических данных. Создана и быстро развивается методика применения «снежных подушек» (прибора, чувствительного к давлению снега); при этом сведения о накоплении или таянии снега передаются от датчика, установленного в горах, по радио. Этот прибор представляет собой ценное подспорье для прогноза воздействия сильного дождя или быстрого таяния снега на образование паводка в нижних частях долины.

**Бассейн реки.** Территория, дренируемая одной системой рек с притоками, образует водосборную область, или *речной бассейн*. Характер расположения водотоков в этой области связан с ее геологической историей, с текстурой горных пород и с их сопротивлением размыву, и с крутизной склонов.

Южноамериканская река Амазонка занимает первое место в мире по объему воды и по величине бассейна; ее долина представляет собой огромную впадину, заполненную третичными отложениями. С ноября по июнь уровень реки постепенно повышается и затем падает до наступления весны. Уровень паводка на 15 м выше меженного уровня. Осаждение ила происходит на затопляемых площадях в гигантских масштабах, и река заполняет долину своим аллювием.

Тип поверхности, на которую падает дождь или на которой происходит таяние снега, определяет характер паводковых потоков. Понятно, что вода быстрее стекает с крутого склона, чем с более пологого; область, покрытая густой растительностью и толстым почвенным слоем, задерживает попадание воды в русла водотоков, тогда как на скальной поверхности быстро возникают бурлящие ручьи.

Изменение уровня воды в руслах водотоков (*гидрографическая кривая*) является важной характеристикой стока данного речного бассейна, но, как и любые другие виды измерений, взятые в отдельности, оно не может объяснить явления в целом.

Другие важные факторы — это сам режим осадков (т. е. интенсивность и продолжительность дождей), параметры русла, способность русла пропускать поступающую в него воду, а также влажность речного бассейна.

Важнейшим фактором, влияющим на сток, является предшествующее состояние водосборной площади. На Тихоокеанском побережье США октябрьские, ноябрьские, а в иные годы и декабрьские штормы, происходящие после шестимесячного периода засухи и летней жары, только немного смачивают речные русла, тогда как такое же количество осадков в январе, феврале или марте вызывает паводок уже переполненных рек.

Специалисты по прогнозу наводнений описывают предшествующее состояние речного бассейна *суммой накопленных осадков*. Для вычисления этой величины используется простой метод расчета, в котором к величине накопленных осадков ежедневно добавляется количество осадков, выпавших за сутки, и из полученной суммы вычитается величина, учитывающая испарение воды и другие потери.

**Повторяемость наводнений.** Вопрос о частоте повторения высоких паводков или ливней, приводящих к затоплению местности, поднимается после каждого крупного наводнения. Например, спрашивают: «А правда, что такой уровень реки бывает только раз в сто лет?» В свою очередь экономист, обосновывая новые проекты, должен свести потери, связанные с наводнениями, к среднему годовому значению. Следовательно, при возрастающей потребности в правильном использовании пойм и учитывая интерес общественности к вопросу страхования от наводнений чрезвычайно желательно, чтобы была известна средняя частота возникновения паводковых потоков той или иной интенсивности и чтобы можно было с помощью вычислительной техники получать надежные прогнозные данные.

Основная задача анализа повторяемости наводнений состоит в том, чтобы вывести из исторических данных зависимость между интенсивностью наводнений и их частотой, а затем распространить эту зависимость на интервал времени, более продолжительный по сравнению с периодом наблюдений, особенно для целей изучения необычно крупных наводнений. В большинство статистических задач, например в вопрос о страховании жизни, включается большое количество необходимых для анализа данных (см. раздел 8.7). Однако при изучении материалов о наводнениях, когда рассматриваются максимальные размеры наводнений, происходящих каждый год, количество известных экстремальных случаев невелико. Очень редко в развивающихся странах такие данные охватывают периоды времени больше 50 лет, хотя в Европе и Азии можно найти по отдельным районам

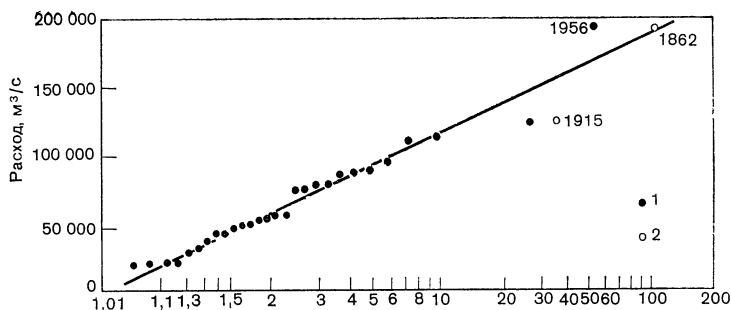
отрывочные сведения многовековой давности (например, данные о морских наводнениях в Голландии, см. раздел 7.4). Таким образом, между статистическими методами, используемыми для оценки опасности наводнений, и более обычными методами анализа существует некоторое различие.

В настоящее время нет какого-либо общепринятого единого статистического метода. Ведомства, которым поручено управление водными ресурсами или планирование нового строительства, используют те способы анализа, которым отдают предпочтение. Учитывая важность оценок частоты наводнений для расширяющихся работ по развитию водных ресурсов и по уменьшению причиняемого наводнениями ущерба, необходимо и в последующие годы совершенствовать методы, позволяющие устанавливать повторяемость наводнений. На фиг. 7.6 дается пример графика повторяемости наводнений для реки Ил у города Скоша (Калифорния).

### 7.3. Борьба с наводнениями

**Область водосбора.** Библейская история о Ноевом ковчеге — это рассказ о первой попытке принять какие-то меры перед лицом неминуемой катастрофы, чтобы избежать гибели. Более современный подход к проблеме наводнений включает принятие как регуляционных (смягчающих), так и превентивных мер. Первый подход предусматривает выполнение строительных работ, направленных либо на то, чтобы приспособить поток к размерам русла, либо на то, чтобы привести русло в соответствие с силой потока. Второй подход учитывает то, что в реальных условиях неизбежно приходится терпеть ущерб, причиняемый высокой водой, но, чтобы избежать *большого* ущерба, надо умело использовать пойменные районы. При таких предположениях можно обсуждать и представление о приемлемом размере ущерба и, кроме того, вопрос о защите некоторой части капитальных вложений путем страхования. Эффективная система мер паводкового контроля должна, конечно, соединять оба подхода. Составные части такой системы, включающей необходимые меры для предупреждения ущерба от наводнений, схематически показаны в табл. 7.6.

Поскольку значительная часть паводковых вод поступает из области водосбора, некоторые меры, регулирующие сток, могут быть осуществлены именно там. Делались попытки строить плотины, производить контурную вспашку и террасирование склонов с целью задержки поверхностного стока и увеличения инфильтрации. Эффективность этих мер обычно зависит от крутизны склонов, характера верхнего слоя грунта, размера



Фиг. 7.6. График повторяемости наводнений для реки Ил у города Скоша, Калифорния, США.

1—максимальный расход, отмеченный в течение расчетного периода с 1932 по 1959 г.;  
2—максимальный расход, отмеченный до расчетного периода.

водоемов и от таких геологических факторов, как проницаемость и пористость горных пород. Однако обычно выясняется, что хотя потоки умеренной силы и небольшие наводнения на малых реках можно регулировать такими способами, для регулирования стока крупных рек эти меры не эффективны.

Таблица 7.6

### Система мер предупреждения ущерба от наводнений

Регуляционные меры		Превентивные меры	
Регулирование стока	Другие меры	Плановое освоение пойм	Другие меры
Плотины и водохранилища	Эвакуация	Нормативное районирование	Политика благоустройства
Ограждающие дамбы	Предсказание наводнений	Плановое развитие различных зон	Сохранение свободного пространства
Реконструкция русел	Обеспечение безопасности при наводнениях	Правила строительства	Налоговые льготы
Реконструкция области водосбора	Урбанизация района	Здравоохранение	Сигналы тревоги Страхование от наводнений

Не все регуляционные меры, осуществляемые в водосборной области, проводятся для исправления режима стока; некоторые работы выполняются с целью уменьшения размыва. Таким образом, в результате этих мер не только сохраняются почвы в водосборной области, но и сводится к минимуму перенос илстого материала и отложение его в низовьях рек: в руслах или

в других местах. Таким образом, русла рек в нижних частях долины сохраняют свою способность пропускать паводковые потоки.

Примером связи между верховьями и низовьями реки служит система противопаводковых сооружений, строящаяся в графстве Лос-Анджелес, Калифорния. Уже построено 106 плотин для задержания насосов в каньонах, питающих реку Лос-Анджелес; эти плотины составляют часть общей системы, в которую войдут плотины, регулирующие расход воды в низовьях, бетонные русла обводных каналов, резервные заливаемые площади (отстойники), ливневые стоки и насосные станции. С помощью указанных задерживающих плотин осуществляется стабилизация русел горных рек, в результате чего уменьшается поступление обломочного материала в водоемы и на другие площади.

Службе охраны почв (федеральное ведомство в США) после пыльных бурь, свирепствовавших в 1930-е годы на Среднем Западе, было поручено проведение работ по программе мелиорации водосборных площадей с целью сохранения почв и водных ресурсов и ослабления паводковых потоков. В 1954 г. был принят «Закон о защите областей водосбора и предотвращения наводнений», согласно которому эти работы объединены и расширены. Используемые для выполнения программы методы включают следующие мероприятия: культивацию земель, совершенствование практики земледелия, углубление и выпрямление русел, сооружение многоцелевых водохранилищ, служащих для водоснабжения жилых районов, зон отдыха, а также для регулирования стока во время наводнений.

**Водохранилища.** Некоторые плотины построены специально для создания водохранилищ, регулирующих расход воды при паводках, т. е. таких водоемов, которые могут задерживать повышение уровня воды в русле путем накопления ее во время наивысшей стадии наводнения. Большинство водохранилищ служат для решения разных задач и называются *многоцелевыми* (см. фото 7.5). Они создают напор для производства электроэнергии, запас воды для орошения земель в засушливый сезон, а также просто представляют собой озера для отдыха. Если водохранилище служит и для регулирования стока при наводнениях, то часть его емкости отводится для этой цели. Часть емкости резервуара, предназначенная для других целей, также может быть использована при наводнениях, но это будет уже нарушением его нормального функционирования.

Действительно, требования к работе водохранилищ часто в корне противоречат одно другому; это вызывает многочисленные споры и иногда приводит к трагедии (см. описание наводнения во Флоренции в разделе 7.1). Ниже перечислены некоторые из этих противоречивых требований.

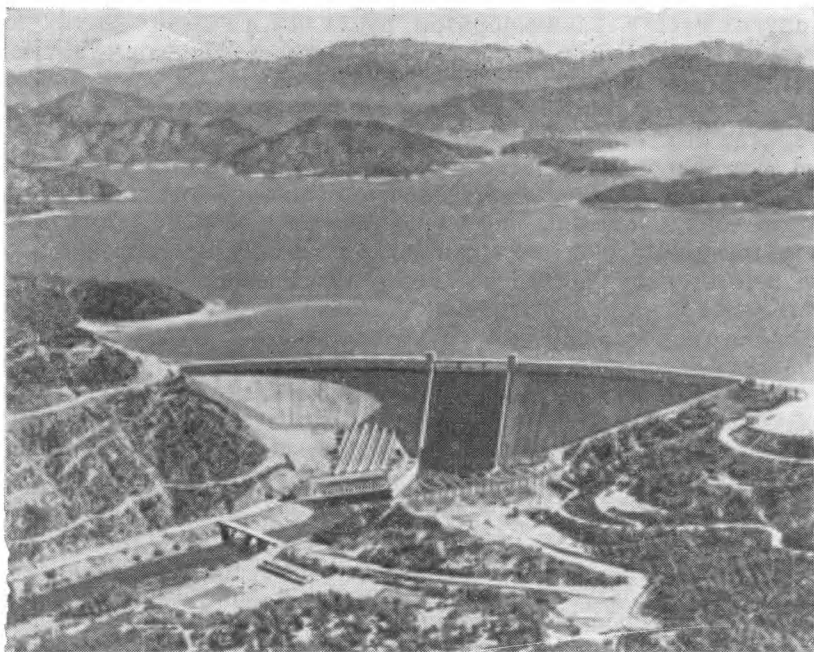


Фото 7.5. Плотина Шаста и многоцелевое водохранилище на реке Сакраменто в северной Калифорнии.  
На заднем плане виден расположенный севернее снежный вулканический пик Шаста.

1) Регулирование стока при наводнениях лучше всего осуществляется тогда, когда водоемы спущены в ожидании наводнения. Как только они наполняются, их надо снова освобождать как можно быстрее.

2) Потребности ирригации и водоснабжения жилых районов требуют, чтобы водохранилище было постоянно наполнено, в полупустынных областях иногда на протяжении нескольких лет, и чтобы объем выпускаемой воды менялся в соответствии с сезонными запросами.

3) Использование водотоков для производства энергии на гидроэлектростанциях требует, чтобы в водохранилище поддерживался по возможности высокий уровень, чтобы вода из него никогда полностью не выпускалась и чтобы ее расход соответствовал потребности в электроэнергии.

4) Поддержание стабильного уровня в водохранилище наиболее благоприятно для сохранения и развития рыбных богатств и животного мира на берегах водоема, так что вся вода никогда не должна из него выпускаться.

5) Как районы отдыха для населения водохранилища служат лучше всего тогда, когда они наполнены и похожи на естественные озера.

Проблемы, связанные с различным использованием водохранилищ, должны решаться строителями и гидрологами, ответственными за работу противопаводковой системы. Главные цели, которые обычно при этом преследуются — это максимальный доход от водоема и минимальный ущерб в нижней части долины.

Работа водохранилища в период наводнения заключается в том, чтобы обеспечить необходимый объем для регулирования стока, но при этом сохранить на требуемом уровне расход воды, например для производства электроэнергии, и принять ливневые потоки и воду, поступающую из боковых долин. И все это при нескольких неизвестных: сколько времени будет продолжаться шторм? Какова будет скорость притока воды?

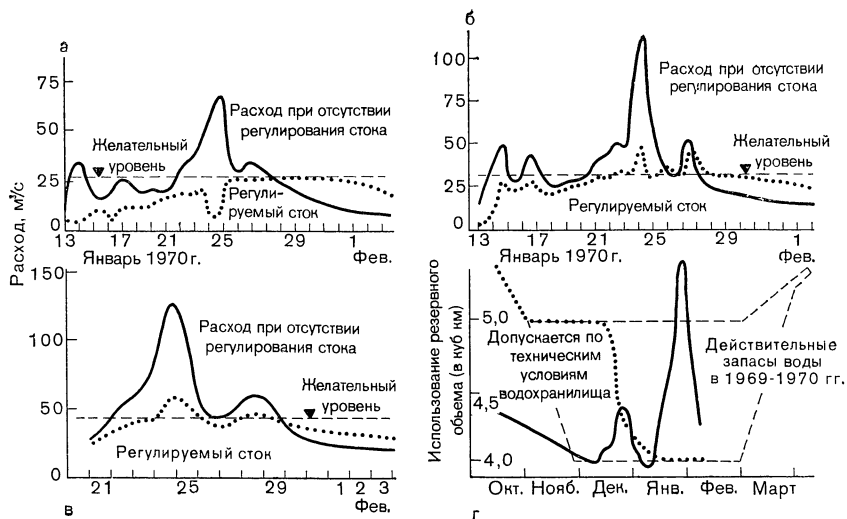
Плотина Шаста в северной Калифорнии (фото 7.5) помогла в январе 1970 г. справиться с наводнением, сильнейшим в истории этой области с 1903 г. (когда началась их регистрация). В течение штормового периода с 8 до 27 января в районе плотины выпало в виде дождя более 86 см осадков, и в озеро Шаста поступило 3,1 млрд. м<sup>3</sup>. Максимальная скорость притока воды была около 6 тыс. м<sup>3</sup> в секунду.

На фиг. 7.7 приведены четыре графика, показывающие результат работы водохранилища Шаста при наводнении 1970 г. График *a* показывает расход реки Сакраменто у города Реддинг (15 км ниже плотины Шаста) — действительный и тот, который был бы при отсутствии регулирования. Как видно на графике *a*, с помощью плотины Шаста удалось задержать повышение расхода реки у Реддинга на величину 2250 м<sup>3</sup>/с, хотя это было крупнейшее наводнение за 70-летний период наблюдений.

Графики *b* и *в* показывают расход реки у Ред-Блаффа (65 км ниже плотины Шаста) и Орд-Ферри (120 км ниже плотины) также при наличии водохранилища и без него. Из этих двух графиков ясно, что хотя плотина Шаста очень существенно снизила мощность паводковых потоков и причиняемый ими ущерб, но ее оказалось недостаточно, чтобы удерживать расход реки Сакраменто на желательном уровне. Причиной этого является поступление воды из нерегулируемых притоков, впадающих в реку ниже водохранилища. Если бы даже вся вода, вытекающая из озера Шаста, была задержана, все равно русло реки у Ред-Блаффа и Орд-Ферри не смогло бы пропустить всю воду, поступавшую из притоков.

График *г* показывает использование водохранилища Шаста в период наводнения. Из графика видно, что в начале этого периода озеро имело уровень, предписанный для задержания





Фиг. 7.7. Графики, показывающие работу водохранилища Шаста по регулированию стока во время наводнения на реке Сакраменто, Калифорния, январь 1970 г.  
а — близ Реддинга (15 км ниже плотины Шаста); б — близ Ред-Блаффа (65 км ниже плотины), в — близ Орд-Ферри (120 км ниже плотины); г — работа водохранилища Шаста.

наводнения, и что для регулирования стока пришлось использовать большую часть его резервной емкости. График показывает также, что основная часть паводковых вод, задержанных в январе, была выпущена в начале февраля, так что был высвобожден объем, необходимый для задержания следующего наводнения, которое должно было произойти позднее в этом же сезоне.

Федеральное правительство контролирует через инженерные войска все федеральные системы регулирования стока, используемые для борьбы с наводнениями. Примером этого служит использование водохранилища Оровилл на реке Фетер в Калифорнии для регулирования стока при наводнениях, хотя плотина там была построена правительством штата для накопления воды, производства электроэнергии, отдыха, рыбного хозяйства и охраны живой природы. Как это предусмотрено принятым в 1958 г. законом о борьбе с наводнениями, между властями штата и федеральным правительством было заключено соглашение, по которому федеральное правительство согласилось оплатить 22% стоимости строительства плотины и водохранилища Оровилл (за исключением расходов на гидроэнергетические сооружения). Тем самым были компенсированы затраты на защиту нижних частей долины от наводнений, возникающих в

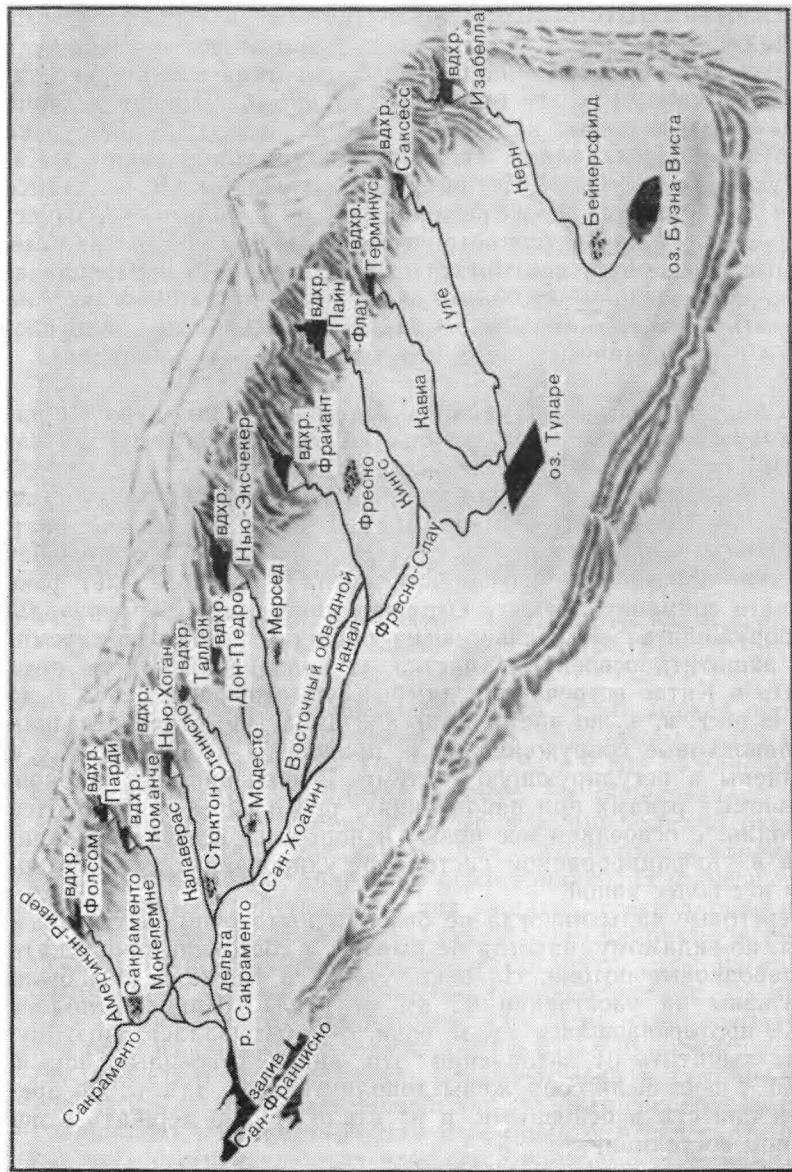


Фото 7.6. Система регулирования стока в долине Сан-Хоакин, Калифорния, использующая плотины в предгорьях Сьерра-Невады и задерживающая озера в долине.

бассейне реки Фетер. Общие расходы федерального правительства составили около 70 млн. долл.

В более сложных речных системах, чем показанная на примере плотины Шаста, регулирование стока связано с другими задачами использования воды и с работой водохранилищ в боковых долинах. Решения, которые принимаются при регулировании стока в каждом отдельном случае наводнения в таких речных системах, как, например, бассейн реки Колумбия, река Миссисипи, округ долины Теннесси, долина Сан-Хоакин в Калифорнии (см. фото 7.6), далеко не очевидны. В последнее время для принятия таких решений начали использовать вычислительную технику и телеметрические гидрологические данные, которые передаются с автоматических датчиков в центр управления. Это сделало проблему разрешимой и даже позволило выбирать оптимальные решения, удовлетворяющие противоречивым требованиям в деле использования водохранилищ.

**Речные дамбы; обуздание реки.** Чаще всего для борьбы с наводнениями во всем мире используют сооружения, предназначенные для того, чтобы удержать поток в его естественном русле. Каждый человек, владеющий какой-либо собственностью вблизи такого русла (как, например, на фото 7.7), хорошо знает, что более высокий прирусловый (береговой) вал обеспечивает большую пропускную способность русла и не позволяет реке заливать пойменную землю. Ограждающие дамбы первоначально сооружались земледельческими общинами, которые стремились защитить освоенные участки от наводнений. Вдоль реки Хуанхэ в Китае встречаются дамбы, существующие с 603 г. до н. э. В 69 г. н. э., во время Хуньской династии, отдельные противопаводковые сооружения были приведены к одному виду и соединены в регулирующую систему. В большинстве районов, заливаемых реками при наводнениях, те же меры принимаются и сегодня; с освоением все новых и новых площадей необходимость в унифицированной системе регулирования стока становится все более явной.

Береговые валы никогда не бывают достаточно высокими, а русла, по-видимому, никогда не бывают в состоянии пропускать все паводковые потоки. На реке Хуанхэ в Китае дамбы были сооружены на расстоянии 25 км от русла. Широкая полоса земли, протягивавшаяся вдоль реки, обрабатывалась. Поэтому, чтобы защитить от затопления эти вновь освоенные земли, ближе к реке были сооружены дополнительные дамбы. Со временем они стали основными, и их стало трудно держать в исправном состоянии.

В настоящее время для решения этой широко распространенной проблемы во многих странах сооружаются обводные кана-



Фото 7.7 Прорыв ограждающей дамбы на реке Фетер, Калифорния, у города Юба-Сити во время наводнения в декабре 1955 г.

лы; в летние месяцы занимаемая ими земля может обрабатываться, а в дождливый зимний сезон эти каналы будут пропускать паводковые потоки (см. фото 7.8а и 7.8б). В главных дамбах, расположенных близко к реке, на определенной высоте делаются проходы, через которые вода при более высоком уровне переливается в обводной канал. Эти проходы играют роль предохранительных клапанов, ограничивающих уровень реки.

Помимо устройства дамб для защиты от наводнений используются и другие способы обуздания реки, например в бассейне реки Ситаун (в Бирме) вдоль оси реки сделаны изгороди из бамбуковых кольев с поперечными перегородками в необходимых местах; назначение боковых изгородей — направлять течение реки на ранних стадиях наводнения по выбранной линии, а на поздних стадиях — управлять разливом реки и затоплением соседних площадей. Современный аналог этого способа, прокладка специально искривленных или спрямленных русел, часто практикуется в густонаселенных районах, где стоимость земли высока.

Местные особенности поймы заметно влияют на исторически сложившиеся способы защиты от наводнений. Например, в очень



Фото 7.8а. На переднем плане вход в обводной канал Колуса, Калифорния, долина реки Сакраменто. На заднем плане — находящиеся восточнее вулканические останцы Саттер.

В сухое лето земли, предназначенные для задержки паводков, обрабатываются.

густонаселенной долине Ганга (в Индии) дамбы имеются только на нескольких коротких отрезках реки. Это объясняется сильной прогнутостью бассейна Ганга, который в отличие от бассейнов некоторых других крупных рек, таких, как Хуанхэ, Янцзы и Сицзян (Жемчужная река) в Китае (см. раздел 7.4), с обеих сторон ограничен возвышенностями. На севере находится высокая стена Гималаев, а на юге — система хребтов широтного простираения. В общем поперечном сечении долина Ганга имеет вид глубокой вогнутой депрессии, причем река занимает в ней самое нижнее (осевое) положение. Русло реки в такой долине стабильно, так что паводковые потоки просто повышают уровень



Фото 7.86. Та же местность, что на фото 7.8а, залитая водами реки Сакраменто.

реки и заливают берега в ограниченной полосе, прилегающей к руслу.

В Южной Америке пойма Амазонки в значительной мере представляет собой демографический вакуум. В бразильской части бассейна Амазонки население не достигает и 3 млн. человек — отчасти потому, что за пределами пойм почвы недостаточно плодородны, а отчасти потому, что сельскохозяйственное освоение пойм Амазонки требует создания крупных и дорогостоящих противопаводковых сооружений. Великие аллювиальные равнины Аргентины в дождливый сезон (с октября по апрель) сильно затопляются. Река Ла-Плата представляет собой устье огромной речной системы, включающей реки Парагвай, Парана и Уругвай с многочисленными притоками. Процесс эрозии протекает в Андах настолько интенсивно, что масса ила, которую несет Парана через Аргентину, создает в этом речном бассейне ряд особенностей. Во время наводнения вода заливают равнину на ширину 50 км, а в сухие периоды река рассечена песчаными косами, которые постоянно меняют ее течение.

**Использование пойм.** На определенном этапе экономического развития общества бывает целесообразно задержать промышленное освоение и строительство на затопляемых площадях, называемых *поймами*. Такие планы в настоящее время встречаются одобрение в Австралии (см. раздел 7.1), США и других местах, поскольку, несмотря на миллиардные расходы на борьбу с наводнениями, ущерб от них каждый год растет. С другой стороны, в Азии, Южной Америке и других районах мира потребность населения в земле, пище и жилье так велика, что там такая форма защиты от наводнений в настоящее время неприемлема.

Для решения проблемы пойм необходимо найти способы оптимального использования площадей, подверженных наводнениям, и тем самым свести к минимуму людские потери и материальный ущерб в тех случаях, когда выполнить инженерные работы, обеспечивающие безопасность от наводнений, экономически невозможно.

При использовании пойменных земель необходимо иметь в виду разные аспекты проблемы. Во-первых, при *очень* сильном наводнении пойменные площади почти наверняка будут затоплены, несмотря ни на какие защитные сооружения, которые можно было бы построить. Во-вторых, такие сооружения создают видимость безопасности, что поощряет развитие строительства, так что дамба, построенная для защиты сельскохозяйственных угодий от больших наводнений, которые случаются раз в 20—25 лет, может оказаться единственной защитой для промышленного предприятия. В этом случае дамбу обычно приходится усиливать и увеличивать в размерах, что требует уже значительных затрат.

Противопаводковые плотины, как, впрочем, и любые другие плотины, расположенные над населенными пунктами, могут представлять опасность для жителей, так как в истории известно немало случаев разрушения плотин (например, в результате землетрясений — как в случае с плотиной Сан-Фернандо близ Лос-Анджелеса в 1971 г.), когда это приводило к наводнению; само устройство плотины несет с собой угрозу наводнений. Современные строительные правила, делающие упор на строгое соблюдение технических условий при проектировании и строительстве, значительно уменьшили опасность обрушения и прорыва плотин.

В сущности имеются два главных пути правильного использования пойм: поддерживать необходимую пропускную способность русла, не допуская образования паводков в результате его сужения, и ограничивать использование пойм.

Отметим некоторые из возможных превентивных мер: 1) использование поймы таким образом, чтобы вода могла причинить

только сравнительно небольшой материальный ущерб, например размещать там парки, спортивные площадки, запасы гравия; 2) размещение только таких сооружений, которые можно легко эвакуировать, например можно оборудовать стоянки для автомобилей с домами-прицепами или развивать там сельское хозяйство; 3) строительство таких зданий и сооружений, которым наводнения не страшны.

**Предсказание наводнений, предупреждение об угрозе наводнений.** Во многих странах мира, подверженных разрушительным наводнениям, пытаются прогнозировать силу надвигающихся бурь. Иногда такой прогноз — это просто предупреждение об опасности. В некоторых районах, по мере развития шторма, делаются и количественные оценки величины штормового стока. На регулируемых водотоках и на тех реках, где имеются противопаводковые сооружения, можно указать ожидаемый объем и время поступления ливневых потоков в регулиционное водохранилище, а также можно прогнозировать различные стадии наводнения по всей длине русла (см. фиг. 7.8).

Предупреждения об опасности резкого подъема воды, связанного с грозовыми ливнями, часто очень неопределенны. В какой-то мере помогают в этом радиолокационные наблюдения, точечные замеры осадков и данные гидрометрических постов, позволяющие делать очень ограниченные прогнозы. Ураганы и тайфуны, продвигающиеся во внутренние районы материка, обычно можно оценить только в целом с точки зрения величины вероятного ущерба. Однако с помощью космических фотоснимков можно заблаговременно предупредить о том, к какому району приближается ураган и когда он подойдет; одновременно можно дать сведения о силе ветра и ожидаемом количестве дождевых осадков.

Пожалуй, наиболее успешно предсказываются наводнения в крупных речных системах, таких, как бассейн Миссисипи (см. фиг. 7.10), где данные о притоке дождевых вод в водохранилища и реки известны за несколько недель до возникновения угрозы. Паводки, вызываемые таянием снега, также поддаются прогнозу, так как количество воды, содержащееся в снежном покрове, можно измерить. Таким образом, можно заранее подготовить водохранилища и позаботиться о пропускной способности русел.

Чтобы служба предсказания наводнений получила признание общественности и административных органов, она должна давать, очевидно, надежные и своевременные прогнозы. Для решения этой трудной задачи такой «центр прогноза наводнений» должен располагать метеорологическими и гидрологическими данными, должен разработать методику прогноза, иметь квалифицированных сотрудников и систему связи, позволяющую





Фиг. 7.8. Различные уровни воды при паводке на не огражденных (*верхняя схема*) и огражденных дамбами (*нижняя схема*) водотоках.

*а* — поперечное сечение типичного неогражденного водотока; *б* — поперечное сечение типичного огражденного водотока.

быстро распространять информацию. Кроме того, чтобы предсказание было полезным, в каждом районе должны быть запланированы эффективные защитные меры и выработана схема эвакуации.

Методы прогноза поведения рек начали разрабатываться на примере крупных наводнений уже в далеком прошлом. Они включают в себя оценку характеристик отмечавшихся раньше штормов, сбор и сопоставление данных о выпадении осадков и режиме водотоков, а также исследование геологических и физико-географических особенностей бассейна. Такое изучение позволяет специалистам по прогнозу находить математическую зависимость между различными меняющимися параметрами. Надежность прогноза зависит и от личного умения прогнозиста: от его опыта и способности оценить общее количество осадков на площади бассейна для каждого периода и определить, какое воздействие окажут дожди, ожидаемые в предстоящий период.

Методы прогноза различны для разных частей речной системы. Ранние прогнозы и предупреждения для верховьев рек основываются на космических снимках и радарных наблюдениях, на анализе метеорологической обстановки, на данных о количестве выпавших и ожидаемых осадков. В последнее время с помощью ЭВМ рассчитывают гидрологические модели речных бассейнов, которые позволяют давать непрерывный прогноз режима реки. Такие методы динамического анализа дают возможность оперативно учитывать изменение влажности в

пределах бассейна, и прогнозист может немедленно увидеть результаты изменения значения отдельных параметров.

Для низовьев реки производится экстраполяция оценок, сделанных по отношению к верхним участкам бассейна. Для успешного решения задачи требуется знание того, сколько воды будет выпущено из водохранилищ, расположенных выше по долине, и сколько воды добавится из боковых долин.

Нелегко оценить те выгоды, которые дает прогноз наводнений и своевременное предупреждение об их угрозе. Выдающиеся примеры того, насколько полезна бывает деятельность службы предсказания наводнений, рассматривались ранее в связи с работой водохранилища Шаста в Калифорнии в январе 1970 г. и приводятся в разделе 7.4 в связи с описанием наводнения на реке Миссисипи в 1973 г. В первом случае заблаговременное знание величины и времени поступления воды в водохранилище позволило задержать его спуск до того времени, когда пройдет вода из притоков, впадающих в основную реку ниже плотины. Прогноз изменения расхода воды в реке Миссисипи оказался ценным инструментом планирования борьбы с наводнениями. Рабочие бригады успели поднять уровень критически низких дамб, укрепить их слабые участки, приготовить необходимые для ремонта мешки с песком, очистить сливные отверстия и обводные каналы (фото 7.9).

## 7.4. Катастрофические наводнения

**Река Нил.** Начиная с 622 г. н. э. подъемы и спады воды в Ниле постоянно регистрируются у ниломера [ниломер — водомерный пост, столб с делениями, используемый для измерения высоты разлива реки. — *Перев.*] на острове Эр-Рода, напротив Каира. В других местах остались более древние (с 1750 г. до н. э.) отметки, отдельные свидетельства истории ежегодно повторяющегося явления — разлива Нила. Обычно подъем и спад воды происходят так регулярно, что Египет был настоящей житницей, снабжавшей продовольствием соседние страны во время засух и голода. Но в отдельные годы из-за того, что регулирование стока почти не проводилось, случались очень высокие наводнения, приводившие к колоссальным бедствиям. Бывали и годы с низким уровнем воды, и даже тогда Нил приносил достаточно воды, чтобы можно было избежать голода. По традиции фараон каждый год объявлял время, когда река достигала уровня, требуемого для открытия дамб и начала полива сельскохозяйственных земель. Вода направлялась на низменные площади, когда уровень Нила достигал у водомерного поста 16 локтей (1 локоть — около 54 см). Земли, расположенные на средней высоте,



Фото 7.9. Ремонтные работы на дамбе вдоль острова Шерман, Калифорния.

заливались при уровне 18 локтей, а высокие — при уровне 20 локтей. В настоящее время из-за накопившегося ила уровень реки в нормальном состоянии составляет  $20\frac{1}{2}$  локтей. Когда вода достигала определенных уровней, происходили особые праздники, причем уровень 16 локтей — «вафа»<sup>1</sup> — считался гарантирующим изобилие и поэтому вызывал великую радость, так как процветание страны и сумма будущих податей зависели от того, достигнет ли вода этой высоты.

Нил — река необычная: длина ее 6 тыс. км и несет она свои воды из тропической области в очень засушливую; в пределах ее бассейна имеются огромные площади влажных (гумидных), полупустынных и пустынных земель. Главный Нил образуется от слияния Белого и Голубого Нила у Хартума, в 3080 км от устья. На всем этом протяжении река течет через

---

<sup>1</sup> Возможно, происходит от древнеегипетского *wp* (начало, открытие) — *Прим. перев.*

очень сухую территорию, и, кроме реки Атбары, Нил почти не имеет здесь притоков.

Вода поступает из двух главных источников: 1) из озер и болот Центральной Африки, т. е. с площади, дренируемой Белым Нилом, где значительную часть года идут тропические дожди, и 2) с возвышенностей Эфиопии, где с июля по сентябрь выпадает в виде дождя много осадков; эту область дренирует один из восточных притоков Белого Нила, а также Голубой Нил и река Атбара.

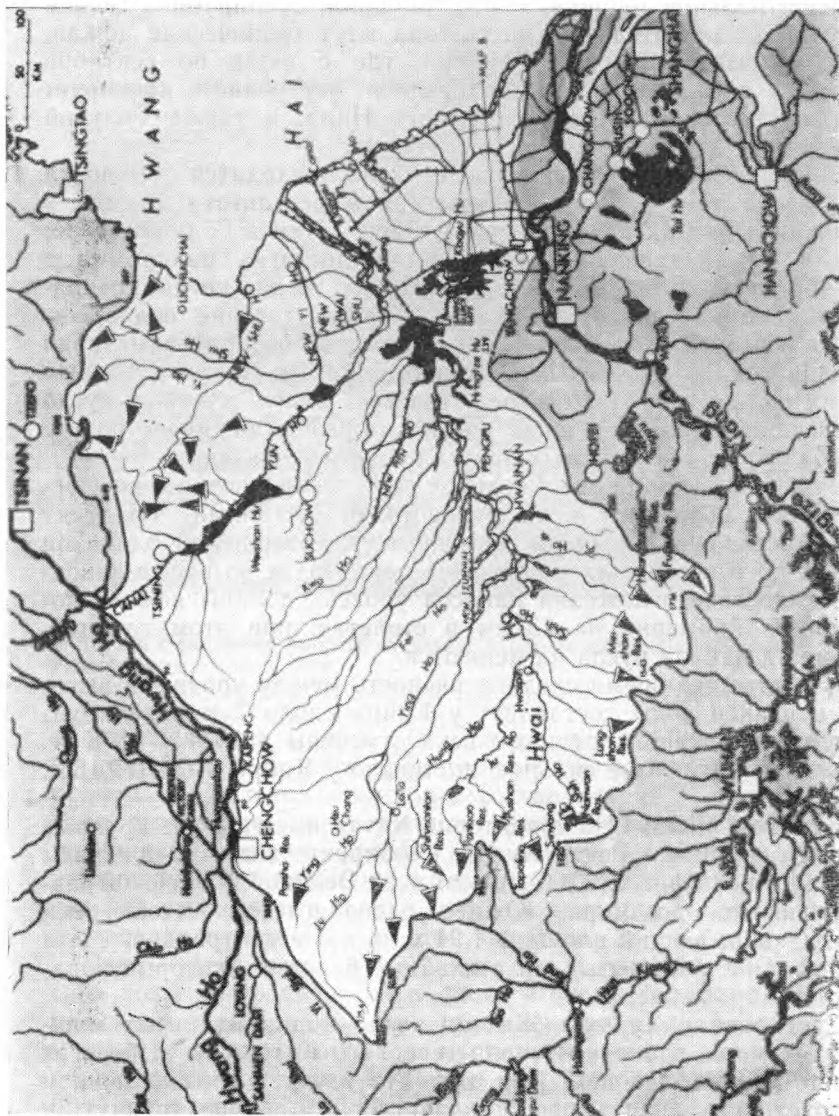
В Египте минимальный уровень Нила приходится обычно на май, после чего уровень повышается в результате дождей в Эфиопии. Паводок начинается в Атбаре, затем в Голубом Ниле; высота его постепенно увеличивается, достигая максимума в сентябре или октябре. Спад происходит тогда, когда прекращаются летние дожди в Эфиопии; зимой течение поддерживается водами Белого Нила. Эта система водосбора эффективно соединяет в себе очень непостоянные потоки, так что водный режим Нила год от года не меняется, а его длинное русло обеспечивает большой запас воды, который сглаживает резкие колебания уровня в разных частях области водосбора.

Вся долина Нила — от великой Асуанской плотины до Средиземного моря — сложена речными отложениями. Градиент реки, составляющий 10 см на километр, совершенно одинаков вплоть до Каира — как при низкой воде, так и во время паводка. Вследствие отложения наносов уровень долины веками повышается примерно на 13 см в столетие, при этом глубина, ширина и наклон русла не меняются.

В настоящее время средняя разность между уровнями высокой и низкой воды составляет у Каира около 7 м. Два крупнейших наводнения прошлого века отмечены в 1874 и 1878 гг. Первое из них, более сильное, достигало у Каира высоты 9,15 м.

**Хуанхэ и Янцзы.** На территории Китая имеются две крупные речные системы. Река Хуанхэ собирает воду с площади 1,25 млн. км<sup>2</sup> (фиг. 1.6 и 7.9) — со всей Великой Китайской равнины вплоть до моря. Южнее располагается бассейн реки Янцзы, занимающий площадь 1,94 млн. км<sup>2</sup> в центральной части страны. Обе реки вызвали стихийные бедствия, которые поражают воображение.

Своенравная Хуанхэ (Желтая река) — одна из самых мощных рек мира, главная артерия северного Китая; на ее берегах живет 60 млн. человек. Для тех, кто изучает эрозию почв и гидротехнику, Хуанхэ представляет гораздо более трудную и увлекательную проблему, чем долина Миссисипи. В своем нижнем течении Хуанхэ не разбивается на рукава и протоки; на протяжении 800 км она течет по возвышающемуся ложу,



Фиг. 7.9. Система противопаводковых плотин и каналов, построенных или строящихся в центральном Китае.  
J. Humlum, «In China, 1972», Gyldendal, Denmark, 1974.

образованному ее наносами. Периодически река прорезает себе новые выходы к морю, причем ее устье за последние 150 лет смещалось по побережью к северу и к югу на полосе длиной 1100 км.

Незадолго до 1927 г. в Китае были предприняты новые усилия по решению проблем, связанных с наводнениями. К работе были привлечены несколько иностранных ученых. У. Лаудермилк, специалист по сохранению почв, Дж. Фримэн, консультант-гидростроитель, и О. Тодд, инженер, бывший консультант Комиссии по Хуанхэ, опубликовали свои отчеты. Здесь приведено несколько выдержек из этих работ, выбранных так, чтобы дать исторический обзор причин, вызывавших разливы Хуанхэ, и того, какое воздействие оказывали наводнения на людей.

О. Тодд писал: «Во всем мире нет, вероятно, другой реки, которая приносит так мало пользы людям, как Желтая река, учитывая плотную населенность района, через который она протекает. Более того, местные жители только отчасти могут защитить себя от ее опустошительной деятельности. Даже как транспортная артерия она не имеет важного значения. Эта река — враг, а не помощник».

Путешествуя по плоским равнинам провинции Хэнань, Лаудермилк видел такие ландшафты: «... огромная плоская гряда протягивалась от горизонта до горизонта. Это была внешняя дамба. Мы взобрались на эту гряду высотой 12—15 м и увидели другую широкую равнину, лежащую примерно на 3 м ниже гребня дамбы. Дальше, примерно в 10 км, располагалась еще одна плоская гряда, на которую мы тоже поднялись. Это была уже внутренняя дамба. Перед нами спокойно катила свои воды Желтая река; она текла по равнине, образованной ее дельтой; наклон русла был всего около 20 см на километр, и река бесшумно откладывала свой ил.

Здесь русло было поднято над поверхностью равнины не меньше чем на 12—15 м. Оно удерживалось в этом приподнятом положении благодаря ручному труду миллионов людей — без механизмов и машин, без стали и строевого леса, без камня. Эти миллионы крестьян с корзинками на коромыслах за тысячи лет голыми руками построили поразительный памятник человеческого сотрудничества и воли к жизни. Я размышлял о том, какие тяготы вынесли эти китайские крестьяне, собиравшиеся миллионами и трудившиеся в обстановке, которая была безнадежной. Ибо река не переставала требовать все более и более высоких дамб. Каждый год, откладывая груз ила, она уменьшала способность своего русла пропускать паводковые воды между дамбами».

Дж. Фримэн специально рассмотрел вопрос о дельте Хуанхэ. «Конус дельты строился из отложений ила в течение миллионов

лет. Поверхность этой дельты очень ровная, и поэтому, когда вода вырывается за пределы своих дамб, она заливают полосу очень большой ширины. Частицы ила исключительно мелкие; они образуются в результате размыва обширных пластов лёсса, которые сформировались, как полагают, путем накопления пыли, принесенной ветром первоначально из пустыни Гоби. Во время своего половодья Желтая река может нести столько ила, что его вес, когда река выходит на аллювиальную равнину, достигает 40 % веса всей этой мутной воды».

В июне 1938 г. японская армия захватила Кайфын, столицу провинции Хэнань. Чтобы остановить продвижение японцев на запад, китайское правительство открыло одну дамбу и направило воды великой реки прямо на юго-восток. Вся местность оказалась во власти буровато-коричневых волн, река пошла к морю по своему старому, брошенному руслу и стала действенной преградой на пути японской армии, которая увязла здесь на значительное время; однако, как рассказывают, это стоило жизни многим тысячам местных жителей, утонувших во время этого наводнения.

В последние десятилетия правительство Китая объявило о проведении всеобщего плана борьбы с наводнениями в бассейне Хуанхэ. В 1956 г. был выдвинут лозунг о строительстве в течение нескольких десятилетий 46 плотин на главном русле реки и многочисленных водохранилищ на ее притоках; они предназначены для задержания паводковых вод, для осаждения ила, для регулирования стока, для ирригации, навигации, производства энергии и промышленного водоснабжения (фото. 7.10). Пройдут десятилетия, прежде чем все эти проекты будут выполнены, и хотя в настоящее время проблемы, связанные с сезонными паводками, стали не такими острыми и появилось больше воды для орошения, строительные работы все еще продвинулись не настолько, чтобы устранить риск крупных наводнений.

Южнее течет другая великая река — Янцзы. Она начинается в горной стране Куньлунь — в той же высокогорной части западного Китая, откуда текут и другие крупнейшие реки Азии: Хуанхэ, Меконг, Иравади и Салуин. Янцзы имеет длину около 4800 км и судоходна до Чунцина. В Ханькоу, одном из трех городов, слившихся в большой город Ухань, в 1030 км от моря, располагаются крупные современные верфи для океанских судов. На одном из притоков Янцзы у ее устья стоит город Шанхай с населением 7 млн. человек.

Во время великого наводнения Янцзы в 1931 г. пострадало около 60 млн. человек, причем люди гибли и в течение всего периода наводнения, и в течение следующей зимы. Янцзы протекает через очень влажный район, имеет сложную систему притоков и всегда многоводна. Сильные дожди вызывают в не-

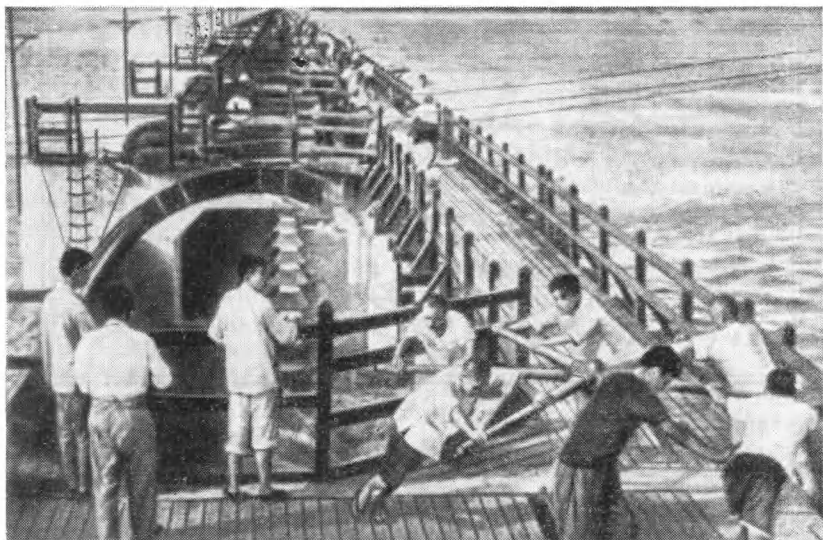


Фото 7.10. Регулирование потока через сливное отверстие плотины противопаводкового водохранилища Тайпингоу на реке Янцзы, Китай [1].

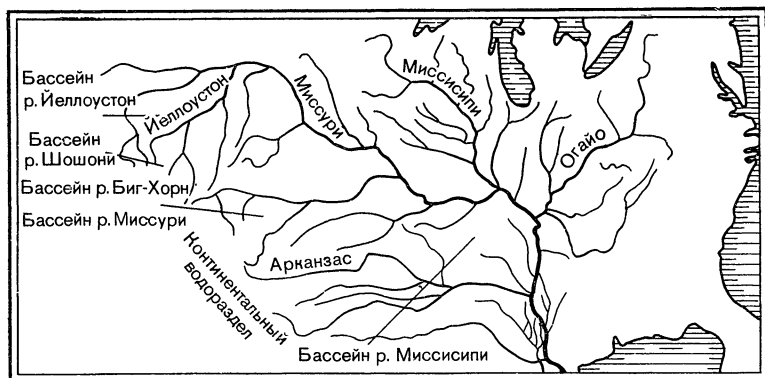
которых частях ее бассейна сезонные наводнения. Западный край бассейна подвергается интенсивной эрозии.

Летом 1954 г. на всей площади бассейна прошли проливные дожди, что вызвало одно из крупнейших в истории наводнений. Больше всего пострадала провинция Хубэй, где лихорадочным темпом проводились строительные работы, чтобы сохранить систему противопаводковых дамб. На территории провинции протяженность главных дамб составляла около 1800 км. Над миллионами жителей нависла непосредственная угроза вторжения воды. Из Уханя сообщалось, что уровень наводнения достиг 30 м. Дамбы, сооруженные предыдущим летом, и непрерывный их ремонт и укрепление во время самого наводнения, когда на них была брошена огромная армия рабочих, спасли город от крайне серьезной опасности.

**Миссисипское наводнение 1973 г.** В 1973 г. на реке Миссисипи, крупнейшей в США и третьей по длине в мире, произошло самое крупное в ее известной истории наводнение.

История борьбы с опасностью наводнений в бассейне Миссисипи (фиг. 7.10) делится на два больших периода: *до* наводнения 1927 г. и *после* него. Наводнение 1927 г. было большим национальным бедствием, но из него были извлечены уроки, касающиеся принципов строительства, экономики и политики.





Фиг. 7.10. Бассейн реки Миссисипи.

Как показано на этой схеме, сток Миссисипи формируется за счет разных ее притоков, имеющих собственные бассейны.

До 1927 г. борьба с наводнениями считалась в США делом в основном местных властей; после этого крупнейшего наводнения проблема перешла в компетенцию федерального правительства.

Миссисипское наводнение в 1973 г. было серьезным испытанием эффективности тех мер в планировании и строительстве, которые проводились и были нацелены на создание защитной системы, состоящей из четырех главных элементов: дамб, обводных каналов, улучшения русел и постройки резервных водоемов в бассейнах крупных притоков. Наводнение показало, до какого уровня может подниматься вода в новых условиях; были проверены все элементы плана регулирования стока при наводнениях: конструкция сооружений, прогноз, последовательность операций, эффективность противопаводковых мер. Площадь затопленных областей (в семи штатах) составила 5,3 млн. га, ущерб был оценен в 420 млн. долл. Если бы защитные меры не были приняты, то, согласно сделанным оценкам, наводнение захватило бы еще 4 млн. га, в том числе крупные индустриальные центры в низовьях реки; ущерб в этом случае был гораздо больше, чем при катастрофе 1927 г.

Причину такого крупного наводнения, как в 1973 г., определить нелегко, так как были захвачены очень большие площади. Бассейн реки Миссисипи занимает 40% основной территории США (без Аляски и Гавайских островов) и включает в себя некоторые районы Канады. Он состоит из трех главных речных систем: бассейна верхнего течения Миссисипи, бассейнов Миссури и Огайо и полосы вдоль нижнего течения Миссисипи от города Кейро (штат Иллинойс) до Нового Орлеана.

В результате затяжных дождей, продолжавшихся все лето и раннюю осень 1972 г., регуляционные водохранилища на притоках начали наполняться, а водосборные области насытились влагой. Водомерные наблюдения в районе Кейро у слияния Миссисипи с Огайо показывали, что параметры режима реки несколько превышают соответствующие значения, отмечавшиеся перед великим наводнением 1927 года. К 11 марта 1973 г. Миссисипи достигла паводкового уровня у Сент-Луиса; наводнение продолжалось в апреле и мае. Сильные дожди в долине Миссисипи не прекращались в течение 8 месяцев, а в верховьях они закончились только 26 апреля 1973 г. К этому времени уровень воды в Кейро равнялся 16 м; уровень паводка — 12,2 м.

Хотя противопаводковые сооружения на Миссисипи и ее притоках рассчитаны на наихудшие условия регулирования стока, при крупном наводнении требуется большая работа, чтобы держать их в исправности и усиливать там, где возникает критическое положение. Дамбы подвергаются размывающему действию речного потока и волновой эрозии (фото 7.9). Главная система ограждения русла Миссисипи включает в себя почти 3500 км дамб и подпорных стен, так что их защита требует больших усилий. Поэтому в 1973 г., несмотря на наличие противопаводковых сооружений и экстренные меры по борьбе с наводнением, потери были все же огромными. К северу от Сент-Луиса вода прорвала (или перелилась через) 39 дамб, затопив тысячи гектаров сельскохозяйственных угодий и незащищенных общинных земель. Сильно повреждены были 300 зданий исторического города Сент-Дженевив (штат Миссури). Сам город Сент-Луис, защищенный противопаводковой стеной, не пострадал.

Большие разливы притоков Миссисипи отмечались в штатах Арканзас, Теннесси и Миссисипи. Четыре водохранилища в бассейне реки Язу, общей емкостью 5 км<sup>3</sup>, наполнились до краев, и прошло много месяцев, прежде чем удалось понизить их уровень. В бассейне Язу было затоплено более 1 млн. га, а сама река текла вровень с берегами и в 1974 г.

Наводнение 1973 г. было самым большим в истории реки Миссисипи. Максимальный расход воды составил 56 800 м<sup>3</sup>/с; этого достаточно, чтобы удовлетворить дневную потребность Нового Орлеана в воде меньше чем за 10 секунд!

**«Низкие земли» (Нидерланды).** Большая часть территории Нидерландов отнята у моря; начало этой работы относится к XIII в. Старые документы рассказывают об истории осушения земель и о катастрофических наводнениях, происходивших на заре средних веков. Хроники 1014 года сообщают, что волны «поднялись до небес». Однако систематический дренаж не

проводился вплоть до XV в., когда стали использовать ветряные мельницы для откачки воды в море из внутренних районов через дамбы. Осушенные земли, или польдеры, составляют в настоящее время значительную часть Нидерландов, в том числе провинций Южная Голландия и Зеландия (польдер — это низменный участок земли, отвоеванный у моря; поверхность его либо располагается на уровне моря, либо ниже этого уровня; от моря отгораживается дамбами). При сильных штормовых наводнениях в Зеландии в 1682 г. было затоплено 27 тыс. га земли, а в 1808 г. — 14 тыс. га.

Разные участки земли имеют различную высоту, поэтому уровень воды в пределах отдельных польдеров неодинаков. В Голландии поверхность осушенных озер, таких, как Бемстер, лежит на уровне около 3,5 м ниже уровня моря. На осушенной части бывшего залива Зейдерзе почвенный слой находится примерно на 6 м ниже уровня моря. Крупные участки земли поддерживаются в пригодном для жизни людей состоянии путем использования сложной системы дамб и польдеров, ветряных мельниц и насосных станций.

В январе 1953 г. в течение двух драматических недель Голландия вела «битву с наводнением». В результате штормов в Северном море защитные сооружения Англии и Голландии были разрушены за несколько дней. К яростному шторму добавилось особое взаимное расположение Земли и Луны, что вызвало исключительно высокий прилив. 31 января бурные морские волны перекатались через дамбы, и в течение считанных часов крупные области Нидерландов оказались отрезанными от материка. Отдельные районы были совершенно изолированы, так что потребовалось несколько дней, чтобы добраться до погибших деревень и затопленных ферм и эвакуировать более 100 тыс. человек.

В первые же часы были нарушены средства сообщения; лондонская служба в портах была приостановлена; по радио поступило 35 призывов о помощи с терпящих бедствие кораблей; морские катера, каботажные и грузовые суда были выброшены на берег; рыболовный флот сорван с якорей. В приморских курортах Схевенингене и Нордвейк-ан-Зе обширные бульвары были завалены галькой, а выходящие на море отели жестоко пострадали от сильного ветра.

Многие дамбы, легко выдерживавшие давление спокойной воды и обычных ветров, были прорваны яростным штормом. В Ставениссе в результате разрушения дамбы грохочущая волна высотой 4 м уничтожила находившиеся за этой дамбой богатые фермы; около 200 человек утонуло. В Роттердаме портовые службы сражались с самым высоким в истории приливом. Нефтеочистительные заводы и береговые сооружения вдоль каналов оказались в воде. Много дней все взгляды были с тревогой уст-

ремлены на дамбу Хогге-Зедейк, защищавшую центральную часть страны. К счастью, дамба выдержала, хотя в ней и образовалась небольшая брешь. Миновала опасность, грозившая 3 миллионам человек.

На некоторых крупных островах, в частности на острове Валхерен, ущерб был особенно велик, списки погибших особенно длинны. Члены семей погибали один за другим, по мере того как дома постепенно разваливались; или же ребенок, а то и взрослый не могли больше выдержат мучительно резкого ветра и ледяной воды. В деревне Толен один мужчина видел, как тонули его жена и 12 детей, и не мог им помочь, оказавшись, как в ловушке, в верхней комнате своего дома. В этой же деревне двое молодых людей — жених и невеста — провели на выступившем гребне дамбы, как на необитаемом острове, более суток. Когда прибыли спасатели, девушка уже умерла от холода и ветра, а жених сошел с ума. Один человек провисел на телеграфных проводах двое суток. Другой зацепился за антенну радио, и, когда через 27 часов его сняли, был еще жив.

Под соленой водой оказалось 100 тыс. гектаров, что составляло около 6% всей обрабатываемой земли Нидерландов. На затопленной территории жило 660 тыс. человек из общего населения страны 10,5 млн. Погибло 1490 человек. Потери домашнего скота были очень велики: утонуло 60 тыс. животных. В Зеландии было уничтожено или сильно повреждено 5 тыс. домов (фото 7.11), тысячи домов пострадали и в других провинциях. По самым скромным подсчетам общий ущерб составил 250 млн. долл., примерно вдвое больше суммы ущерба, причиненного наводнением в Англии во время этого же шторма.

После наводнения было проведено специальное изучение последствий катастрофы и состояния средств сообщения в пораженной области. В целом население вело себя спокойно. Для эвакуации использовались лодки и вертолеты. Поскольку на значительной части затопленной территории телефонная связь и электроснабжение вышли из строя в первые же полчаса, люди вернулись к древним и импровизированным способам общения, таким, как сигнализация с крыш. Печальный опыт, полученный в тяжелых военных условиях при наводнениях 1944—1945 гг., приводил к тому, что представители власти иногда спешили покинуть те места, где опасность была наиболее острой, и оказывались отрезанными от своих служебных постов.

Большую помощь оказало использование радиосвязи, особенно эффективной тогда, когда радистами были рыбаки, знакомые с такой техникой на своих рыболовных судах. С другой стороны, возникали и трудности, связанные с тем, что радиосообщения посылались без ясного указания полномочий радиста, иногда призыв о срочных мерах был недостаточно обоснован. Самой



Фото 7.11. Опустошение на площади польдера Санкт-Филипсланд (в провинции Зеландия), затопленного Северным морем во время сильнейшего наводнения в январе 1953 г.

большой проблемой было плохое знание современных методов связи и отсутствие плана аварийных мер на случай наводнения.

**Бурный паводок в районе гор Блэк-Хилс, Южная Дакота.** Самое тяжелое по количеству человеческих жертв и размеру причиненного ущерба стихийное бедствие, отмеченное в истории Южной Дакоты, произошло 9 и 10 июня 1972 г. Вечером 9 июня с 18 часов до полуночи шел проливной дождь: количество осадков, выпавших меньше чем за 6 часов, достигло 40 см. На реках восточных склонов гор Блэк-Хилс в результате дождей возник *внезапный бурный паводок*. Резкий подъем воды начался и на Рэпид-Крик, живописной и спокойной в обычное время горной реке, протекающей через город Рэпид-Сити. Общее количество осадков, выпавших во время этой бури, почти равнялось годовой норме; такой потоп едва ли может возникать здесь чаще, чем один раз в несколько тысяч лет.



Фото 7.12. Город Клатат на одноименной реке (северная Калифорния) был полностью разрушен бурным паводком в 1964 г.  
После этого город был перенесен на более высокое место.

Как правило, такие бурные паводки производят серьезные локальные разрушения (фото 7.12). При наводнении в Южной Дакоте погибло 237 человек, а общее количество раненых составило 2932; материальный ущерб превысил 120 млн. долл. 750 домов было уничтожено, от 1000 до 2000 машин повреждено наводнением, более 6500 семей понесли материальные потери. В то время на захваченной наводнением площади никаких противопаводковых работ не проводилось, но теперь власти Рэпид-Сити планируют потратить почти 50 млн. долл. для выкупа у частных владельцев земельных участков в пойме реки Рэпид-Крик для превращения их в парк.

**Тропическая буря над аризонской пустыней.** Аризона известна как «штат ясной погоды». Сюда входит часть пустынь юго-запада, для климата которых характерны палящий зной, яростные грозы, сильные ветры и скоротечные ливни. Редко-редко сюда заходят штормы с Тихого океана и тропические бури. Однако именно это произошло 5 и 6 сентября 1970 г.; сильные

дожди вызвали гибель 23 человек — больше, чем при каких-либо других бурях, обрушивавшихся на Аризону в последний период ее истории. Это «рекордное» наводнение повредило множество жилищ, дорог, мостов и других сооружений.

Тропический шторм «Норма», центр которого находился близ южного окончания полуострова Нижняя Калифорния, 3 сентября сместился на север, неся с собой огромную массу влажного воздуха. Севернее, у побережья острова Ванкувер, располагался холодный фронт, и еще один крупный холодный фронт протягивался от северо-западной Монтаны на юг через Айдахо, восточный Орегон и северную Калифорнию. Проникновение на восток потоков влажного тропического воздуха вызвало грозы и дожди в горах, над которыми проходил этот холодный фронт.

На многих метеостанциях были отмечены новые рекорды суточного выпадения осадков, причем наиболее впечатляющими были данные одного поста в горах Сьерра-Анча, где за сутки выпало 28 см осадков — вдвое больше прежнего рекорда. Статистика дождей в этой области показывает, что такое количество осадков бывает здесь только раз в 500 лет. Интенсивность дождя превысила скорость инфильтрации водосборной области, в которой влагоемкость была ограничена тонким слоем рыхлого грунта над коренными породами, и это привело к большому повышению величины стока.

Рассказывают, что наводнение развивалось прямо на глазах и производило страшное впечатление, очевидцы описывают скорость подъема воды как «невероятную». Реки, собирающие воду с площади в несколько сотен квадратных километров, вздувались на 2—3 м за час. Вырванные с корнем деревья, огромные каменные глыбы, ограды, машины и небольшие здания были перемещены потоком вниз по долине на 50—60 км.

Жестокий урок, преподанный этим бедствием, состоит в том, что в пустынных и гористых районах небольшие уединенные речки — излюбленные места отдыха — бывают очень опасными, а неосторожные туристы иногда не отдают себе отчета, насколько уязвимым может оказаться место, выбранное ими для лагеря, в случае резкого подъема воды. Места для стоянок надо выбирать значительно выше нормального уровня реки.

**Ураган «Агнеса», США.** Ураган «Агнеса» считается одним из величайших стихийных бедствий, когда-либо случавшихся на территории США. Отличительной особенностью этого урагана было то, что он за короткое время вызвал разрушительные бурные паводки на громадной площади: от Джорджии на север вплоть до штата Нью-Йорк.

«Агнеса», первый ураган с Атлантики в сезоне 1972 г., вначале ничем не отличался от обычного шторма. Образовавшись

15 июня в барометрической депрессии над морем у побережья Юкатана, шторм разросся и медленно сместился к северу, обрушивая огромное количество воды на западную Кубу и создавая мощные шквалы торнадо над Флоридой. Сила ветров «Агнесы» нигде не выходила за пределы минимальных значений, присущих ураганам, но площадь, захваченная штормовой циркуляцией, была исключительно велика. Медленное развитие урагана обусловило перенос большого количества влаги из глубоких тропиков в полосу штормов, двигавшихся на север. Материальный ущерб, причиненный ураганом и последовавшим за ним наводнением, составил более 3 млрд. долл.; погибло 118 человек.

Большие и малые реки поднялись до рекордного уровня, что привело к опустошительным результатам. Количество осадков, выпавших во время урагана 18—25 июня, составило от 10 до 48 см в некоторых местах. Шторм продолжался около восьми дней, в отдельные моменты дождь достигал чрезвычайной силы. Столица страны — город Вашингтон меньше чем за 18 часов был затоплен больше чем на 28 см: согласно сделанным оценкам, на площади 93 тыс. км<sup>2</sup> выпало 28 см осадков.

Хотя на всей затопленной площади имелись многочисленные дамбы и противопаводковые сооружения, многие из них не смогли противостоять этой буре. В некоторых случаях вода задержалась между дамбами, и в течение нескольких недель после наводнения потребовалось много сил, чтобы откачать ее или отвести обратно в русла рек.

Ликвидация последствий катастрофы потребовала беспрецедентно больших усилий всех жителей этой области и получила поддержку на всех административных уровнях. Один из чиновников, принимавших участие в уборке, заметил: «После «Агнесы» остался такой хаос разрушений и такая бюрократическая неразбериха, что за какое дело ни возьмись, приходится только отчаиваться».

## Венеция (Италия)

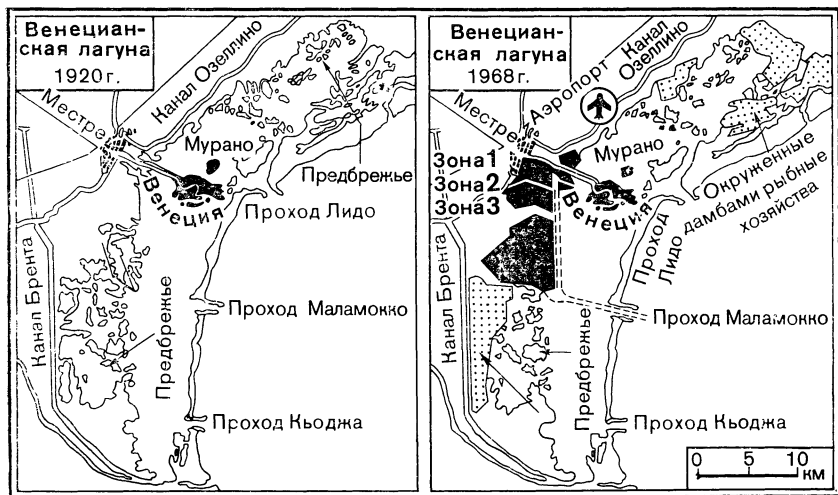
*Венеция, когда ряды твоих дворцов  
Сравняются с водой, раздастся вопль народов  
Над грудой стен твоих разрушенных и сводов  
И жалобы смутят покой морских валов!  
Когда я слезы здесь роняю огневые —  
Я, странник дальних гор, почти тебе чужой —  
То чем должны почитать тебя сыны родные?..*

Байрон <sup>1</sup>

Затопление Венеции водами Адриатического моря — это подлинная трагедия для человеческой культуры: безвозвратно

<sup>1</sup> «Ода Венеции». Перев. Н. Гербель (Дж. Байрон, Полн. собр. соч., т. I, 4-е изд., под ред. Д. Михайловского, СПб, 1894). — Прим. перев.





Фиг. 7.11. Венецианская лагуна в 1920 и 1968 гг.

Зоны 1, 2 и 3 — участки, покрытые насыпным грунтом и используемые для жилищного строительства («Venice in Peril», International Funds for Monuments).

гибнут шедевры искусства и архитектуры. 4 ноября 1966 г., когда река Арно громила обширные районы Флоренции (см. раздел 7.1), в Венеции вода поднялась до чрезвычайно большой высоты, на 1,9 м выше среднего уровня, не только причинив ущерб старым зданиям города, но и очень сильно повредив защитные морские стены. События этого дня еще раз напомнили широкой общественности, что знаменитый город дождей постоянно находится под угрозой катастрофического наводнения.

Как показано на фиг. 7.11, город построен в центре лагуны; в XVI и XVII веках, по решению Синьории, реки, втекавшие в лагуну, были отведены, чтобы предотвратить ее заполнение илом, чтобы проходы в Адриатическое море оставались открытыми и вода во время приливов могла промывать каналы.

В последние десятилетия затопление города случалось все чаще и чаще (фото 8.2). Это связано, очевидно, с несколькими причинами. Во-первых, происходит почти незаметный подъем самого уровня моря [т. е. погружение территории под действием тектонических сил. — *Перев.*] примерно на 1,5 мм в год. Во-вторых, дневная поверхность опускается в результате выкачивания подземных пресных вод в промышленной зоне побережья, скорость этого дополнительного опускания составляет 5—10 мм в год (этот вопрос рассмотрен в гл. 5). В-третьих, морские защитные стены пришли в запущенное состояние, и, в-четвертых, площадь лагуны и ее емкость уменьшились за счет того, что по-

явились огороженные дамбами рыбные хозяйства и участки, покрытые насыпным грунтом (фиг. 7.11).

Затопление при высокой воде первого и цокольного этажей в жилых домах и других зданиях стало в Венеции обычным делом. Многократное намокание колонн и стен и испарение соленой воды резко понижают прочность мрамора и каменных построек. В прекрасном дворце Ка д'Оро («Золотой дом»), возведенном между 1421 и 1440 гг., при высоких приливах вода заливает цокольный этаж. Подъезды многих зданий, например Палаццо Гримани<sup>1</sup> на Большом Канале, относящегося к XV в., в настоящее время сильно повреждены, и ими нельзя пользоваться.

Население города уменьшилось за последнее десятилетие на 60 тыс. человек, и брошенные дома ускоряют обветшание и разрушение древнего города. В 1966 г. итальянским правительством был, наконец, учрежден Комитет для защиты Венеции и была отпущена значительная сумма денег для борьбы с загрязнением и затоплением. В работу по сохранению города включились специалисты многих отраслей знания, в том числе по градостроительству, биологии и гигиене, геологии, геофизике, зоологии, метеорологии и гидрологии. Однако защита этого великого культурного наследия потребует больших усилий и средств.

**Прорыв дамбы на острове Андрус-Брэннан, Калифорния.** Ранним утром 21 июня 1972 г. произошел прорыв дамбы, защищавшей остров Андрус-Брэннан в дельте реки Сакраменто в Калифорнии. Дельта расположена у восточного края залива Сан-Франциско (фото 7.6). В районе гавани для малых судов образовалась брешь, которая очень быстро расширилась. Через семь часов ширина прорыва была около 90 м.

Множество находившихся в гавани лодок и разный мусор понеслись, подхваченные водой, через брешь и нагромодились во внутренней части острова. Поразительно, что это почти мгновенно образовавшееся наводнение не вызвало человеческих жертв.

Остров Андрус-Брэннан — один из нескольких сотен искусственных островков дельты, созданных в конце прошлого века с помощью drag, которые насыпали дамбы для защиты сельскохозяйственных земель от зимних паводков. Оседание и окисление торфяных грунтов привели к тому, что поверхность этих островов оказалась ниже уровня моря, так что теперь дамбы

---

<sup>1</sup> В оригинале — Палаццо Джустиниани. Очевидно, авторы допускают здесь неточность. Палаццо Джустиниани (XVII в.) находится на острове Мурано. В этом дворце размещен Музей стекла. Палаццо Гримани (начало XVI в.) — одно из крупнейших зданий на Большом Канале; до недавнего времени это здание занимал Апелляционный суд. — *Прим. перев.*

защищают их от затопления круглый год. Хотя острова все еще используются для сельского хозяйства, близость к заливу Сан-Франциско сделала их популярным местом отдыха. Протяженность водных путей составляет здесь 1100 км, имеются многочисленные гавани, а на самих островах появились передвижные домишки, трейлеры (автомобили с прицепами-фургонами) и небольшие поселки.

Наводнение было разрушительным для всего того, что находилось близко к бреши, но быстро поднимающаяся вода сразу же залила и все то, что было в низких внутренних частях острова, в том числе дома и трейлерные стоянки. Вскоре стало ясно, что городок Айлтон будет затоплен полностью. Айлтон был эвакуирован, и на борьбу с наводнением были брошены большие силы. Пытались защитить город временной дамбой, однако сделать это не удалось, и город оказался под водой. Было затоплено около 5 тыс. га земли, глубина воды была от 1 до 6 м.

Этот вид наводнения отличается от обычных речных паводков. Вода остается на месте до тех пор, пока не будут отремонтированы дамбы, установлены насосы и произведена откачка, т. е. несколько месяцев. Следовательно, большая часть оборудования, домов и сельскохозяйственных угодий утрачивается полностью. Сообщается, что в Айлтоне ущерб, согласно различным оценкам, превысил 40 млн. долл. Стоимость одного только ремонта прорванной дамбы составила почти 1,4 млн. долл.

Чрезвычайно важным побочным эффектом было ухудшение качества воды. Обычно здесь была пресная вода, поступающая из водохранилищ, расположенных выше дельты (фото 7.6). Эта вода текла по протокам дельты и накачивалась в распределительные каналы. Когда дамба острова Андрус-Брэннан разрушилась и вода устремилась на остров, ее место заняла соленая вода из залива Сан-Франциско. Для того чтобы вода снова стала пригодной для орошения, промышленности и питья, пришлось выпустить из водохранилищ, находящихся в верхних частях долины, огромную массу пресной воды, восстановив тем самым гидравлический барьер. Даже после того, как в течение 10 дней было выпущено для уменьшения солености более  $3,7 \cdot 10^8$  м<sup>3</sup> пресной воды, в дельте все еще оставалось очень много соленой воды, и удалить ее смогли только путем перекачивания в распределительные каналы, откуда она попала на орошаемые земли. Подсчитано, что в результате этого на сельскохозяйственных угодьях оказалось около 50 тыс. т соли, и, таким образом, ущерб был причинен не только затопленным землям, но и площадям, которые не были непосредственно затронуты наводнением.

Это бедствие в отличие от тех, которые связаны с яростью штормов, было полностью обусловлено деятельностью человека.

Дамбы, возводимые на торфяниках, конструктивно неустойчивы и могут разрушиться в любое время. Этот случай ясно показывает, какому риску подвергают люди свою жизнь и имущество, полагаясь на ненадежные инженерные сооружения.

**Разрушение плотины Болдуин-Хилс, Калифорния.** Хотя это и не частый вид катастрофического паводка, но все же иногда ущерб, причиняемый наводнением, является результатом прорыва какой-либо плотины. В субботу 14 декабря 1963 г. разрушилась регуляционная плотина, расположенная между двумя районами Лос-Анджелеса — Беверли-Хилс и Инглвуд. Хотя в водохранилище было только около 1,06 млн. м<sup>3</sup> воды, ущерб оказался тяжелым, так как ниже плотины находились плотно застроенные городские кварталы. Были уничтожены многие десятки домов, общий ущерб составил около 15 млн. долл.

Волна, хлынувшая через прорванную плотину, пронеслась через располагавшийся непосредственно у водохранилища жилой массив, срывая дома с фундаментов. У подножия холмов ширина потока резко увеличилась, и он разлился по плотно-населенной территории города.

На плотине Болдуин-Хилс регулярно выполнялись контрольные наблюдения, и та суббота, когда произошел прорыв, не была исключением. В 8 часов утра смотритель начал свой обычный обход. Примерно в 11 часов 15 минут, стоя над входным отверстием водослива, он услышал слабый, но необычный звук текущей воды и увидел, что по трубе водослива стекает вчетверо или впятеро больше воды, чем всегда, и что вода мутная. В следующие два-три часа к этому месту собрались инженеры и другие должностные лица. Они пытались ослабить поток мешками с песком, но утечка постепенно росла. В 13 часов 30 минут поперек гребня плотины прошла трещина, и за 15 минут ее ширина увеличилась с 6 до 75 мм. Просачивание через низовую грань плотины впервые было замечено примерно в 14 часов. К 15 часам 15 минутам брешь, теперь уже хорошо видимая на напорной грани плотины, имела ширину 3 м. Она продолжала расти, через нее уходило очень много воды. Внезапно у нижнего края этой бреши произошло бурное извержение мутной воды, и верхние части откоса и насыпи плотины рухнули. К 15 часам 38 минутам плотина разрушилась полностью. К 18 часам 50 минутам паводок уже понизился до того уровня, когда можно было ввести в действие аварийную технику и начать ликвидацию последствий.

После того как в 11 часов 15 минут была обнаружена чрезмерная утечка через дренажную систему плотины, начался управляемый выпуск воды из водохранилища и был отдан приказ об эвакуации. Наряды полиции спешили от дома к дому,

предупреждая жителей; по радио и телевидению была объявлена тревога. Хотя все это началось примерно в полдень, пять человек погибло.

Большая часть воды, потребляемой Лос-Анджелесом, поступает в город издалека по акведукам. Следовательно, в черте города необходимо иметь большие резервуары, как для водоснабжения в периоды максимального расхода воды, так и на случай аварии водопровода. Из-за того что город раскинулся на очень большой площади, для водоснабжения отдельных районов требуются длинные магистрали и расположенные в стратегически важных местах водохранилища, такие, как у плотины Болдуин-Хилс.

Что привело к разрушению плотины? Мнения по этому поводу разделились, но расследование, которое провела назначенная мэром комиссия, показало, что вскоре после первого наполнения водохранилища его водонепроницаемая оболочка треснула вдоль линии геологического разлома. Позднее было установлено, что это произошло скорее в результате неоднородного уплотнения грунта по разные стороны разлома (см. гл. 5), чем из-за тектонических движений по разлому. В течение всего времени существования водохранилища вода непрерывно просачивалась в зону разлома, размывая грунт и образуя трубки и полости под водохранилищем и плотиной. Этот процесс привел к тому, что незадолго до окончательного разрушения произошла резкая просадка дна водохранилища вдоль линии разлома, что позволило находившейся под напором воде (водохранилище было наполнено до высшего уровня) попасть в годами создававшуюся проницаемую зону. Резко ускорившийся размыв быстро вызвал окончательное разрушение.

## Список литературы

- 1 *Alley R.*, Man Against Flood, Peking, New World Press, 1956.
- 2 American Society of Civil Engineers, Hydrology Handbook, 1949.
- 3 *Burton J., Kates R. W., Smead R. E.*, The Human Ecology of Coastal Flood Hazard in Megalopolis, Chicago, University of Chicago, Department of Geography, Research Paper No. 115, 1969.
- 4 *Freeberne M.*, Natural Calamities in China 1949—61, An Examination of the Reports Originating from the Mainland, Pacific Viewpoint 3, 33—72, 1962.
- 5 *Horn W. L.*, Snow Pack and Water Supply, Journal of American Water Works Association 60, Dec., 1968
- 6 *Hoyt G., Langbein W. B.*, Floods, Princeton University Press, 1955.
- 7 *Judge J.*, Florence Rises from the Flood, National Geographic, Washington, July 1967.
- 8 *Kates R. W.*, Hazard and Choice Perception in Flood Plain Management, Chicago, University of Chicago, Department of Geography, Research Paper No. 78, 1962.
- 9 *Lambrick H. T.*, The Indus Flood Plain and the «Indus» Civilisation, Geographical Journal, 133, 483—494, 1967.

10. *Leopold L. B.*, Water, San Francisco, W. H. Freeman, 1974.
11. *Leopold L. B., Maddock T.*, The Flood Control Controversy, New York, Ronald Press Co., 1954.
12. *Linsley R. K., Franzini J. B.*, Elements of Hydraulic Engineering, New York, McGraw-Hill, 1955.
13. *Mensching H., Gressner K., Stuckman G.*, Die Hochwasserkatastrophe in Tunesien im Herbst 1969, Beobachtungen über die Auswirkungen un der Natur und Kulturlandschaft (The Flood Catastrophe in Tunisia, Autumn 1969, Observations of the Effects upon the Natural and Cultural Landscape), Geographische Zeitschrift, 58, 81—94, 1970
14. *Munk J., Munk W.*, Venice Hologram, Proc. American Phil. Soc., 116, 415—422, 1972.
15. Netherlands Booksellers and Publishers Association, The Battle of the Floods, Amsterdam, Netherlands Flood Relief Fund, 1953.
16. *Oya M.*, Land Use Control and Settlement Plans in the Flooded Area of the City of Nagoya and its Vicinity, Japan, Geoforum No. 4, 27—36, 1970.
17. *Sansome G. C.*, Venice in Peril, New York, International Fund for Monuments, 1970
18. State of California, Department of Water Resources Bulletin 69, California High Water, annual series, 1969.
19. *Todd O. J.*, Taming «Flood Dragons» along China's Wang Ho. National Geographic, 81, Washington, Feb 1942.
20. UNESCO, Floods and Their Computations, Proceedings Leningrad Symposium, 2 volumes, IASH — UNESCO — WMO, 1967.
21. United States, 86th Congress, 1st Session, Committee on Public Works, A Programm for Reducing the National Flood Damage Potential, August 1959.
22. United States Departments of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Disaster Survey Reports, periodic reports.
23. United States Department of the Army, Corps of Engineers, Water Spectrum (monthly publication).
24. United States Geological Survey, Floods of (year), annual series.
25. United States Geological Survey, Notable floods are published as water supply papers — Maps of certain localities showing areas inundated in past floods are published as Hydrologic Investigation Atlas.
26. *White G. F.*, Human Adjustment to Floods, Chicago, University of Chicago, Department of Geography, Research Paper No 29, 1945.
27. *White G. F.*, Strategies of American Water Management, Ann Arbor, University of Michigan Press, 1969
28. *Young M. W.*, Fighting with Flood, Leadership, Values and Social Control in a Massim Society, Cambridge, Cambridge University Press, 1971.

# ГЛАВА 8

## УМЕНЬШЕНИЕ УЩЕРБА ОТ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

### 8.1. Районирование по общей величине риска

**Общий геологический риск.** В семи предыдущих главах рассмотрены те геологические явления, которые могут вызвать тяжелейшие стихийные бедствия. Рост населения мира, особенно сосредоточение людей и объектов их деятельности в городах, повысил угрозу поражения природными катастрофами до такой степени, что для уменьшения опасности многим странам приходится в плановом порядке выполнять крупные и часто дорогостоящие защитные мероприятия.

Полная оценка того, какие меры необходимы, во многих отношениях сложна. Действительно, источник крупной геологической опасности может быть одновременно источником благосостояния для местных жителей. Горная цепь, дающая людям воду для питья и орошения, а также и для отдыха, может вызвать губительные наводнения; вокруг все еще смертельно опасного вулкана могут лежать тучные плодородные почвы, возникшие из вулканического материала; с гигантскими активными разломами и рифтами (представляющими геологическую опасность) часто связаны минеральные и природные ресурсы, благоприятный климат и величественные ландшафты. Вулканические геотермальные области дают природный горячий пар для производства энергии (Новая Зеландия, Калифорния, Италия).

В этой последней главе мы сосредоточили внимание на геологической опасности в целом и сравниваем между собой

эффекты землетрясений, вулканических извержений, оползней, наводнений и других явлений, связанных с геологическими процессами. Для такого обобщения необходимо прежде всего сформулировать основные требования к оценке риска. При этом на первое место выступает наличие или недостаток основных геологических и демографических данных. Прогнозируя будущие катастрофы на основе анализа событий прошлого, исследователь вынужден, как правило, опираться не только на неполную и неоднородную статистику, но и приводить имеющиеся данные к виду, который позволил бы в какой-то мере сравнивать различные типы геологической опасности количественно. Исходным материалом для такого анализа обычно бывают детальные геологические и топографические карты соответствующих масштабов. После этого следует подробно изучить все виды геологической опасности в отдельности (фиг. 8.1).

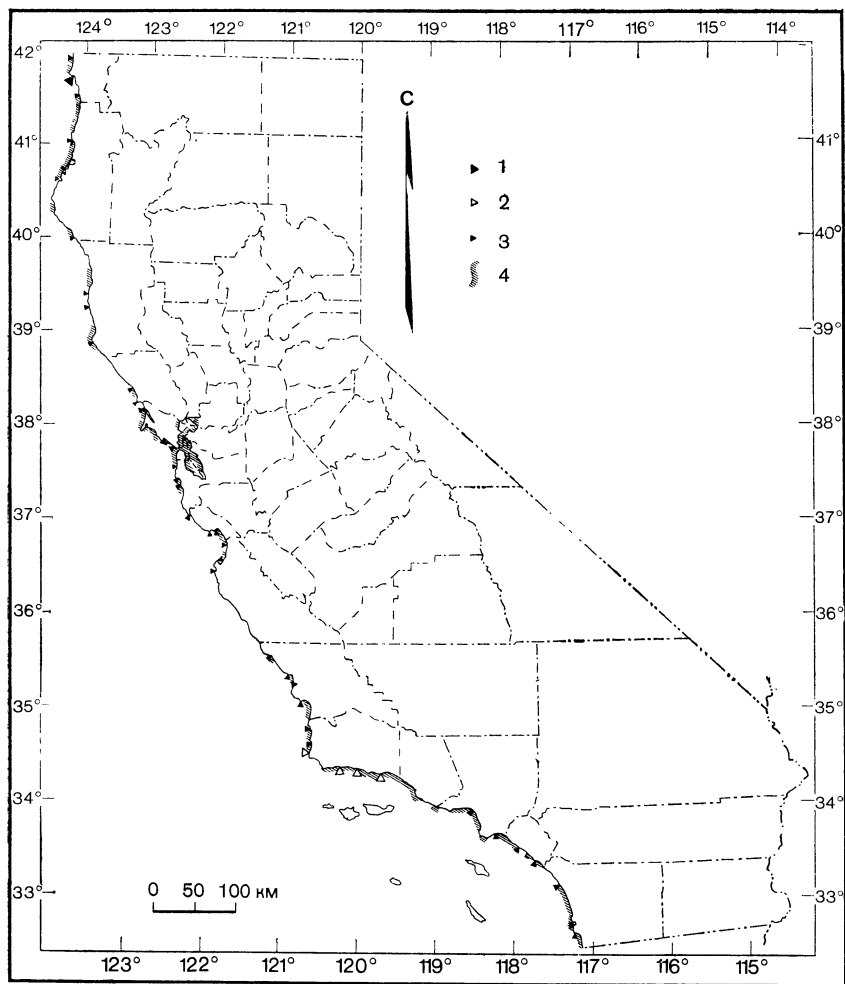
При разработке способов уменьшения ущерба от стихийных бедствий используют разнообразные приемы. В этой главе мы пытаемся: 1) показать необходимость взаимодействия между людьми тех профессий, которые связаны с развитием городов, — проектировщиками, архитекторами, строителями, специалистами по страхованию, представителями местных властей и руководителями общественных работ; 2) предложить способы лучшего представления имеющихся геологических данных для изучения окружающей среды, с тем чтобы они были понятны, систематичны и позволяли бы оценить степень их достоверности.

К сожалению, в университетские программы по геологии, геофизике, строительству и т. д. обычно не включаются ключевые аспекты изучения всех этих проблем, хотя на отдельных географических факультетах в последние годы предпринимались некоторые попытки такого рода. Все чаще встречаются материалы комплексных научных исследований окружающей среды, но чтобы эти исследования не были поверхностными, им необходимо солидное обоснование в каждой из используемых дисциплин.

Для того чтобы перейти к материалам одного из исследований, проведенных в Калифорнии, перечислим главные виды геологической опасности: сейсмические колебания, наводнения, извержения вулканов, цунами, смещения по разломам, оползни, оседание грунта, эрозия и вспучивание почвы (фиг. 8.4). Все это рассмотрено в предыдущих главах. Можно добавить еще две проблемы, которые полностью зависят от деятельности человека, — истощение минеральных ресурсов и понижение уровня грунтовых вод. Хотя эти две последние опасности не угрожают жизни или имуществу людей, они имеют большое значение для благосостояния общества.

Изучение всех этих опасностей в большинстве стран сразу же наталкивается на труднопреодолимую преграду. Для многих





Фиг. 8.1. Участки побережья Калифорнии, где, согласно проведенной оценке, имеется значительная опасность цунами.

(Исследование по геологии городов Калифорнии, 1972.) Во всех указанных на карте местах возможность появления цунами (особенно сильных, меняющих направление течений) угрожает судам, стоящим в гаванях, и портовым сооружениям. Вдоль всего побережья потенциальный ущерб сильно увеличивается, когда цунами совпадает с высоким приливом или со штормовыми волнами (или с тем и с другим). Всем пляжам угрожают также возникающие время от времени непредсказуемые высокие волны, не связанные с цунами. 1—большой потенциальный ущерб от повышения уровня воды, большая вероятность; 2—большой потенциальный ущерб от повышения уровня воды, малая вероятность; 3—умеренный потенциальный ущерб от повышения уровня воды и сильного течения, большая вероятность; 4—ожидаемый ущерб невелик, но имеется потенциальная опасность цунами.

из перечисленных одиннадцати проблем данные о человеческих жертвах и материальном ущербе за значительный промежуток времени неполны. Исключения обычно составляют наводнения, землетрясения и цунами. Тем не менее некоторых успехов можно достичь путем экстраполяции величин, полученных по другим районам, и путем сравнения результатов этих событий. Еще одна трудная проблема — как оценить в деньгах стоимость человеческой жизни; для долгосрочного проектирования иногда необходимо дать для этого какое-то численное значение в долларах. При недавних исследованиях, проведенных для Калифорнии, проверялась возможность использования сумм 75 000 и 360 000 долл. в качестве денежного эквивалента жизни одного человека. Первая цифра соответствует максимальной страховой сумме, выплачиваемой авиакомпаниями за смерть пассажира при международных рейсах. Международное признание этой величины закреплено в Варшавской конвенции. Второе, более высокое число получено путем экстраполяции из подборки судебных решений в Калифорнии по искам о компенсации за смерть и увечья, а также о возмещении больничных расходов, связанных с увечьями. Отражая часто преувеличенный и специфический характер таких решений суда, вторая величина в большинстве случаев, вероятно, сильно завышена.

В целом сумму необходимых затрат лучше всего определять, анализируя отношение достигнутого положительного результата к этой сумме. Это величина безразмерная, и через нее можно показать, допустим, соотношение числа жизней, которые удастся спасти, и общего количества людей, подвергающихся опасности.

В табл. 8.1 в качестве примера приведены прогнозные данные ущерба от стихийных бедствий, вызванных геологическими процессами, и от истощения минеральных ресурсов. Прогноз сделан для Калифорнии на срок 30 лет, исходя из нынешней практики. Общая величина ожидаемого ущерба — 55 млрд. долл. — почти равна предполагаемым убыткам от городских и лесных пожаров за тот же период.

**Применение теории вероятности и статистики.** С самого начала следует определить, что означает понятие «геологический риск». Ясно, что извержение вулкана или наводнение на необитаемом острове обычно не составляет никакой опасности для человека и объектов его деятельности. О риске можно говорить только тогда, когда геологические данные рассматриваются в сочетании с конкретными экономическими и социальными условиями. Обычно используются два типа шкалы риска.

Первая, так называемая шкала *относительного риска* позволяет лишь сравнить одну обстановку с другой и не учитывает

Таблица 8.1

Прогнозные значения материальных потерь, связанных со стихийными бедствиями, ожидаемыми в 1970—2000 гг. (без улучшения существующей практики защитных мероприятий)

Геологическая проблема	Потери до 2000 г. (в млн долл.)
1. Сейсмические сотрясения	21 000
2. Цунами	40
3. Смещения по разломам	76
4. Вулканические извержения	49
5. Наводнения	6 500
6. Оползни	9 850
7. Опускание поверхности грунта	26
8. Вспучивание грунта	150
9. Размыв	565
10. Истощение минеральных ресурсов, необходимых для развития городов	17 000
11. Истощение запасов и понижение уровня грунтовых вод	50
Всего	55 306

*Примечание.* В качестве денежного эквивалента стоимости одной человеческой жизни принята сумма 360 тыс. долл. Из книги: «Urban Geology—Master Plan for California», 1973.

в явном виде вероятность, или частоту, появления таких обстановок. Эта шкала состоит обычно из условных цифровых или буквенных обозначений. Примером может служить карта сейсмической опасности для территории США, показанная на фиг. 1.5. В зоне, обозначенной цифрой 0, опасности, связанной с землетрясениями, нет, тогда как в зоне 3 опасность максимальная. В более ограниченной области для планирования землепользования и строительства вдоль зон активных разломов можно установить две или три градации риска. Необходимо запретить жилищное строительство в полосе самого разлома. Другой пример использования шкалы относительного риска — карта опасности цунами для Калифорнии, представленная на фиг. 8.1.

Более определенной является шкала *вероятностного риска*, основанная на тех же статических принципах, что и методы страхования. В этом случае опасность ущерба или несчастных случаев в результате какого-либо геологического события определяется через вероятность, или частоту, таких событий за определенный интервал времени (расчетный период). Этот вероятностный риск был учтен, например, при построении карт сейсмической опасности для Канады (см. фиг. 1.11), где изолиниями

показаны величины ускорений сейсмических колебаний, которые могут возникнуть в течение года с вероятностью 0,01. Другой такой пример (для цунами) рассмотрен в разделе 3.2.

Такая оценка статистического риска почти не учитывает геологическую обстановку главным образом из-за отсутствия статистических данных. Часто считают, что это слишком сложно для понимания широкой публики, но объективность такого анализа заслуживает того, чтобы к нему было привлечено больше внимания. Статистическая подготовка сейчас просто необходима для серьезного исследователя геологической опасности.

Районирование, выполняемое с целью уменьшения ущерба от стихийных бедствий, также проводится двумя основными способами. Один из них — считать риск в данной области функцией суммарной величины ущерба от землетрясений, наводнений и т. д. независимо от частоты повторения таких событий. Эта статическая функция не учитывает фактора времени. Так, на карте сейсмической опасности для США (см. фиг.1.5) район Чарлстона в Южной Каролине отнесен к категории 3 — той же, что и большая часть Калифорнии. Эта оценка основана на большой величине площади, захваченной единственным землетрясением 31 августа 1886 г. Однако по имеющимся данным вероятность того, что за время существования недавно построенных сооружений здесь произойдет другое сильное землетрясение, относительно мала. Вплоть до настоящего времени не получено никаких четких данных о геологическом строении этого района, которые указывали бы на его повышенную сейсмическую опасность. Для решения такого рода проблем, касающихся очень больших площадей, в дальнейшем можно будет использовать фотоснимки из космоса, на которых удастся, вероятно, найти линейные структуры, требующие наземного обследования.

Другой метод оценки состоит в учете частоты проявления геологических стихий. Этот метод позволяет придать редким, но катастрофическим событиям соответствующий вес по отношению к явлениям, которые происходят гораздо чаще, но причиняют меньший ущерб. Для этого надо построить графики повторяемости, в которых используются данные о частоте и размерах стихийных бедствий, допустим, за 100 лет на единицу площади. Затем полученное распределение вероятностных параметров можно показать на карте (фиг. 1.5, внизу).

Разумеется, иногда исторических данных хватает только для того, чтобы построить лишь самые грубые графики повторяемости. В последнее время статический (без учета вероятностного фактора) метод районирования подвергся острой критике со стороны некоторых специалистов в Советском Союзе. Было отмечено, что такой метод слишком консервативен, и огромные

экономические ресурсы отвлекаются от, возможно, более срочных нужд общества на парирование воображаемой опасности, вывод о которой сделан на основании событий далекого прошлого.

## 8.2. Безопасность населения

**Планирование землепользования.** Во многих странах, во всяком случае в западных, имеются организации (общенациональные, местные, правительственные и даже частные), ответственные за планирование работ по защите от стихийных бедствий. Границы компетенции этих организаций очерчены не очень четко. Один из важнейших шагов при поисках средств воздействия на опасные природные явления — исследовать возможности той или иной организации и, проведя критическое обобщение таких сведений, установить систему взаимной осведомленности и сотрудничества с целью исключения риска. Представители местных властей не имеют, как правило, необходимой геологической подготовки, и сумма выделяемых средств находится в сильной зависимости от противоречивых финансовых и эстетических соображений.

Первые вопросы, возникающие при изучении района, сводятся к следующему: 1) *какие* геологические процессы вызовут там наибольшие потери, 2) *на каких участках* района эти процессы будут иметь наиболее тяжелые последствия, 3) *как* будет изменяться с годами острота этой проблемы. Только тогда, когда ответы на эти вопросы получены, можно практически подойти к выработке мер по борьбе с наводнениями, к сейсмическому районированию и рациональному использованию земли. Материалы исследований, посвященных вопросам районирования, и карты соответствующего масштаба, полезные для планирования землепользования, появляются сейчас, например, в США, СССР, на Балканах и в Японии.

**Учет фактора сейсмической безопасности в Калифорнии.** Законы, действующие в отдельных штатах США, требуют составления общего плана развития всех городов и графств, входящих в состав штата. В Калифорнии начиная с 1971 г. частью такого генерального плана стал, по постановлению правительства штата, учет определенных факторов безопасности по отношению к геологическим явлениям. Упомянутое постановление затрагивает и такие вопросы, как землепользование, жилищное строительство, сохранение открытых пространств, уровень шума и картирование геологической опасности. Фактор сейсмической безопасности определяется следующим образом:

«Учет фактора сейсмической безопасности состоит в обнаружении угрозы землетрясений и в оценке интенсивности таких их опасных воздействий, как смещение поверхности по тектоническим разрывам, сильные колебания грунта, обрушение грунта и возникновение сейсмогенных водяных волн — цунами и сейшей».

Суть этого закона заключается в том, чтобы обязать местные власти учитывать опасность землетрясений при планировании развития городов и графств в целом. На практике размер усилий, затраченных на разработку и внедрение методов учета геологической опасности, зависит от той степени риска, которую данная община считает допустимой. При выборе дома люди часто готовы пойти на менее оправданный риск, чем в поисках подходящего участка для больницы или школы. Хотя на принимаемые гражданами решения влияют и их образование и опыт, эти решения могут резко измениться после какого-либо бедствия и оказаться в сильной зависимости от проводящейся в данный момент политической кампании. Замечено, что каждое разрушительное землетрясение в Калифорнии дает новый толчок развитию законодательных мер, касающихся сейсмической безопасности; например, закон Филда был принят сразу же после землетрясения в Лонг-Биче в 1933 г. То же самое можно сказать по поводу других стихийных бедствий, связанных с геологическими причинами.

### 8.3. Карты геологического риска

**Структурно-геологические карты.** Первым шагом в изучении опасности, обусловленной совокупностью различных геологических процессов, является нанесение соответствующих данных на карты одного и того же масштаба. Например, геологическая карта показывает площадное распространение горных пород различного строения и типа. Чтобы оптимально использовать имеющиеся данные для той или иной определенной цели, можно выбрать подходящий масштаб и выделить нужные детали.

В Калифорнии в 1972 г. была выпущена новая геологическая карта масштаба 1 : 750 000; геологическое строение штата показано на ней с той детальностью, которая достаточна для составления предварительных планов землепользования. Опубликованная в цвете, карта наглядно отражает размещение молодых вулканических пород и самих вулканов, положение сейсмически активных разрывов и крупных складок в слоях горных пород.

Для оценки геологической опасности на конкретных участках требуются карты, гораздо более подробные, чем это возможно при обычных масштабах от 1 : 250 000 до 1 : 1 000 000. Для планирования землепользования и строительства в пределах

городов необходимо проводить специализированные съемки значительной детальности, включая изучение местных глубинных структур с помощью геофизических методов и бурения. Масштаб таких съемок должен быть порядка 1 : 20 000. Примером могут служить карты склонов, изданные недавно Геологической службой США в масштабе 1 : 24 000. Эти карты показывают отдельные участки склонов гор и холмов в цвете и позволяют оценить условия размыва и устойчивости склонов. Подобно этому, карты опасности наводнений, составленные Геологической службой и инженерными войсками армии США примерно в том же масштабе, показывают, до каких высотных отметок доходили крупнейшие наводнения прошлого, а также каков их уровень, характерный для районов, часто подвергающихся наводнениям.

Обычные геологические карты, изданные в большинстве стран, имеют ряд недостатков. Во-первых, эти карты часто показывают принадлежность горных пород к той или иной генетической группе (изверженные, осадочные и т. д.), а не конкретный тип и свойства пород. Аллювиальные отложения, состоящие из мелко- и грубозернистого материала, могут иметь фациальные переходы как по глубине, так и в горизонтальном направлении, а это влечет за собой важные особенности их реакции на сейсмические воздействия. К тому же недостаточно сказать, что данная свита состоит в основном из песчаников и сланцев, не указав положение поверхностей напластования. Геологическая служба австралийского штата Новый Южный Уэльс пыталась решить эту проблему, изображая поверхностные и подстилающие комплексы горных пород специальными условными знаками. Цветом были показаны подстилающие породы, а штриховкой и крапом — тип пород поверхностного чехла. Бюро почв Департамента научных и промышленных исследований Новой Зеландии выпустило карту типов почв, которая как бы дополняет стандартные геологические карты. В штатах Новой Англии, США, на одной серии карт показаны коренные породы, а на другой — поверхностные ледниковые отложения.

Другим недостатком геологических карт является отсутствие подробных данных о *выветрелости* горных пород. Глубина выветривания может сильно влиять на реакцию грунта на интенсивные сейсмические колебания. На основных геологических картах следовало бы показывать, где расположены хорошие обнажения коренных пород, чтобы при детальном исследовании их можно было легко найти снова. Аллювиальные отложения часто необходимо расчленять более подробно в соответствии с используемым масштабом карт (например, в масштабе 1 : 250 000), показывая пойменные и озерные фации, коллювий, элювиальные образования и т. д. При этом на карте можно было бы выделить участки, сложенные особыми поверхностными

образованиями: тонкозернистым материалом с зонами и линзами более грубозернистых русловых отложений.

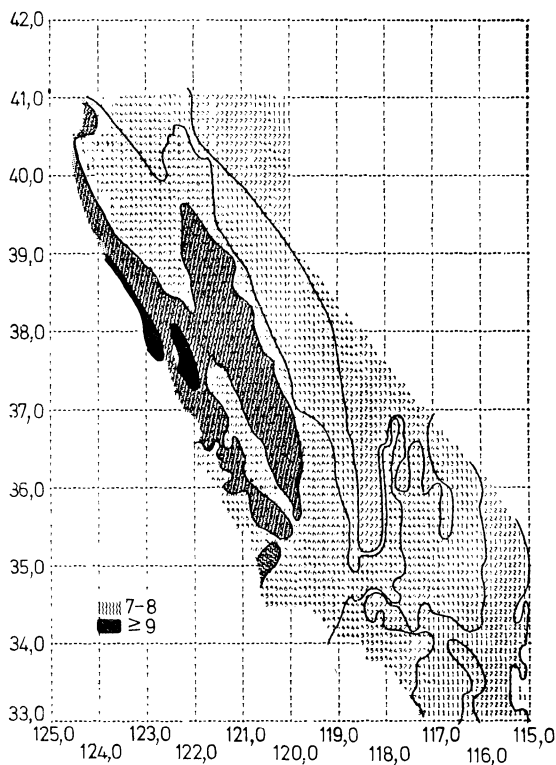
Продолжаются острые споры вокруг того, должны ли геологические карты подчеркивать те выводы, которые делаются в результате интерпретации, или они должны ограничиваться фиксацией непосредственных полевых наблюдений геологов. Интерпретационные геологические карты обязательно отражают субъективные взгляды составителя, которые могут иметь критическое значение для планирования и строительства. Иллюстрацией этого служат карты, на которых разрывы делятся на активные и неактивные.

В последнее время в Калифорнии пробуют выделять три группы разрывов на основе давности движений по ним. В первую группу относят разрывы, подвижки по которым отмечены в историческое время (около 200 лет назад); во вторую группу — те разрывы, которые смещают четвертичные отложения, но не проявлялись в историческое время; разрывы третьей группы, для которых не найдено свидетельств подвижности в четвертичное время, считаются неактивными. Сразу же возникает сомнение, действительно ли отмерли разрывы, отнесенные к третьей группе, и не будут ли разрывы первых двух категорий оставаться «тихими» на протяжении тысячелетий. К какой группе надо относить разрывы, вдоль которых нет видимых четвертичных смещений, но имеются очаги слабых землетрясений?

**Моделирование на ЭВМ.** В последнее время получил развитие своеобразный способ расчета и построения прогнозных карт геологической опасности, основанный на использовании электронно-вычислительных машин. В случае если параметры, определяющие тот или иной вид опасности, уже установлены, их можно связать в виде математической формулы и запрограммировать раз и навсегда. Такая программа образует каркас для оценки рассматриваемого вида опасности (колебаний грунта, цунами, наводнений и т. д.) путем подстановки соответствующих значений соответствующих параметров.

От этой программы мало пользы, если она не может *воспроизвести* (т. е. как бы предсказать) катастрофы исторического прошлого; на практике данные о прошлых событиях используются для проверки того, правильно ли выбраны и учтены введенные в программу параметры. Значения числовых коэффициентов и показателей степеней определяются методом подбора, с тем чтобы программа давала решения, точно соответствующие историческим событиям. Только когда это соответствие достигнуто, имеет смысл использовать такую отлаженную программу для составления карт прогноза ожидаемых в будущем стихийных бедствий. Получаемые карты можно затем с известной

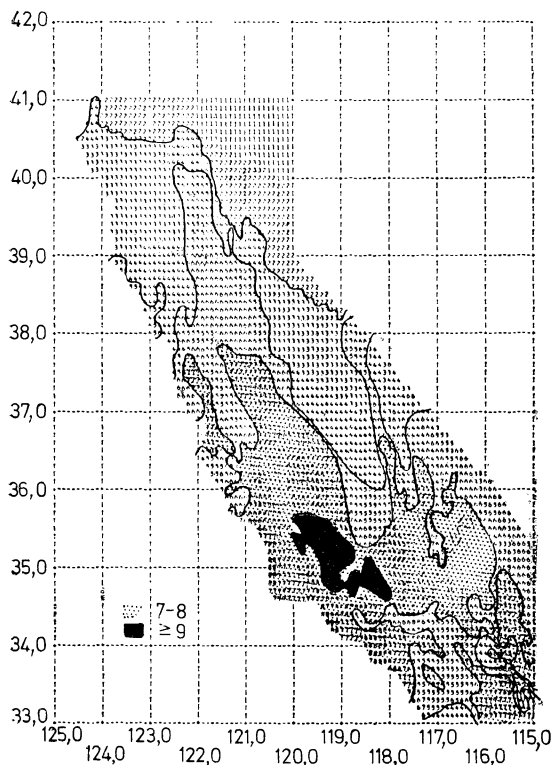




Фиг. 8.2. Карта изосейст землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско, полученная в результате моделирования на ЭВМ.  
Цифры, напечатанные ЭВМ, показывают интенсивность сотрясений по шкале ММ. Сравните с картой изосейст (фиг. 1.3), построенной по материалам полевого обследования. (Из кн : D. G. Friedman, *Geologic Hazards and Public Problems*, 1969.)

осторожностью использовать при исследовательских работах по уменьшению ущерба, связанного со стихийными бедствиями.

Непосредственным примером служит проводимый таким путем расчет интенсивности ожидаемых землетрясений. На фиг. 8.2 показана рассчитанная и построенная с помощью ЭВМ карта изосейст землетрясения 1906 года; она представляет собой результат математического моделирования колебаний грунта на основе сейсмологических данных, изложенных в гл. 1. Модель (программа) была построена главным образом на базе эмпирических зависимостей, обнаруженных между интенсивностью землетрясения (разделы 1.2 и 1.4) и его магнитудой, длиной ожившего разрыва, затуханием сотрясений с расстоянием, глубиной очага, продолжительностью сильных колебаний, а также



Фиг. 8.3. Карта изосейст землетрясения Форт-Техон 1857 г. в Южной Калифорнии, полученная в результате моделирования на ЭВМ. Напечатанные ЭВМ цифры обозначают интенсивность сотрясений по шкале ММ. Полученная карта представляет собой в определенной мере прогноз интенсивности колебаний при повторении такого землетрясения. (Из кн.: D. G. Friedman, *Geologic Hazards and Public Problems*, 1969.)

между местными особенностями грунтов и геологическими условиями.

Как показывает фиг. 8.2, с помощью метода подбора удалось добиться довольно близкого совпадения вычисленных значений с наблюдаемой интенсивностью землетрясения 1906 г. (фиг. 1.3). Эта эталонная модель была использована для расчета возможного распределения изосейст землетрясения Форт-Техон в 1857 г. (фиг. 8.3). Действительное распределение интенсивности этого землетрясения неизвестно.

Многое в таких методах моделирования все еще остается неясным; немаловажно и то, что сама шкала интенсивности имеет субъективный характер и трудноприменима к некоторым типам построек. Кроме того, некоторые эксперименты по

моделированию дали весьма близкое совпадение с интенсивностью прошлых землетрясений, хотя интенсивность в расчетах связывалась с максимальным ускорением, которое в свою очередь считалось тесно связанным с магнитудой. В разделе 1.5 показано, почему эти связи в общем случае сомнительны и почему надо учитывать такие параметры, как продолжительность колебаний. Если все будет так, как сейчас представляется, то, очевидно, с каждым годом модели, рассчитанные с помощью ЭВМ, будут играть все большую роль в оценке риска. При этом целью работ является не только предсказание события, но и выделение вклада каждого геологического фактора, например роли водонасыщенности материала при образовании лавин и усилении сейсмических колебаний.

#### 8.4. Рост населения и определение главной опасности

**Преимущество немедленных мер.** Степень геологической опасности сильно зависит от плотности населения; когда в 1902 г. подвергся уничтожению город Сен-Пьер на острове Мартиника, все его 30-тысячное население было сосредоточено на очень небольшой площади (фото 8.1). При выделении главной опасности, которую необходимо предсказывать и против которой надо бороться, плотность населения представляет важный фактор, но еще важнее получение надежных оценок скорости роста населения.

Для определения степени геологической опасности полезно ввести понятие среднего городского района. Такой район занимает определенную площадь годной к использованию земли и имеет среднее для провинции соотношение жилых и промышленных зданий. В демографических исследованиях населенность площади измеряется количеством человеко-лет (*ЧЛ*), определяемым как среднегодовое количество жителей района за десятилетие.

В промышленно развитых странах активный экономический рост городского района во многих случаях отражается главным образом на увеличении или убыли населения. Поскольку меры, предпринимаемые ныне для обуздания геологических катастроф, важнее по отношению к следующим десятилетиям, чем *будущие* меры воздействия, в расчет вводится поправочный коэффициент, учитывающий преимущество немедленных мер. Такие весовые коэффициенты всегда берутся несколько произвольно, но в данном случае вес можно выразить через так называемый *коэффициент преимущества немедленных мер (ПН)*. Можно было бы считать, что полностью развитые городские районы имеют нулевой коэффициент *ПН*, так как там уже поздно запрещать строи-

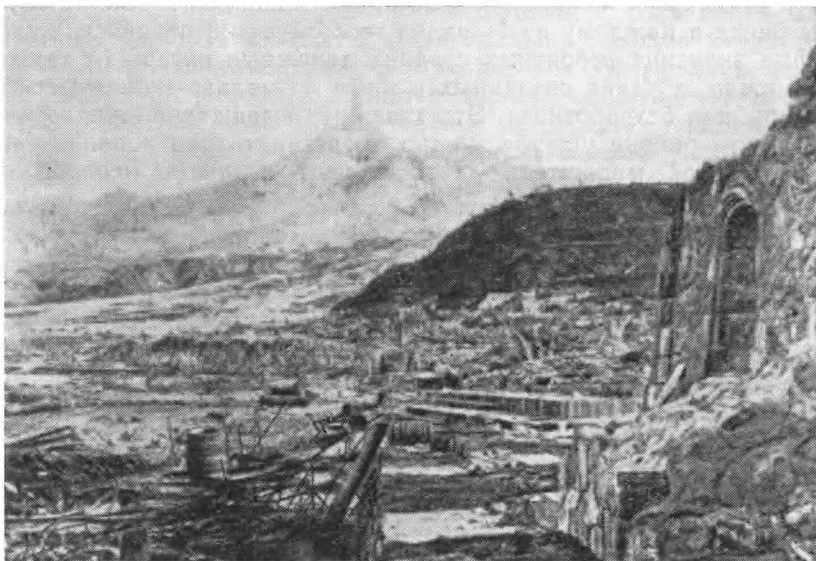
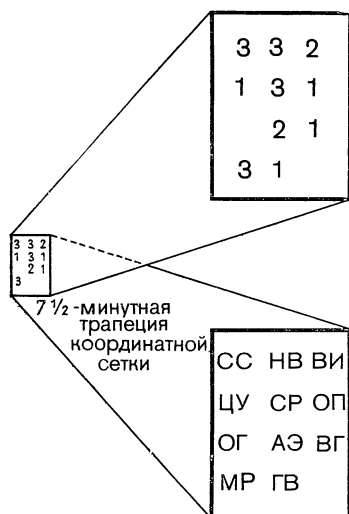


Фото 8.1. Развалины города Сен-Пьер на острове Мартиника, май 1903 г. Город был уничтожен палящей лавиной 8 мая 1902 г. На заднем плане виден вулкан Мон-Пеле с куполом и громадной иглой у вершины. Фото А. Лакруа.

тельство в опасных местах или стремиться уменьшить риск с помощью строительного кодекса. В действительности же величина  $ПН$  никогда не бывает равна нулю, так как старые здания постоянно заменяются новыми, и обычно в этих случаях можно выбрать вариант застройки, при котором угроза потерь уменьшается. Поэтому чаще всего считают, что минимальное значение коэффициента  $ПН$  равно единице. Более высокие значения рассчитываются из соотношения между ожидаемым ростом вложений и нынешней стоимостью.

Каждый городской район можно затем рассматривать с точки зрения различных геологических опасностей (фиг. 8.4): от сейсмических сотрясений ( $СС$ ) до понижения уровня грунтовых вод ( $ГВ$ ). Каждый вид геологической опасности надо оценить количественно через степень риска для данного района. (Конечно, воздействие каждого стихийного бедствия будет различно в разных частях района, и здесь потребуются какое-то усреднение.) Шкала степени риска обычно бывает относительной (со значениями, скажем, от нуля до 3), но можно использовать и вероятностную шкалу. На фиг. 8.4 показаны оценки риска на какой-то ограниченной площадке, закодированные для использования в числовой модели, которая рассчитывается на ЭВМ. На

этой стадии при желании можно придать каждой градации шкалы риска и каждому из 11 видов геологической опасности некоторые значения вероятных средних денежных потерь (а также, возможно, и таких связанных с ними социально-экономических потерь, как безработица). Это денежное выражение ожидаемого в данном районе ущерба можно представить как дополнительный весовой множитель — *коэффициент величины ущерба от геологической катастрофы (УГ)*.



Фиг. 8.4. Кодирование геологической опасности.

Положение каждой цифры отвечает определенному виду геологической опасности, а сама цифра показывает степень риска: 3 — большой риск или весьма вероятный риск; 2 — умеренный риск; 1 — малый риск; незаполненное пространство означает, что риска нет или что он не оценен. Буквенные обозначения: *СС* — сейсмические сотрясения; *НВ* — наводнения; *ВИ* — вулканические извержения; *ЦУ* — цунами; *СР* — смещения по разрывам; *ОП* — оползни; *ОГ* — оседание грунта; *АЭ* — активная эрозия; *ВГ* — вспучивание грунта; *МР* — истощение минеральных ресурсов; *ГВ* — понижение уровня грунтовых вод. Наводнения и истощение минеральных ресурсов считаются «весьма вероятными» опасностями; хотя степень риска для них установить нельзя, но сама проблема существует.

**Выделение главной опасности.** Теперь можно проводить сравнение городских районов. Приоритет должен быть отдан работам, необходимым для уменьшения ущерба при геологических катастрофах в масштабах целой страны или провинции; назовем его *приоритетом главной опасности (ГО)*. Используя уже введенные обозначения, можем представить это понятие в виде произведения:

$$ГО = УГ \cdot ПН \cdot ЧЛ.$$

Как видно из этой формулы, хотя в районе могут быть острые геологические проблемы, величина срочных капиталовложений может быть небольшой, если площадь уже полностью застроена или если плотность населения низкая.

## 8.5. Исследование геологии городов Калифорнии

**Директивный план.** В 1970—1973 гг. Департамент охраны природы штата Калифорния проводил изучение того, какие меры должны быть приняты штатом для безопасного развития,

учитывая геологический риск и необходимость сохранения минеральных ресурсов. Отдел шахт и геологии разработал директивный план исследования геологии городов Калифорнии, важным свойством которого является то, что он помогает лучше увидеть сильные и слабые стороны результатов, полученных при оценке общего геологического риска. Главной целью работ было определение меры, необходимой для того, чтобы в пределах городов свести к минимуму человеческие жертвы и материальные потери, связанные с геодинамическими процессами.

Все города штата были поделены на районы, каждой такой площадной ячейке были приписаны те или иные геологические и демографические характеристики, и все эти данные были заложены в вычислительную машину. В этом исследовании впервые были рассчитаны с использованием формулы, приведенной в предыдущем разделе, величины, показывающие главную опасность (*ГО*); каждая ячейка получила свою характеристику, и с помощью ЭВМ были построены соответствующие карты. Эти карты вычисленных значений *ГО* позволяют проверить точность исходных данных и, что еще важнее, они позволяют увидеть результаты этого исследования в пространственной и географической связи. Административные и геотехнические ведомства могут использовать полученные оценки ожидаемого ущерба (*УГ*) при выделении мест, нуждающихся в помощи и специальном обследовании.

Практические испытания показали, однако, что рассчитанные этим методом значения, характеризующие приоритет главной опасности (*ГО*), зависят главным образом от степени застроенности территории (фактор *ПН*), а не от величины ожидаемого ущерба (*УГ*). Демографические данные говорят о том, что в Калифорнии городское развитие будет происходить по преимуществу на окраинах существующих городских территорий, и застраивать новые площади не потребуется.

**Результаты.** Одним из результатов использования рассчитанной на ЭВМ модели была оценка потенциальных денежных потерь от ожидаемых в Калифорнии геологических катастроф вплоть до 2000 г. Эти величины приведены в табл. 8.1. Наиболее крупный ущерб принесут колебания грунта при местных землетрясениях — потери составят более 21 млрд. долл. Величина этой оценки сильно зависит от того, как рассчитано количество человеческих жертв и какой денежный эквивалент человеческой жизни использован для расчета.

Хотя полученные оценки должны рассматриваться только как грубые прикидки, они показывают масштаб проблем, возникающих при планировании развития страны или области. Кроме того, результаты исследования позволяют сделать вывод,

что улучшение существующей строительной практики до уровня, технически достижимого в настоящее время, может снизить ожидаемые потери на 70%. Стоимость необходимых для этого мер вшестеро ниже той суммы, на которую можно уменьшить ожидаемый ущерб.

Выяснено, что *модификации* метода приоритета главной опасности не ведут к большим изменениям в оценке того, каким местностям угрожает наиболее серьезная или наиболее реальная опасность. Понятно, что такой анализ представляет собой чрезмерное упрощение очень сложной проблемы. Например, построив где-то вдалеке плотину, можно предотвратить наводнение в данном районе, но при этом возникает сложная взаимосвязь между факторами населенности (*ПН* и *ЧЛ*) района и величиной ущерба от геологической катастрофы (*УГ*) в соседних (а иногда и в отдаленных) районах.

## 8.6. Комплексное решение проблемы

**Противоречивость интересов.** В предыдущих главах предложены различные способы уменьшения ущерба от землетрясений, цунами, наводнений, вулканических извержений и изменений поверхности грунта. Некоторые из этих способов даже испытаны на практике. Следует, однако, подчеркнуть, что предпринимаемые меры сами часто оказывают воздействие на геологическую обстановку, и последствия этого не ясны. Так, одним из результатов сооружения противопаводковых плотин в бассейнах рек часто бывает ускоренная типовая застройка больших площадей в низовьях этих рек. В этих случаях прорыв какой-либо из этих плотин может привести к более катастрофическим последствиям, чем если бы защитные меры вообще не предпринимались. Здесь нет четких математических формул. Ясно одно: комплексный подход к проблеме геологической опасности, при котором взаимодействующие факторы изучаются совместно, должен принести обществу большую пользу, чем ограниченный, фрагментарный подход, часто практиковавшийся в прошлые годы.

Возможно, еще более грудная проблема возникает тогда, когда постройка какого-либо сооружения сулит немедленные выгоды. Наглядный пример — отношение к оседанию поверхности: иногда последствия такого оседания, развивающиеся не сразу, а в течение длительного времени, считаются менее важными, чем быстрое промышленное развитие.

Два конкретных случая — это катастрофическое опускание поверхности в Венеции (см. фото 8.2 и гл. 7) и в Шанхае. Оседание грунта в промышленных районах Шанхая замечено было уже в 1921 г., но до сих пор мало что сделано для его предот-



Фото 8.2. Площадь Святого Марка в Венеции в периоды высоких приливов и неблагоприятных погодных условий становится продолжением Венецианской лагуны.

Снимок сделан 4 ноября 1966 г.

вращения. При высоких приливах и штормах важнейшие части города затопляются, несмотря на постройку дамб и другие защитные меры. Только недавно шанхайские власти распорядились закачивать в грунт воду через скважины у фабрик, чтобы остановить дальнейшее опускание. Использование этих скважин выгодно: в грунт закачиваются сточные воды текстильных фабрик, а летом вода выкачивается из грунта. При этом температура грунтовых вод оказывается ниже на  $10^{\circ}\text{C}$ , что обеспечивает летом лучшее охлаждение.

**Инспекционные группы.** Через всю эту книгу проводится мысль, что для правильной оценки геологической опасности необходимо привлечение многих научных дисциплин. Мало таких специалистов, которые могли бы полностью провести такую оценку без чужой помощи. Для этого требуется знание геологии, геофизики, географии, строительного дела, вопросов землепользования, статистики и математического программирования.

Во многих случаях чрезвычайно важную роль сыграли группы специалистов, обследовавших районы, которые испытали



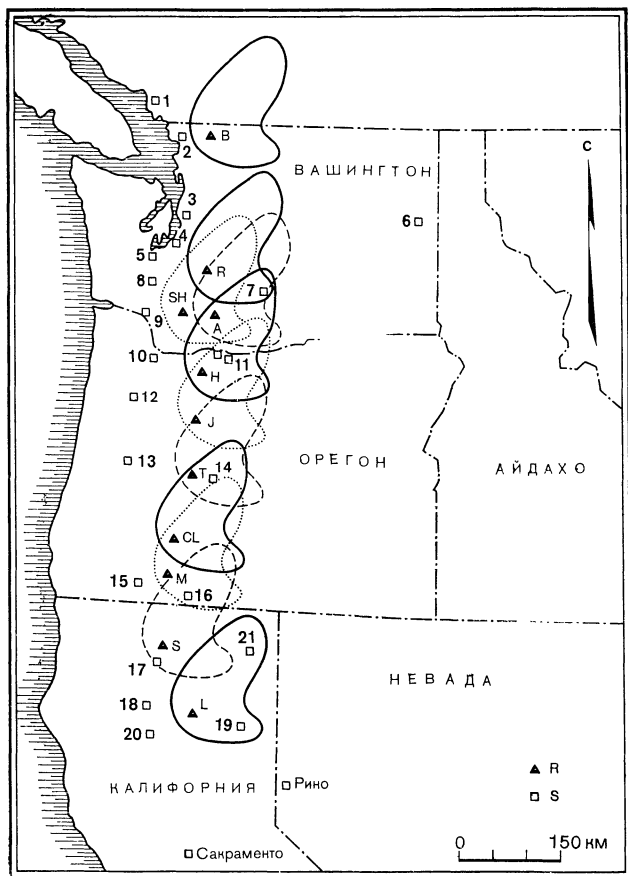
перед этим стихийное бедствие. В деле изучения землетрясений такая практика проводится уже в течение многих десятилетий и даже веков (см. раздел 1.6). Например, авторы превосходного доклада Комиссии по землетрясениям штата Калифорния о землетрясении 1906 года А. Лоусон и Дж. Гильберт были выдающимися геологами, Х. Рид — специалистом по прикладной механике. Важнейшие достижения при анализе механизма Аляскинского землетрясения 1964 г. были результатом исследований во многих научных областях.

Возможно, со временем университеты будут готовить специалистов по комплексному изучению условий, вызывающих природные катастрофы и возникающих после таких катастроф. В настоящее же время лучше всего в общем случае полагаться на коллективное решение группы специалистов; иначе что-то может оказаться вне компетенции исследователя, и важнейшие аспекты проблемы не будут учтены.

## 8.7. Страхование от геологической опасности

**Страхование от наводнений в США.** Возможность страхования от таких стихийных бедствий, как наводнения, цунами, извержения вулканов и лавины, представляет собой особую проблему в страховом деле. Во-первых, нельзя точно предсказать, когда (а часто и где) произойдет стихийное бедствие и насколько тяжелым оно будет. (На фиг. 8.5 показан пример того, сколь велика площадь, которой угрожает при определенных условиях опасность вулканических извержений.) Следовательно, трудно дать обоснованную оценку стоимости ожидаемого ущерба. Во-вторых, здесь нет с точки зрения страховой статистики широкого географического распространения риска, позволяющего собирать страховые взносы с большой массы людей, как при других видах страхования имущества. Поэтому страховая сумма в общем случае будет складываться только из взносов тех, кто живет в районах, где геологическая опасность хорошо известна и остра (в разделе 2.5 рассмотрены проблемы страхования от разрушений, вызываемых лавовыми потоками).

По этим причинам в США и в большинстве других стран мира обычно не удается проводить дешевое страхование имущества, например, от наводнений, хотя стоимость восстановления материальных ценностей, особенно в городах (см. фото 8.2), может быть очень высокой. В 1956 г. конгресс США одобрил «Закон о страховании от наводнений», но не смог найти денежные средства, чтобы ввести его в действие. Идея, однако, не умерла, и в 1968 г. этот национальный закон был включен как пункт XIII в «Закон о жилищном строительстве и развитии».



Фиг. 85. Расположение крупных вулканов на территории Каскадных гор в США.

Вокруг вулкана Мезама (CL) околнута площадь, покрытая слоем пепла и пемзы толщиной 15 см и больше при извержении вулкана примерно в 5000 г. до н. э. Карта показывает также размеры областей опустошения при выпадении пепла, которое можно ожидать при подобном извержении любого из этих вулканов и при сходных направлениях ветра (Crandell, Waldron, 1969; см. гл. 2). Буквами обозначены вулканы, цифрами — города: А—влк. Адамс, В—влк. Бейкер, CL—оз. Крейтер (влк. Мезама), H—влк. Худ, J—влк. Джефферсон, L—влк. Лассен-Пик, M—влк. Мак-Доклин, R—влк. Рейнир, S—влк. Шаста, SH—влк. Сент-Хеленс, T—влк. Три-Систерс; 1—Ванкувер, 2—Беллингем, 3—Сиэтл, 4—Такома, 5—Олимпия, 6—Спокэн, 7—Якима, 8—Сентрейлия, 9—Лонгвью, 10—Портленд, 11—Худ-Ривер и Те-Далс, 12—Сейлем, 13—Юджин, 14—Бенд, 15—Медфорд, 16—Кламат-Фолс, 17—Дансбург, 18—Реддинг, 19—Сузанвилл, 20—Ред-Блафф, 21—Альтурас

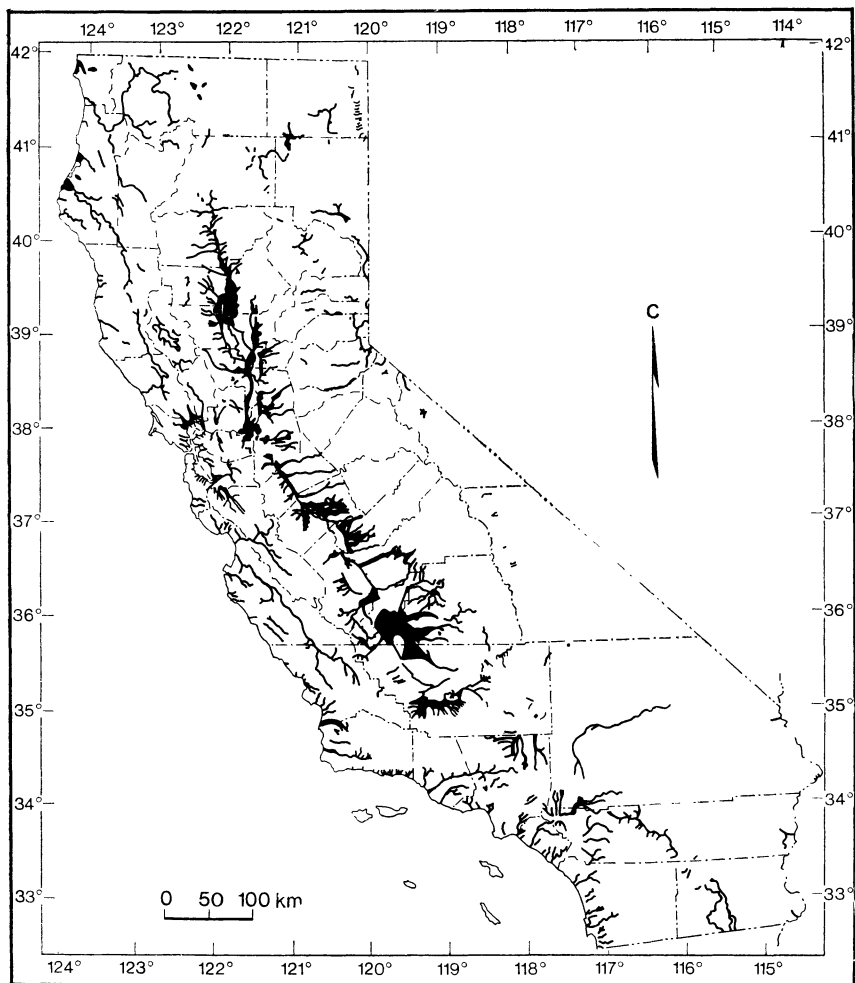
Этот закон указывает, что страхование ограниченного размера от наводнений будет введено в тех общинах, которые выразят решимость установить и поддерживать стандарты, регулирующие землепользование на площадях, где возможно затопление и образование грязевых оползней.

Фонд страхования от наводнений составляется из сумм, поступающих от страховых компаний (в лице Национальной ассоциации страхования от наводнений) и от Федерального страхового ведомства. За 12 месяцев — с июня 1972 г. по май 1973 г. — количество общин в США и Пуэрто-Рико, которым было позволено иметь страхование от наводнений, подскочило на 89,4%: с 1201 до 2275; количество действующих страховых полисов увеличилось на 158%. Страховой фонд резко возрос от 148 млрд. долл. до более 400 млрд. долл. Катастрофические наводнения в середине 1972 г., в том числе те, которые в начале июня опустошили город Рэпид-Сити (Южная Дакота), а позже в том же месяце затопили районы восточного побережья (во время урагана «Агнеса»; см. раздел 7.4), стимулировали этот резкий рост страхового фонда.

Тем не менее, как и в случае наводнения в Рэпид-Сити, тысячи людей, чье имущество было унесено или повреждено наводнениями в первой половине 1973 г., не смогли получить никакого возмещения по страхованию от наводнений. Что касается Калифорнии, то страхование от наводнений и грязевых потоков, широко развитых в этом штате (см. фиг. 8.6), проводится по закону 1968 г. начиная с 1970 г. Этим занимается компания страхования от огня «Файрмэнс фанд америкэн». Если община участвует в данной программе, то страховой полис можно купить у любого агента. По этому полису возмещается ущерб, причиненный в результате частичного или полного затопления обычно сухой местности при паводках или приливах, при быстром накоплении или стоке поверхностных вод и при грязевых оползнях, связанных с накоплением воды на грунте или в нем.

Максимальная сумма страховки составляет 17,5 тыс. долл. для обычного односемейного дома и 30 тыс. долл. для всех других построек. Полис предусматривает страховую премию (в пользу страховой компании. — *Перев.*) отдельно за дом и за находящиеся в нем вещи в размере 200 долл., или 2% от страховой суммы. На каждые 100 долл. суммы страхования односемейного дома владелец вносит 35 центов в год.

**Страхование от землетрясений в США.** С подобными же проблемами связано страхование от землетрясений. Хотя примерно две трети из заключенных в США договоров о страховании от землетрясений приходится на Калифорнию, ни один из штатов не располагает сколько-нибудь развитой системой такого страхования. После землетрясения Сан-Фернандо были предприняты новые усилия, чтобы расширить эту систему, но тогда в законодательстве штата не удалось добиться большого прогресса.



Фиг. 8.6. Районы Калифорнии, подверженные значительным наводнениям (показаны черным), включая специально построенные отстойники, резервные площади и естественные паводковые бассейны.

Из кн.: «Urban Geology Master Plan for California», 1973.

Калифорния разделена на три зоны по вероятности сильных землетрясений, стоимость страхования в этих зонах различна.

Зона 1. Все районы побережья и районы к востоку от Сьерра-Невады.

Зона 2. Центральная часть штата к северу от графств Кингс и Туларе до границы штата Орегон.

### Зона 3. Графство Импириал.

В зоне 2 стоимость страхования от землетрясения наименьшая, в зоне 3 — наибольшая. Для деревянного жилого дома рамной конструкции и для содержащихся в нем вещей стоимость страхования от землетрясения обычно меняется от 15 центов на 100 долл. в зоне 2 до 30 центов на 100 долл. в графстве Импириал. Договор оформляется обычно как индоссамент [передаточная надпись. — *Перев.*] на полисе страхования от огня или на полисе домовладельца; страховая премия обычно составляет при этом 5% для жилища и отдельно для находящегося в нем имущества. Страхования старых построек, например домов из необожженного кирпича или не имеющих каркаса, практически не существует ввиду большой вероятности их полного разрушения при землетрясении.

Чтобы учесть риск, связанный с другими геологическими опасностями, было предложено объединять страхование от таких стихийных бедствий в одной страховой книжке. В последнее время по крайней мере одна компания в США пошла по этому пути. В 1973 г. банк Уэлс в Фарго в Северной Дакоте предложил страхование от стихийных бедствий для лиц, владеющих складными листами этого банка, по цене 24 долл. в год на 25 тыс. долл. суммы залога за вычетом 500 долл. страховой премии. Банк учредил трест для страхования от стихийных бедствий для заинтересованных в этом домовладельцев. Предусматривается покрытие непосредственного ущерба не только от землетрясений, но и от затопления поверхностными водами, от грязевых потоков, оползней, цунами, приливных и прибойных волн, а также ущерба в результате обрушения или прорыва плотины или выхода водохранилища из берегов независимо от того, было это связано с землетрясением или нет.

Максимальный предел ответственности страхователей при одном событии составляет 20 млн. долл.; предприняты меры, чтобы посредством привлечения других страховых компаний увеличить этот предел до 100 млн. долл. или больше. Если страховой фонд к моменту землетрясения окажется истощен, то будет произведено распределение имеющихся средств между потерпевшими *pro rata*, т. е. пропорционально сделанным ими взносам.

**Страхование от землетрясений в Новой Зеландии.** В других районах мира принципы страхования от геологической опасности очень различны. Особый интерес представляет система страхования от землетрясений в Новой Зеландии, введенная там после второй мировой войны. «Закон о военном ущербе», принятый в 1941 г., обязывает страховые компании выплачивать в фонд Комиссии по военному ущербу часть страховой премии

по полисам страхования от огня. Компании компенсировали этот налог за счет застрахованных. Частные страховые компании продолжали накапливать сведения о риске и получать премию, но правительственная комиссия разбирала претензии на возмещение ущерба и несла за это ответственность.

В 1944 г. на смену этому закону пришел «Закон об ущербе от землетрясения и войны». Фонд, предназначавшийся для возмещения военного ущерба, составлял тогда 8 млн. новозеландских долл., и эта сумма стала основой страхового фонда от землетрясений и огня. В 1948 г. страхование было распространено на опасность ущерба, связанного с особенно сильными бурями и наводнениями, а еще позднее — и с вулканическими извержениями. В 1970 г. к этому было автоматически, без какой-либо дополнительной платы, добавлено страхование от оползней, по которому возмещаются убытки, обусловленные любым смещением земной поверхности на склонах холмов, насыпей и на береговых откосах, если только это не связано с проседанием, усыханием или уплотнением грунта.

По этому закону частные страховые компании получают страховую премию в размере 5 центов на каждые 100 долл. страховой суммы; за страхование заложенного имущества можно получать половину такой премии. Владельцы застрахованного имущества облагаются, однако, налогом в размере 1% (но не меньше 10 и не больше 100 долл.) от суммы возмещаемого ущерба. Эта система не имеет вариантов и автоматически введена во все виды страхования — даже на автомобили. Ею не охвачены только те совсем уж неблагоразумные люди, которые ни от чего не застраховались.

Самые крупные требования о возмещении ущерба от землетрясений предъявлялись в 1969 г. после землетрясения Инангахуа 1968 г. (см. раздел 1.4). В 1972 г. было зарегистрировано 3700 таких требований; сумма выплат, включая оценку еще неудовлетворенных требований, составила в целом около четверти миллиона долларов. Это было второе по величине число требований, принятых за один год. Крупнейшее за последнее время землетрясение произошло 6 января 1973 г. Оно имело магнитуду 6,7 и захватило всю площадь от залива Хок до Веллингтона; после него было предъявлено в общей сложности 2300 требований о возмещении ущерба.

Фонд страхования от землетрясений, из которого берутся средства на возмещение ущерба от войны, землетрясений и пожаров, вызванных землетрясениями, в 1973 г. составлял 170 млн. долл. Фонд, из которого возмещается ущерб, связанный с бурями, наводнениями, вулканическими извержениями, а также с оползнями, составляет 3 млн. долл. Ясно, что если

вблизи одного из четырех наиболее густонаселенных районов Новой Зеландии произойдет крупное землетрясение, то потери вполне могут превысить этот накопленный капитал. По-видимому, в этом случае правительству придется найти другие фонды, чтобы возместить ущерб, который будет причинен застрахованному имуществу.

## 8.8. Районирование по сейсмическому риску и требования к строительству

В ряде стран мира делаются попытки составлять карты сейсмического районирования различных масштабов. На самых общих картах указываются районы континента или страны, где можно ожидать сейсмические сотрясения той или иной интенсивности. Классификация зон при таком районировании обычно учитывает фактор вероятности крупных землетрясений. На более детальных картах можно показать различную степень риска, а на картах отдельных участков — различие геологических и топографических условий, влияющих на оценку риска. Все такие карты отражают, конечно, опыт изучения землетрясений на протяжении сравнительно короткого отрезка времени; карты, составляемые для небольших территорий, меняются после каждого землетрясения, хотя сейсмическая активность в масштабе континентов изучена уже, вероятно, довольно хорошо.

Построение карты районирования в масштабе, скажем, административного района (в США — графства) следовало бы основывать на действительных измерениях колебаний грунта при наблюдавшихся землетрясениях. Однако только в последнее время и только в некоторых районах для получения таких сведений было установлено достаточное количество приборов для записи сильных толчков. Пройдет еще немало времени, прежде чем накопится фактический материал, достаточный для составления карт районирования. Существующие карты основаны на данных о близости известных и предполагаемых активных разломов и силе возникающих по ним землетрясений, на соображениях об оползневой опасности, на сведениях об участках непрочных грунтов и высокого положения зеркала грунтовых вод, на других геологических данных, а также на субъективных оценках поведения разнообразных построек во время прошлых землетрясений. Проводимое таким способом районирование нельзя считать бесспорным, так как новое землетрясение может привести к иным последствиям, чем отмечавшиеся раньше. Несмотря на многочисленные проблемы, возникающие при составлении карт микросейсморайонирования, такие карты (доведен-

ные даже до масштаба городского квартала) существуют в ряде крупных городов, в частности в Токио<sup>1</sup>.

При землетрясениях самое большое влияние на человеческую деятельность оказывали и будут оказывать в дальнейшем сейсмические колебания грунта и построенных на нем (или в нем) сооружений. Безопасность обитателей здания непосредственно зависит от того, сможет ли оно выдержать сильные сотрясения грунта.

Сейсмостойкость здания обеспечивается двумя способами: соблюдением соответствующих инструкций строительного кодекса и использованием методов, разработанных для анализа прочности конструкции. Все здания данного района должны удовлетворять местным строительным правилам; специальный анализ проводится, как правило, только для особенно крупных и дорогостоящих сооружений. Общая идея такого подхода заключается не в том, чтобы предотвратить ущерб при всех землетрясениях, а в том, чтобы свести к минимуму ущерб от небольших и умеренных колебаний грунта и избежать обрушения зданий при сотрясениях наибольшей интенсивности, когда ущерб, очевидно, может оказаться очень тяжелым. Таким образом, строительные нормы и правила — это тот документ, в котором научные проблемы сейсмостойкого строительства теснее всего соприкасаются с вопросом о безопасности населения.

В докладе Национальной академии наук США (1969 г.) подчеркнуты принципы, определяющие разработку правил сейсмостойкого строительства:

«Эти правила не являются результатом теоретического исследования по проектированию сейсмостойких зданий, а представляют собой сводку полученного к настоящему времени опыта практического строительства. Они не избавляют каждого отдельного инженера-строителя от необходимости делать свой собственный и в высшей степени ответственный выбор при создании конкретного проекта.. В правилах учитывается необходимость делать вывод об экономически оправданном соотношении между затратами на ремонт здания и его первоначальной стоимостью. Поскольку этот вывод сильно зависит от местных условий, можно ожидать, что в разных странах и в разных районах одной страны будут приняты весьма различные правила... Весь имеющийся опыт убедительно показывает, что правила сами по себе не принесут большой пользы, если они не получат поддержки сильных административных органов и если не будет налажен эффективный надзор за их выполнением».

---

<sup>1</sup> В СССР карты сейсмического микрорайонирования составляются в обязательном порядке для всех крупных городов, находящихся в сейсмически опасных районах. — *Прим. ред*



Строительные правила совершенствуются в основном посредством изучения того воздействия, которое производят сейсмические колебания грунта на здания, построенные в соответствии с действующими правилами. Поэтому после разрушительных землетрясений в пострадавшие районы направляются обычно группы инженеров, которые производят обследование обрушившихся, поврежденных и расшатавшихся построек. В последние годы главное внимание при таких обследованиях обращается на поведение современных зданий и сооружений. Значительные усилия затрачиваются на то, чтобы установить интенсивность местных сотрясений грунта, влияние геологических факторов, характер разрушений, где они наблюдаются, а также на то, чтобы определить последовательность событий, которая бывает причиной разрушений. Детально изучаются те механизмы обрушения и повреждения здания, которые не учтены действующими требованиями к строительству. В итоге утверждаются изменения, вносимые в строительные правила.

## Список литературы

1. *Alfors J. T., Burnett J. L., Gay T. E.*, Urban Geology — Master Plan for California, Calif. Division of Mines and Geology, Bulletin 198, 1973.
2. Anon., Town Planning and Earthquake Faults, Town and Country Planning Bulletin, No. 7, New Zealand Ministry of Works, 1965.
3. *Algermissen S. J., Rinehart W. A., Dewey J.*, A Study of Earthquake Losses in the San Francisco Bay Area, NOAA Report for Office of Emergency Preparedness, 1972.
4. Anon., Proceedings, The International Conference on Microzonation for Safer Construction — Research and Application, Seattle, Washington, The National Science Foundation, 1972.
5. Anon., Earthquake and Insurance, Center for Research on the Prevention of Natural Disasters, DRC-73-02, Calif. Institute of Technology, 1973.
6. Anon., Report of the Earthquake and War Damage Commission for Year 31 March 1973, New Zealand, Government Printer, 1973.
7. *Alauist A. E.*, Meeting the Earthquake Challenge, Sacramento, Report to the Legislature, Joint Committee on Seismic Safety, California Legislature, 1974.
8. *Bowden M. J.*, Reconstruction Following Catastrophe, the Laissez-Faire Rebuilding of Downtown San Francisco after the Earthquake and Fire of 1906, Proceedings of the Association of American Geographers, 2, 22—26, 1970.
9. *Cochran A.*, A Selected Annotated Bibliography on Natural Hazards, Natural Hazard Research Working, Paper No. 22, Toronto, Department of Geography, 1972.
10. *Freeman J. R.*, Earthquake Damage and Earthquake Insurance, New York, McGraw-Hill, 1932.
11. *Friedman D. G.*, Insurance and the Natural Hazards, The Austin Bulletin 7, Part 1, 1972.
12. *Glaken C. J.*, Traces on the Rhodian Shore, Nature and Culture in Western Thought from Ancient Times to the End of the Eighteenth Century, Berkeley, University of California Press, 1967.

13. *Graupner A., Pahl A.*, The Present State of Engineering Geology Mapping in the Federal Republic of Germany, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, No. 7, 1971.
14. *Hewitt K.*, Probabilistic Approaches to Discrete Natural Events, A Review and Discussion, *Economic Geography*, **46**, 332—349, 1970.
15. *Latter J. H.*, Natural Disasters, *Advancement of Science*, **25**, 360—380, 1969.
16. *McHarg I.*, *Design with Nature*, American Museum of Natural History, New York, Natural History Press, 1969.
17. *Olson R. A., Wallace M. M.*, eds., *Geologic Hazards and Public Problems*, U. S. Office of Emergency Preparedness, 1969.
18. *O'Riordan T.*, The New Zealand Earthquake and War Damage Commission, A Study of a National Natural Hazard Insurance Scheme, Natural Hazard Research Working Paper, no. 20, Toronto, Department of Geography, 1971.
19. *Park C. R.*, *Affluence in Jeopardy—Minerals and the Political Economy*, San Francisco, Freeman, Cooper and Co., 1968.
20. *Rees J. D.*, Paricutin Revisited, A Review of Man's Attempts to Adapt to Ecological Changes Resulting from Volcanic Catastrophe, *Geoforum* No. 4, 7—25, 1970.
21. Smithsonian Institute, Natural Disaster Research Centers and Warning Systems, A Preliminary Survey, Cambridge, Mass., Center for Short-Lived Phenomena, 1971.
22. *Steinbrugge K. V.*, Earthquake Hazard in the San Francisco Bay Area. A Continuing Problem in Public Policy, Berkeley, Institute of Government Studies, University of California, 1968.
23. *Wallace R. E.*, Coals, Strategy, and Tasks of the Earthquake Hazard Reduction Program, U. S. Geological Survey Circular 701, 1974.
24. *Wright R., Kamer S., Culver C.*, eds., *Building Practices for Disaster Mitigation*, National Bureau of Standards, BSS **46**, 1973.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ***Приложение А. Наиболее известные землетрясения мира (по данным Национального ведомства США по изучению океанов и атмосферы)***

Год	Район	Число жертв	Магнитуда	Примечания
Декабрь 856 г.	Греция, Коринф	45 000		
9 января 1038 г.	Китай, Шэньси	23 000		
1057 г.	Китай, Чжили	25 000		
1268 г.	Малая Азия, Силиджия	60 000		
27 сентября 1290 г.	Китай, Чжили	100 000		
20 мая 1293 г.	Япония, Камакура	30 000		
26 января 1531 г.	Португалия, Лиссабон	30 000		
23 января 1556 г.	Китай, Шэньси	830 000		

Год	Район	Число жертв	Магнитуда	Примечания
5 февраля 1663 г.	Река Святого Лаврентия			Максимальная интенсивность X баллов. В Масачусетсе разрушились дымовые трубы
Ноябрь 1667 г.	Кавказ, Шемаха	80 000		
11 января 1693 г.	Италия, Катания	60 000		
11 октября 1737 г.	Индия, Калькутта	300 000		
7 июня 1755 г.	Северный Иран	40 000		
1 ноября 1755 г.	Португалия, Лиссабон	70 000		Крупное цунами
4 февраля 1783 г.	Италия, Калабрия	50 000		
4 февраля 1797 г.	Эквадор, Кито	40 000		
16 декабря 1811 г.	США, Нью-Мадрид, штат Миссури	Несколько человек		Интенсивность XI баллов. Кроме того, толчки 23 января и 7 февраля 1812 г.
21 декабря 1812 г.	В открытом море у города Санта-Барбара, штат Калифорния	Несколько раненых		Максимальная интенсивность X баллов. Сообщения о цунами неопределенны
16 июня 1819 г.	Индия, Кач	1 543		
5 сентября 1822 г.	Малая Азия, Алеппо (Халеб)	22 000		
18 декабря 1828 г.	Япония, Этиго	30 000		
9 января 1857 г.	Калифорния, Форт-Техон			Вспарывание разлома Сан-Андреас Интенсивность X—XI баллов
13 августа 1868 г.	Перу — Боливия	25 000		
16 августа 1868 г.	Эквадор, Колумбия, Гуаякиль	Эквадор 40 000 Колумбия 30 000		
26 марта 1872 г.	Калифорния, Оуэнс-Валли	Около 50		Образование крупных разрывов
31 августа 1886 г.	Южная Каролина, Чарлстон — Саммервилл	Около 60		
28 октября 1891 г.	Япония, Мино-Овари	7 000		
15 июня 1896 г.	Япония	22 000		Цунами
12 июня 1897 г.	Индия, Ассам	1 500	8,7	
3 и 10 сентября 1899 г.	Аляска, залив Якутат		7,8 и 8,6	

Год	Район	Число жертв	Магнитуда	Примечания
18 апреля 1906 г.	Калифорния, Сан-Франциско	700	8 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	
28 декабря 1908 г.	Италия, Мессина	120 000	7 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	
13 января 1915 г.	Италия, Авеццано	30 000	7	
16 декабря 1920 г.	Китай, Ганьсу	180 000	8 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	
1 сентября 1923 г.	Япония, Канто	143 000	8,2	Большой пожар в Токио
26 декабря 1932 г.	Китай, Ганьсу	70 000	7,6	
31 мая 1935 г.	Индия, Кветта	60 000	7,5	
24 января 1939 г.	Чили, Чильян	30 000	7 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	
27 декабря 1939 г.	Турция, Эрзинджан	23 000	8,0	
28 июня 1948 г.	Япония, Фукуи	5 131		
5 августа 1949 г.	Эквадор, Пелилео	6 000		
29 февраля 1960 г.	Марокко, Агадир	14 000	5,9	
21—30 мая 1960 г.	Юг Чили	5 700	8,5	
1 сентября 1962 г.	Северо-западный Иран	14 000	7,3	
26 июля 1963 г.	Югославия, Скопье	1 200	6,0	См. текст.
28 марта 1964 г.	Аляска	131	8,6	Цунами в заливе Принс-Вильям
31 августа 1968 г.	Иран	11 600	7,4	Образование разрывов на поверхности
31 мая 1970 г.	Перу	66 000	7,8	Ущерб составил 530 млн. долл. Оползание больших масс породы. См. текст
9 февраля 1971 г.	Калифорния, Сан-Фернандо	65	6,5	Ущерб составил 550 млн. долл. См. текст
22 декабря 1972 г.	Никарагуа, Манагуа	5 000	6,2	См. текст
4 февраля 1975 г.	Ляонин Китай	Несколько человек	7,4	Значительные повреждения
6 сентября 1975 г.	Лидже, Турция	2 400	6,8	Повреждено 12 тыс. домов
4 февраля 1976 г.	Гватемала	23 000	7,9	Вспарывание разлома Мотагуа
6 мая 1976 г.	Фриули, Италия	1 000	6,5	Обширные повреждения, афтершоки
27 июля 1976 г.	Таншань, Китай	600 000 (?)	7,6	Большой экономический ущерб
4 марта 1977 г.	Румыния	1 500	7,2	Ощущалось в Москве и Риме

## Приложение Б. Значительные землетрясения США, Канады и Мексики (по данным Национального ведомства США по изучению океанов и атмосферы)

Год	Дата	Местность	Интенсивность по шкале ММ	Замечания
1638	11 июня	Массачусетс, Плимут	IX	Обрушилось много кирпичных дымовых труб. Трубы обрушивались и при землетрясении 1658 г. и, вероятно, при других землетрясениях
1663	5 февраля	Канада, Три-Риверс, нижнее течение реки Святого Лаврентия	X	В районе залива Массачусетс обрушились дымовые трубы
1732	16 сентября	Канада, Онтарио	IX (?)	В Монреале погибло 7 человек
1755	18 ноября	Массачусетс, вблизи Кеймбриджа	VIII	Обрушилось много дымовых труб, кирпичные постройки были повреждены, каменные ограды, как правило, разрушены. Выбросы песка из трещин в земле. Землетрясение ощущалось от Чесапикского залива до полуострова Новая Шотландия
1769	28 июля	Калифорния, район канала Сан-Педро	X	Сильные повреждения во время многочисленных афтершоков
1790	?	Калифорния, Оуэнс-Валли	X	Сильный толчок с образованием сбросовых уступов
1811	16 декабря	Миссури, Нью-Мадрид	XI	Три главных удара землетрясения. Город Нью-Мадрид разрушен, на обширных площадях изменилась конфигурация грунта и рек, в том числе Миссисипи. В Цинциннати и Ричмонде обрушились дымовые трубы. Землетрясения ощущались в Бостоне. Несколько человек погибло. Магнитуда этих трех толчков по Рихтеру около 7,5; 7,3 и 7,8
1812	23 января			
1812	7 февраля			
1812	8 декабря	Калифорния, Сан-Хуан-Капистрано	IX	Обрушилась церковь, при этом погибло 40 человек

Год	Дата	Местность	Интен- сивность по шкале ММ	Замечания
1812	21 де- кабря	Калифорния, вбли- зи Ломпока	X	В нескольких городах, в том числе в Санта-Барбаре, раз- рушены церкви и другие здания
1836	10 июня	Калифорния, район залива Сан-Франциско	X	Разрывы в грунте вдоль раз- лома Хейвард от миссии Сан-Хосе до Сан-Пабло
1838	Июнь	Калифорния, Сан-Франциско	X	Явления вспарывания разлома вдоль рифта Сан-Андреас. Это землетрясение, вероятно, можно сравнить с землетря- сением 18 апреля 1906 г.
1857	9 января	Калифорния, Форт-Техон	X—XI	Одно из сильнейших землетря- сений Тихоокеанского побе- режья в историческое время. Возникло на разломе Сан- Андреас в северо-западной части графства Лос-Андже- лес. Разрушены постройки, повалены большие деревья
1865	8 ок- тября	Калифорния, полу- остров Сан-Фран- циско	IX	Обширные повреждения в Сан-Франциско, особенно сильные на насыпных грун- тах
1868	21 ок- тября	Калифорния, Хей- вард	X	Разрушено и повреждено мно- жество построек в Хейварде и в Истбей. Сильные пов- реждения в районе Сан-Ле- андро и Сан-Франциско. 30 убитых. Вспарывание раз- лома Хейвард
1870	20 ок- тября	Канада, Мон- реаль — Квебек	IX	Землетрясениехватило боль- шую площадь. Незначитель- ные повреждения на побе- режье штата Мэн
1872	26 марта	Калифорния, Оуэнс-Валли	X—XI	Одно из сильнейших землетря- сений в районе Тихоокеан- ского побережья. Образо- вался сбросовый уступ высо- той 7 м. 27 убитых в Лон- Пайн всего погибло свыше 300 человек. Глинобитные дома разрушены

Год	Дата	Местность	Интен- сивность по шкале ММ	Замечания
1886	31 авгу- ста	Южная Каролина, Чарлстон	X	Самое сильное землетрясение в восточных штатах в историческое время. 102 здания разрушено, 90% повреждено, почти все дымовые трубы обрушились. Ущерб составил 5,5 млн. долл. (по современному курсу — 25 млн. долл.). Погибло около 60 человек. Землетрясение ощущалось в Бостоне, Чикаго и Сент-Лунсе
1887	3 мая	Мексика, Сонора	XI	Захватило большую площадь в пределах США. В нескольких городах, в том числе в Эль-Пасо и в Альбукерке, обрушились дымовые трубы
1895	31 ок- тября	Миссури, вблизи Чарлстона	IX	Ощущалось в Канаде, Виргинии, Луизиане и в Южной Дакоте. На больших площадях произошло оседание грунта и образовались озера. Множество дымовых труб обрушилось
1899	10 сен- тября	Аляска, залив Якутат	XI	Сильное землетрясение. Ощущалось на большой площади. Разрушения незначительные, потому что местность необитаема. Береговая линия поднялась на 15 м
1899	25 де- кабря	Калифорния, Сан-Джасинто	IX	Почти все кирпичные постройки в Сан-Джасинто и Хемете очень сильно повреждены. В Риверсайде обрушились дымовые трубы. 6 человек погибло. Другой сильный толчок произошел в 1918 г.
1900	9 ок- тября	Аляска, полуост- ров Кенай (?)	VII—VIII	Ощущалось от залива Якутат до острова Кадьяк. Сильные повреждения на острове Кадьяк



Год	Дата	Местность	Интенсивность по шкале ММ	Замечания
1906	18 апреля	Калифорния, Сан-Франциско	XI	Сильное землетрясение и пожар. Около 80% поврежденных, которые оцениваются в 400 млн. долл., обусловлено пожаром 700 человек погибло. Сильнейшие разрушения в Сан-Франциско и Санта-Розе. Горизонтальное скольжение по разлому Сан-Андреас на 6,5 м. Очень большие повреждения на плохо укрепленных насыпных грунтах
1909	26 мая	Иллинойс, Орора	VIII	Обрушилось много дымовых труб. Землетрясение ощущалось на большой площади
1915	22 июня	Калифорния, долина Импириал	VIII	Повреждения оцениваются почти в 1 млн. долл. 6 человек погибло. В прочных зданиях образовались трещины
1915	2 октября	Невада, Плезант-Валли	X	Захватило большую площадь. Глинобитные дома и водонапорные башни разрушены. Образовался разлом длиной 35 км, вертикальное смещение в одном месте составило 3,5 м
1925	28 февраля	Канада, залив Марри	VIII	Ощущалось во многих восточных и центральных штатах. Повреждения оцениваются суммой менее 100 тыс. долл.
1925	27 июня	Монтана, Манхаттан	IX	Оползень преградил вход в железнодорожный туннель. Разрушены некоторые здания, много дымовых труб обрушилось. Повреждения оцениваются суммой 300 тыс. долл.
1925	29 июня	Калифорния, Санта-Барбара	IX	Повреждения на сумму 6 млн. долл. 13 убитых. 70 зданий признано негодными
1929	12 августа	Нью-Йорк, Аттика	IX	Обрушилось 250 дымовых труб

Год	Дата	Местность	Интенсивность по шкале ММ	Замечания
1929	18 ноября	Большая Нью-фаундлендская банка	X	Подводный толчок разорвал 12 трансатлантических кабелей, некоторые обрывы — в 240 км один от другого. Несколько человек погибло от цунами, прошедшего вдоль полуострова Бьюэрин. В Канаде обрушилось несколько дымовых труб
1931	20 апреля	Нью-Йорк, озеро Джордж	VIII	Дымовые трубы обрушились
1931	16 августа	Техас, вблизи города Валентайн	VIII	Все здания повреждены, обрушилось много дымовых труб
1932	20 декабря	Невада, гора Сидар	X	В малонаселенном районе. Захватило большую площадь
1933	10 марта	Калифорния, Лонг-Бич	IX	Ущерб оценивается в 41 млн. долл., погибло 120 человек. Ущерб от пожара незначителен
1934	12 марта	Юта, Космо	VIII	Заметные изменения на территории к северу от Большого Соленого озера. Погибло 2 человека
1935	18 октября 31 октября	Монтана, Хелина (сильный афтершок)	VIII	Ущерб оценивается в 3,5 млн. долл., 4 человека погибло, около 50 ранено. Больше половины зданий повреждено на 2,5—100%. Второй толчок был сильнейшим из многочисленных афтершоков
1935	1 ноября	Канада, Тимискаминг	IX	Захватило большую площадь. Оползень вблизи очага
1940	18 мая	Калифорния, долина Импириал	X	Ущерб в 6 млн. долл., 8 человек погибло, 20 серьезно ранено. Возник разлом длиной 65 км с максимальным горизонтальным смещением 4,5 м

Год	Дата	Местность	Интен- сивность по шкале ММ	Замечания
1941	30 июня	Калифорния, Санта-Барбара	VIII	Ущерб в 100 тыс. долл.
1941	14 но- ября	Калифорния, Тор- ранс, Гардина	VIII	Ущерб составляет около 1 млн. долл., 50 зданий сильно повреждено
1944	5 сен- тября	Канада — Нью- Йорк, Корнуолл и Массена	IX	На реке Святого Лаврентия. Сообщалось об ущербе в 1,5 млн. долл. 90% дымо- вых труб в Массене разру- шено или повреждено
1946	1 апреля	Аляска, Алеутские острова	?	Сильное землетрясение. Цу- нами разрушило маяк и выз- вало сильные повреждения на Гавайских островах. Ущерб оценивается в 25 млн. долл.
1947	16 ок- тября	Аляска, Ненана	VIII	Обвалы и оползни, повредив- шие Аляскинскую железную дорогу
1949	13 ап- реля	Залив Пьюд- жет-Саунд	VIII	Ущерб оценивается в 25 млн. долл. 8 человек погибло не- посредственно во время землетрясения или после него. Повреждения приуро- чены главным образом к за- болоченным, аллювиальным или насыпным грунтам. Об- рушилось много дымовых труб, парапетов и карнизов
1952	20 июля	Калифорния, граф- ство Керн	X	Ущерб оценивается в 60 млн. долл. 12 человек погибло, 18 серьезно ранено. Желез- нодорожные туннели обру- шились, рельсы приобрели S-образную форму. На по- верхности образовался раз- рыв с вертикальным и гори- зонтальным смещением около 0,5 м

Год	Дата	Местность	Интен- сивность по шкале ММ	Замечания
1952	22 авгу- ста	Калифорния, Бей- керсфилд	VIII	2 человека погибло, 35 ранено. Ущерб составляет 10 млн. долл.
1954	6 июля	Невада, Фаллон	IX	Повреждения оросительных каналов на большой пло- щади. Несколько раненых
1954	23 авгу- ста	Невада, Фаллон	VIII	Разрывы на поверхности. Ущерб на сумму более 91 тыс. долл.
1954	16 де- кабря	Невада, Дикси- Валли	X	Разрывы на поверхности в зоне длиной 88 км с вертикаль- ным смещением до 4,5 м в малонаселенной местности
1957	22 марта	Калифорния, Сан-Франциско	VIII	Повреждения в районе Уэст- лейк и Дейли-Сити
1958	7 ап- реля	Центральная Аля- ска	VIII	Сильные нарушения речного и озерного льда, валы вы- давливания и грязевые по- токи
1958	9 июля	Аляска, залив Ли- туя	XI	Сильное землетрясение. Опол- зень вызвал образование волны, которая обнажила склон горы до высоты 540 м. Возник разрыв большой про- тяженности. Кабели разор- ваны. 5 человек утонуло
1959	17 авгу- ста	Монтана, озеро Хебген	X	Гигантский оползень запрудил реку и вызвал образование озера. Возникли сбросовые уступы высотой 4,5 м. Мак- симальное вертикальное перемещение 6,5 м. Погибло 28 человек. Ущерб, причи- ненный только дорогам, оце- нивается в 11 млн. долл.

Год	Дата	Местность	Интен- сивность по шкале ММ	Замечания
1964	27 марта	Аляска, залив	X—XI	Сильное землетрясение (Землетрясение страстной пятницы). Ущерб, нанесенный общественному имуществу, оценивается в 235 млн. долл., недвижимости — в 77 млн. долл. В Анкоридже на значительной площади повреждены здания умеренной высоты (45 м и меньше) и плохо построенные низкие здания. Оползни и оседание грунта вызвали полное разрушение множества построек. В нескольких портах доки разрушены вследствие подводных оползней и цунами. Повреждения от морских волн на побережье США и в других местах. Количество погибших — 131 человек. В отдельных местах береговая линия поднялась на 10 м, а в других опустилась на 2 м
1965	29 апреля	Штат Вашингтон, залив Пьюджет-Саунд	VII—VIII	Потери имущества оцениваются в 12 млн. долл., главным образом в Сиэтле. Землетрясение ощущалось на площади 350 тыс. км <sup>2</sup> . 3 человека убито и 3 умерло, очевидно, от сердечных приступов
1969	1 октября	Калифорния, Санта-Роза	VII—VIII	Потери имущества оцениваются в 6 млн. долл. Ощущалось на площади 30 тыс. км <sup>2</sup>
1971	9 февраля	Калифорния, Сан-Фернандо	VIII—XI	Непосредственный материальный ущерб составляет 500 млн. долл., 65 человек погибло, более 1000 ранено. Землетрясение ощущалось на площади 230 тыс. км <sup>2</sup>

**Приложение В. Количество действующих  
и активных в недавнее  
геологическое время вулканов  
в разных регионах  
(по Макдоналду, 1972 г.)**

Регион	Примерное количество вулканов		
	Действующие <sup>а</sup>	Активные в недавнее время <sup>б</sup>	Всего
Антарктида и дуга Скоша	10	6	16
Новая Зеландия	5	1	6
Архипелаг Тонга — Кермадек	14	1	15
Самоа	4	16	20
Меланезия (включая Новую Гвинею)	30	28	58
Индонезия	75	58	133
Филиппины	15	16	31
Желтое, Южно- и Восточно-Китайское моря	7	?	7+
Острова Рюкю	6	7	13
Марианские острова и острова Идзу	20	3	23
Япония	31	14	45
Курильские острова	33	6	39
Камчатка	19	9	28
Алеутские острова и Аляска	39	21	60
Британская Колумбия	0	2	2
Каскадные горы, северо-запад США	7	8	15
Мексика и Центральная Америка	42	18	60
Южная Америка (Анды)	47	13	60
Тихий океан	15	?	15+
Вест-Индия	9	8	17
Атлантический океан	22	?	22+
Исландия и остров Ян-Майен	23	?	23+
Средиземноморье	13	12	25
Африка	14	29	43
Малая Азия	8	19	27
Индийский океан	4	?	4+
<b>Всего</b>	<b>513</b>	<b>228+</b>	<b>741+</b>

<sup>а</sup> Вулканы, извержения которых в историческое время установлены или очень вероятны.

<sup>б</sup> Вулканы с сольфатарной деятельностью в очень хорошо сохранившемся виде; предполагается, что они были действующими в течение последних нескольких десятков тысяч лет

**Приложение Г. Наиболее тяжелые бедствия,  
причиненные наводнениями  
в 1963—1974 гг. (по У. Л. Хорну)**

Год	Местность	Замечания
1963	Карибский регион	Во время урагана 1—9 октября на Кубе и Гаити погибло 4000 человек
	Гаити	Наводнение 14—15 ноября, потоки воды и оползни привели к гибели 500 человек
	Вблизи Беллуно, Италии	9 октября оползень, спустившийся в водохранилище Вайонт, вызвал образование перекрывшей плотину волны, в результате погибло более 2000 человек
1964	Монтана	Наводнения 8—9 июня привели к гибели 36 человек
	Луизиана	Ураган 3 октября и связанные с ним торнадо привели к гибели 36 человек
	Калифорния, Орегон и Вашингтон	Наводнения в конце декабря привели к гибели 45 человек
1965	Юго-запад США	Во время наводнений 18—19 июня погибло 27 человек
1966	Рио-де-Жанейро	Наводнение 11—13 января, потоки воды и оползни привели к гибели более 300 человек
	Карибский регион и Мексика	Ураган 25 сентября — 1 октября оказался роковым по меньшей мере для 200 человек
	Арно, Италия	Наводнение, 3—4 ноября разлилась река Арно, погибло 113 человек, уничтожены бесценные художественные сокровища во Флоренции
1967	Рио-де-Жанейро, Сан-Паулу, Бразилия	Наводнение, сильные ливневые потоки в январе — марте привели к гибели более 600 человек
	Лиссабон	Наводнение 25 ноября, погибло 457 человек

Год	Местность	Замечания
1968	Гуджарат, Индия	Наводнение 8—14 августа, погибло около 1000 человек
1969	Южная Калифорния	Наводнения 25—29 января и 21—25 февраля, погибло 115 человек, материальный ущерб составляет 300 млн. долл.
	Юг штата Мичиган и север штата Огайо	Кратковременные наводнения, 4 июля погибло 33 человека
	Миссисипи и Луизиана	Ураган «Камилла», 17 августа погибло около 200 человек
	Виргиния	Наводнения, 23 августа погибло 100 человек
1970	Куба, Флорида и Техас	Ураган «Селия», 3 августа погибло 3 человека
	Восточный Пакистан, район дельты реки Инд	Тайфун, 12 ноября во время шторма и наводнения погибло 500 тыс. (?) человек. Величайшее стихийное бедствие века
	Орадя, Румыния	Наводнение 11—23 мая, погибло 200 человек, более 225 городов разрушено
	Аризона, США	Тропический шторм «Норма», погибло 23 человека
1971		Ни одного не произошло
1972	Буффало-Крик, западная Виргиния	Наводнение, 26 февраля вода из отработанной угольной шахты прорвала временную плотину, погибло 118 человек
	Рапид-Сити, Северная Дакота	Кратковременное наводнение 10 июня, ущерб составляет свыше 120 млн. долл., погибло 237 человек
	Восточное побережье США	Ураган «Агнеса», 18—25 июня, первый в сезоне, погибло 118 человек, материальный ущерб составляет 3 млрд. долл.; его считают величайшим стихийным бедствием, постигшим Соединенные Штаты
1974	Северная Австралия и Брисбен	Наводнение в период муссонов и циклоны в Квинсленде, погибло по меньшей мере 15 человек. Величайшее стихийное бедствие в Австралии



## Приложение Д. Шкала геологического времени

Относительная продолжительность главных подразделений геологической шкалы	Эра	Период	Эпоха	Приблизительная продолжительность периода или эпохи (млн лет)	Начало периода или эпохи (млн лет назад)
Кайнозой	Кайнозойская	Четвертичный	Голоцен	Прибл. 10 тыс. лет	
			Плейстоцен	2,5	2,5
		Третичный	Плиоцен	4,5	7
			Миоцен	19,0	26
			Олигоцен	12,0	38
Мезозой	Кайнозойская	Третичный	Эоцен	16,0	54
			Палеоцен	11,0	65
Палеозой	Мезозойская	Меловой		71	136
		Юрский		54	190
		Триасовый		35	225
		Пермский		55	280
	Палеозойская	Каменно-угольный	Пенсильванский	45	325
			Миссисипский	20	345
			Девонский	50	395
		Силурийский		35	430
		Ордовикский		70	500
		Кембрийский		70	570
Докембрий	Докембрий			4030	

# Предметный указатель

Аа, лавы типа аа 105, 121  
Абсолютный возраст горных пород 20, 75  
Акселерограмма 66, 77—81, 83—84  
Аллювиальные конусы (конусы выноса) 339  
— отложения 390  
Аляскинский нефтепровод 21, 75, 91—93  
Атомные электростанции 75  
— — выбор участка для строительства 75, 88—91  
— — расчетное землетрясение 89—90  
— — учет опасности опускания поверхности 288  
Аэрофотосъемка  
— на трассе Аляскинского нефтепровода 92  
— оползней 241  
  
Базисная волна 119  
Бор (приливная волна) 190, 204  
Брекчия обрушения 106  
  
Внезапное наводнение 372  
Внутреннего трения угол  
— — — грунта 224  
— — — снега 302  
Водоносный горизонт 276, 282—284  
Водопроницаемость 330  
Водоснабжение 379—380  
Водохранилища многоцелевые 349—350  
— противопаводковые 349  
Водохранилище Болдуин 213, 328, 379—380  
— Ван-Норман 68, 74  
— оз. Мид 275, 290  
Волновая ловушка 189  
Волны Лява 28, 193  
— Рэлея 28, 193  
Всестороннее давление 226—229  
Вулканические бомбы и глыбы 103, 114  
— газы 159—163, 177

Вулканические конусы 130  
Вулканический купол 105—106  
— пепел 109—118, 164—169  
— шлак 103  
Вулканическое дрожание 179  
Вулканов извержения, Анды, 54, 108  
— — Ареналь 114, 155, 181  
— — Асама 177—178, 180  
— — Асо 176  
— — Бандай (1888 г.) 141  
— — Безымянный (1956 г.) 139, 158, 165—167, 180  
— — Везувий 121—122, 163, 179  
— — Вильяррика (1963 г.) 140, 145  
— — Гавайские острова 171, 174  
— — Гекла 172  
— — Ирасу 114, 117, 141, 160  
— — Исалько 147  
— — Кавах-Иджен 139  
— — Капелиньош (1957 г.) 102  
— — Каскадные горы 108, 164—165, 173  
— — Катмай 120, 158, 160  
— — Келуд 137—139, 172—173  
— — Килауэа 174, 178, 180—182  
— — Косигуина 71, 161  
— — Кракатау (1883 г.) 120, 168—169  
— — Лаки (1783 г.) 120, 126  
— — Лассен-Пик (1915 г.) 139  
— — Манама 178  
— — Масая-Ниндири 162—163  
— — Мауна-Лоа 175—176, 178, 181  
— — Мауна-Улу 182  
— — Мезама (г. Скотт, оз. Крейтер) 158, 164, 173  
— — Михара 177, 179  
— — Мон-Пеле (1902 г.) 147, 149—153  
— — Павлова (1786 г.) 21  
— — Парикутин (1943—1952 г.) 115—117, 125  
— — кратер Пийпа (1966 г.) 177  
— — Пуйеуэ (1960 г.) 54  
— — Сакурадзима (1914 г.) 54

Вулканов извержения, Санта-Мария (1902 г.) 147

- Санторин 169—171
- Спер (1953 г.) 114
- Суртсей 103, 171
- Тааль 118, 190
- Тамбора (1815 г.) 167
- Усу 178
- Фудзияма 172
- Хеймаэ 115—116, 126, 134
- Эгейское море 39
- Эльдафедль 115
- Этна 123—125

Вулканы, грязевые потоки 108

- дремлющие 99
- использование энергии 98, 99
- конусы разбрызгивания 103
- предсказание извержений 181, 182
- сложные 163
- эксплозии 101
- энергия 98

Геологическая опасность 9

- вероятностный риск 386
- моделирование на ЭВМ 392—393
- общий геологический риск 382—386, 389
- относительный риск 385
- оценка ущерба 386

Геологические карты 75, 389—391

Геология городов 396—400

Геофизические исследования 75—76

Гидрографическая кривая 345

Гидрологическая станция 339

Гипоцентр (см. Фокус землетрясения)

Глинка трения 43

Глубинный иней 305—306

Глыбовые лавы 105, 114

Горные породы, напластование 212, 241—242

- некомпетентные 278
- ненарушенные 209, 223
- трещиноватые 209, 213
- хрупкие 226

Грозы 336, 340, 359

Грунтовые воды 284, 383

Грунты, влажность грунтов 330

- внутреннее трение 224
- дилатансия 222
- испытание грунтов 223—229
- механика грунтов 77
- нормальное напряжение 225
- пористость 221
- поровое давление 220—222, 229—230
- проницаемость 281, 284

Грунты, прочность на сдвиг 220—221, 228

- разжижение 220, 231
  - разрушение 213
  - рыхлые 221
  - сжимаемость 221, 289
  - скальные 221
  - сцепление 224
  - тиксотропность 142, 219—220
  - уплотнение 281—282
  - эрозия 329, 337, 365, 379—380
  - эффективное напряжение 222, 225
- Грязевые потоки 73, 134—145, 279, 331, 336

- в горах Абсарока 143
- вулкана Бандай 141
- Безыманный 139
- Везувий 136
- Вильяррика 140, 145
- Галунгунг 138
- Ирасу 141, 142
- Кавах-Иджен 139
- Келуд 137—138, 144
- Котопахи 140, 145
- Лассен-Пик 139
- Майон 142
- Мауна-Лоа 142—143
- Мерапи 141, 145
- Мон-Пеле 145
- Руапеху 140
- Санта-Мария 141
- Шаста 139
- вулканические 108
- вызванные землетрясениями 143
- при ливнях 142
- отведение 143, 144
- предсказание 145
- скорость 136

Дамбы 354, 365—367, 370, 375

- в долине Ганга 356
  - в долинах китайских рек 354—355, 363—367
  - прорыв 355, 377—379
- Дилатансия 45, 48, 221
- Дремлющие вулканы 99

Желоба глубоководные 27

Защитные меры 394—396

- против вулканических извержений 128—131
- землетрясений 49
- лавин 310—312
- наводнений 347—354
- оползней 244—246

ПРЕДМЕТНЫЙ

УКАЗАТЕЛЬ

Защитные меры против оседания  
 грунта 285—286  
 — — — цунами 201, 202  
 Землетрясение в Агадире (1960 г.)  
 22, 57  
 — Алеутское (1946 г.) 140, 141  
 — Аляскинское (1912 г.) 20  
 — — (1934 г.) 20  
 — — (1937 г.) 20, 93  
 — — (бухта Литуйа, 1958 г.) 191  
 — — (Землетрясение страстной пят-  
 ницы, 1964 г.) 13, 29, 30, 187, 196,  
 198, 203, 212, 232, 256, 273  
 — в Анконе (1972 г.) 77, 80  
 — Ассамское (1897 г.) 66  
 — Атлантическое (1969 г.) 186  
 — Ашхабадское (1948 г.) 22  
 — Буллер (1929 г.) 58  
 — в Бухаресте (1977 г.) 22  
 — в Ганьсу (1920 г.) 256  
 — Дашти-Баяз (1968 г.) 39, 94  
 — Дикси-Валли (1954 г.) 40—41  
 — Импириал-Валли (1940 г.) 80  
 — Инангахуа (1968 г.) 57—59, 405  
 — Калифорнийское (1906 г.) 30, 34,  
 39, 64, 74, 94, 193  
 — в Китае 36—38  
 — в Колумбии и Эквадоре (1906 г.)  
 30  
 — Лиссабонское (1755 г.) 186, 193  
 — Лонг-Бич (1933 г.) 64  
 — в Манагуа (1972 г.) 22, 69—72,  
 82—83  
 — Мекеринг (1968 г.) 31  
 — в Монтане (1959 г.) 248  
 — Нингата (1964 г.) 48, 59—61, 232  
 — Нью-Мадрид (1811—1812 г.) 31, 39  
 — Оуэнс (1872 г.) 35  
 — Перуанское (1970 г.) 60—64, 212,  
 251, 313  
 — Сан-Фернандо (1971 г.) 40, 45, 64,  
 73, 80, 210, 218, 259  
 — Саньхэ (1679 г.) 36  
 — р. Св. Лаврентия (1663 г.) 32  
 — в Северной Италии (1976 г.) 22  
 — в Сиане (1556 г.) 37, 257  
 — Синтай (рой, 1966 г.) 37  
 — в Скопье (1963 г.) 22, 56  
 — Танго (Япония, 1927 г.) 59  
 — Токийское (Кванто, 1923 г.) 72, 74  
 — Тоттори (Япония, 1943) 59  
 — Форт-Техон (1857) 34  
 — Фукуи (1948) 59  
 — Хебген-Лейк (1959) 332  
 — в Хэбее (1976) 22, 36  
 — в районе Чарлстона 36  
 — Чилийское (1960) 54, 187

Землетрясение в Японии 22, 30  
 Землетрясения  
 — афтершоки 19, 66  
 — вызванные вулканическими взры-  
 вами 54  
 — гипоцентр (фокус) 27—29  
 — интенсивность 30  
 — искусственно вызванные 49, 51—53  
 — магнитуда 29—30, 48  
 — оползни 210, 220, 246—247  
 — предшествующие извержениям  
 вулканов 109, 165—166, 179—181  
 — причины 39—40, 228, 276  
 — продолжительность 77, 81—84  
 — расчетные 75, 84, 89—90, 243—244  
 — сейсмический момент 30  
 — сотрясения грунта 230  
 — статический коэффициент 240  
 — ускорение 77—80, 216, 240  
 — цунами 193, 205—206  
 — эквивалентная статическая сила  
 240  
 — энергия 29  
 — эпицентр 29  
 Земная кора, деформация 18—19, 39,  
 287  
 — — дилатансия 45  
 — — изостатическое выравнивание  
 274—275  
 — — как часть литосферы 31—32

Известняки, карст 278, 330—331  
 Изогеты 341—342  
 Изосейсты 26, 392—393  
 Изостазия 274  
 Интенсивность землетрясений 22, 30  
 — — шкала Меркалли 23, 47, 76, 91  
 — — японская шкала 25

Каверна (поглощающий колодец)  
 278, 299—300  
 Кавказско-Гималайский складчатый  
 пояс 27  
 Кальдеры Крейтер-Лейк 165  
 — формирование 112, 123  
 Карст 278, 330—331  
 Кислоты в вулканическом пепле и  
 газах 117, 160—163  
 Конечных элементов анализ 240  
 Контурная вспашка 347  
 Конусы выноса (аллювиальные ко-  
 нусы) 339  
 Космические снимки, спутники связи  
 203, 334—335, 345, 359  
 Крип (ползучесть) грунта 211, 214,  
 232, 244  
 — снега 308

## Лава аа 104—105

- глыбовая 105
- пахоэхоэ 104

## Лавины, анализ 308—312

- влажные 305, 309
- воздействие на лавины 155, 310, 313
- классификация 208, 303, 305, 308
- лотковые 307
- магнитуда массы 307
- механика 303
- морфология 305
- обнаружение опасности 309
- осывы 307
- палящие (см. Палящие лавины)
- скорость 308
- спусковой механизм 312
- сухие 305, 309
- Карпаты 314
- Кэмп-Ледюк (Канада, 1965) 313
- Нангапарбат (1937) 301
- Уаскаран (Анды, 1962, 1970) 312—313
- Япония 308

## Лавовый поток 104, 121

- — заграждения 131, 155—156
  - — лавовые трубы, обрушение 299
  - — обливание лавы водой 134
  - — скорость 105
  - — способы воздействия 128—129
  - — типы 104—106
  - — толщина 105
- ## Лавовые потоки Везувия 121—123
- — Исландии 126
  - — Килауэа 121, 125—126, 134
  - — Колумбии 126—127
  - — Мауна-Лоа 121, 125, 129—133
  - — Парикутина 125
  - — Хеймаз 126, 134
  - — Этны 123—125

## Лагунные отложения (илы) 73, 85

## Лахары 108

## Ледники, влияние на земную кору 274

- прорывы ледниковых вод (йё-кудльхлауп) 145—146, 328

## Лесная болезнь 118

## Лёсс 37, 93, 256, 278—279, 365—366

## Литосфера 14, 27—28

- плиты 27, 39, 71, 275

## Магма 100

- вязкость 106—108
- газ 100—101
- состав 108—109

## Магнитное поле Земли 177

## Магнитуда землетрясений 29—30, 48

- лавин 307

- цунами 193—194

## Мареографы 85, 194, 197, 204

## Мейзойсейсмическая (плейстосейстовая) зона 13

## Мертен, формация (отложения грязевых потоков) 143

## Минойская цивилизация 171

## Моделирование землетрясений с помощью ЭВМ 391—394

## Монтмориллонитовые глины 280

## Мофетты в горах Абсарока 161

## Муссоны 326

## Мутьевые (турбидитовые) потоки 212, 258—259

## Наводнение, борьба с ним 324, 347—354, 364, 368

- влияние геологических факторов 329—332

- внезапное 279, 372

- вызванное ледяными заторами 328

- — таянием снегов 328, 343

- — дождевое речное 324, 326

- — нагонное (на морском побережье) 327

- — повторяемость 347—348

- — предсказание 359—361

- — страхование 319, 400—402

- — сплошное 324

- — ущерб 322—333, 371

## Наводнения в Австралии 315—319

- в Англии 327, 370

- в Голландии 369—371

- в Италии 319—321

- в Калифорнии 341, 373, 403

- в Китае 321, 326, 339, 354, 363—367

- разливы Нила 321, 327, 361—363

- на р. Миссисипи (1973 г.) 361, 367—368

- в центральных районах США 327, 368

## Наклон зданий: базилика Гваделупы (Мехико) 293

- — Пизанская башня 291—292

## Наклономеры 178

## Накопление деформаций 180

## Напластование 212, 238, 241, 266

## Напряжение касательное 219, 225, 259

- — полное нормальное 225, 276, 283

- — эффективное 222, 225, 231, 276, 283

## Некомпетентные горные породы 278

Обвалы 215, 251—253  
 — в Андах 251  
 — в Новой Зеландии 210  
 — в горах Тертл (1903 г.) 215, 252  
 — в горах Эльм (1881 г.) 215, 252  
 Оледенение 234, 272, 274, 289  
 Оползень, классификация 208—211, 215  
 — анализ склона 234—239  
 — воздействие на развитие оползня 245—246  
 — механизм 212—215, 250, 257—258  
 — обнаружение оползневой опасности 77, 217, 241—246  
 — оползневые запруды 332  
 — — уступы 217—218  
 — подводный 187, 212, 258—259  
 — подножие откоса 210, 214, 261  
 — скорость 209  
 Оползни в Англии 253, 261—262, 263  
 — Анкоридж (1964 г.) 13—14, 232, 255—256  
 — Гонконг 208  
 — в Италии 269  
 — в Калифорнии 210, 219, 230, 232, 242, 250, 259, 264—268  
 — каньон р. Мадисон (1959 г.) 248, 332  
 — в Квебеке 260  
 — в Китае 255, 257—258  
 — кратер Циолковского 250  
 — в Новой Зеландии 210  
 — Ньюфаундленд 258—259  
 — Саидмарре 251  
 — р. Св. Лаврентия 260  
 — Сурте (1950 г.) 261  
 — Усой (Памир) 246—248  
 — в Швеции 261  
 — Шерман-Глейшер 248, 250  
 — Шеттер-Пик 248  
 — Эксмут (1839 г.) 261—262  
 — Юнгай (Перу) 63, 251, 312—313, 329  
 — в Японии 232  
 Опускание поверхности (осадка) грунта  
 — — Болдуин-Хилс 298—299  
 — — Бостон (США) 293  
 — — Братское море 290  
 — — Венеция 294—296  
 — — оз. Вольта 290  
 — — Лонг-Бич 297—298  
 — — Мехико 293  
 — — Нингата 48, 299  
 — — Сан-Хоакин 296—297  
 — — Чикаго 293  
 — — Шанхай 296

Осадка грунта, анализ 280  
 — — классификация 272  
 — — ледниковые котлы 300  
 — — меры воздействия 284  
 — — механизм 275—277  
 — — обнаружение 285—287  
 — — размеры 273—274  
 — — результат удаления подземных вод и добычи полезных ископаемых 277, 283, 293  
 — — эффект 272  
 Очаг землетрясения 27—29, 93

Палящие лавины 106, 119, 146, 156—157  
 — — вулкана Ареналь 155  
 — — — Безымянный 166  
 — — — Исалько 154  
 — — — Ламингтон 154—155  
 — — — Майон 155  
 — — — Мерапи 154, 156  
 — — — Мон-Пеле 147, 149—153  
 — — — Суфриер 147—149, 154  
 — — — Фуэго 154  
 — — — Хибокхибок 154  
 Пассаты 333  
 Пахоэхоэ, лавы типа пахоэхоэ 104  
 Пемза 103  
 Пепловые потоки 106, 157—159  
 — — Армения 159  
 — — вулкана Асо 158  
 — — — Безымянный 158  
 — — — Катмай 158  
 — — — Мезама 158  
 — — Номлаки (Калифорния) 159  
 — — Риолитовое плато (Новая Зеландия) 158  
 — — Суматра 159  
 Перекристаллизация снега 306  
 — — глубинный иней 306  
 Периодичность вулканических извержений 176  
 — землетрясений 48  
 Пески плотные 226  
 — разжижение песков 220  
 — рыхлые 228  
 Пирокластический материал 103  
 Планирование землепользования 388  
 Плейстоценовая (мейзосейсмическая) зона 13  
 Плинианские извержения 163  
 Плоскостей скольжения метод 238  
 Плотина земляная 53, 239, 247, 259—260, 349  
 — оползневая (запруды) 247—248, 313  
 — Асуанская 363

- Плотина Болдуин-Хилс 328, 379—380
- Вайонт 190, 245, 269, 329
  - Ван-Норман 74
  - Гувер 51, 275
  - Мальпассе 328
  - Оровилл 53
  - Сан-Фернандо 74, 232, 259
  - Сан-Хоакин 51—53, 353
  - Сент-Франсис 328
  - Синьфын 55
  - Сомерсет 318
  - Шаста 350—351, 361
- Плывунные глины 230, 260—261
- Поверхностные волны 28
- Повторяемость 387
- Поднятие земной коры 274, 289
- Пожары при землетрясениях 74, 92
- Поймы 321, 324, 357—358
- Польдеры 369—370
- Поперечные волны 28, 77
- Поровое давление 46, 220—226, 245, 253, 277
- Преимущество немедленных мер 394
- Природный пар 382
- Приоритет главной опасности 396
- Прогноз вулканических извержений 54, 100, 175—183
- выпадения вулканического пепла 114
  - землетрясений 31, 46—49, 60, 179
  - ледниковых прорывов 146
  - наводнений 359—361
  - оползней 244
  - погоды 335
  - снежных лавин 309, 313—314
  - цунами 198—203
  - штормов 334—336
- Продолжительность сильных колебаний 77, 81—84
- Продольные волны 28
- Промерзание грунта 279
- Проницаемость грунта 281—284
- Просадочные грунты 279
- Прочность грунтов на сдвиг 216, 219—227, 228
- — «липкое трение» 228—229
  - — неустойчивость 228, 260—261
  - — хрупкое поведение 229
- Разжижение грунта** 60—61, 73, 77, 85—87, 219—220, 257, 280, 306
- Разрыв тектонический 20, 40—41, 47, 58, 71, 73, 75, 91, 391
- Анатолийский 94
  - Боконо 39
  - Денали 92
- Разрыв Доннелли-Дом 92
- Инангахуа 58
  - Калаверас 44
  - Клируотер-Лейк 92
  - Макгиннис-Глейшер 92
  - Мелонес 44
  - Мертвого моря 22, 44
  - Ньюарк 44
  - Паттон-Бей 43
  - Ротокоху 58
  - Сан-Андреас 34, 43, 48, 73, 77, 89
  - Хейвард 43
- Речной бассейн 344—346, 367—368
- Руслу водотоков 336—340
- Связность (сцепление) грунта** 223
- снежного покрова 306
- Сейсмическая безопасность 388—389
- энергия 27—29
- Сейсмические волны 28—29, 77, 91
- станции 21, 27, 50, 197
- Сейсмический момент 30
- риск 32, 81—82
- Сейсмичность 22, 48, 287
- Сейсмограммы синтетические 85
- Сейсмографы 27, 30, 181
- Сейсмостойкое строительство 57, 87, 388—389
- Сейши 72, 190—191, 193, 196
- Сильные колебания грунта 46, 218, 219, 242
- Синоптические данные 341
- Склоны, анализ 213—214, 234—239, 245
- бесконечные 235
  - конечные 237
  - коэффициент устойчивости 234
  - устойчивость 217—218, 241, 243
- Сколы 306
- Слабые землетрясения 51, 391
- Сложные вулканы 163
- Снеготаяние 327—328, 343—344
- Снежный покров в Калифорнии 344
- — критическая глубина 302—306
  - — механические свойства снега 302
  - — плотность 303, 307, 309
  - — ползучесть 308
  - — прочность на сдвиг 302, 309
  - — скорость снеготаяния 343—344
  - — «снежная подушка» 345
  - — снегомерная рейка 345
  - — сцепление 302, 306
  - — температура 302, 308
  - — угол внутреннего трения 302
- Сольфатары 160

Сотрясения сейсмические 73, 91  
Срединно-океанические хребты 27, 193  
Срыв 214, 232—233, 237, 302  
Сток 336, 339—340, 347—348

Страхование от вулканических извержений 400—401

— жизни 346, 385  
— от землетрясений 66, 402—405  
— от наводнений 319, 400—402  
— от оползней 405  
Субдукция 27

Тайфуны (см. Циклоны)

Тектонические плиты 14, 27—28, 39, 71, 275

Теллурические токи 178

Терриконы 253—255

Тефра 103, 109, 119

Тискотропность 142

Торнадо 375

Тосканская формация 143

Трещины растяжения 278—279

Укрепление грунтов 244—246, 256

Уплотнение грунта 281—282, 285

Упругой отдачи теория 34, 39—40

Ураган «Агнеса» (1972 г.) 342—343, 374—375, 402

— «Карла» (1961 г.) 327

Ураганы на Тайване и Филиппинах 326

Ускорение сейсмических колебаний 66, 70, 77—81, 88

Условная продолжительность землетрясения 84

Фокус землетрясения 19, 27—28, 40

Францисканская формация 332

Фронт атмосферный 335

Фумаролы 160, 176—177

Циклоны (ураганы, тайфуны) 315—318, 326, 359

Цунами 17, 60, 74, 92, 186—190, 327

Цунами магнитуа 193—194

— оценка опасности 384

— причины 187, 193

— системы предупреждения о цунами 202—203, 206

— скорость 187

— энергия 194

— описание, Аляска (1964 г.) 17, 187, 196, 198—201

— Атлантика (1755 г.) 186

— Восточная Атлантика (1969 г.) 186

— Гавайские острова 202, 204

— Камчатка 202

— Кракатау (1883 г.) 187

— Литуя (1958 г.) 187, 191

— Санторин 170—171

— Сан-Франциско 194, 196

— Тааль (1965 г.) 190

— Черное море 190

— Чилийское землетрясение (1960 г.) 205

— Япония 187

Штормовые ливни (муссоны) 331, 373

— — Индия и Китай 326

— — интенсивность 342

— — количество осадков 342

— — подземный ливневый поток 330

— — продолжительность 342

— — США 324—325

— — тропический шторм «Норма» 374

— — Филиппины 326

Эксплозивность вулканических извержений 101—103

Эрозия (размыв) 205, 210, 214, 216, 264, 329—330, 337, 363, 380

Эффузивные извержения (излияния) 103

Ядерные испытания, подземные 49—50, 187



# Указатель географических названий

- Аберван 252—254  
Абиссинское нагорье 327  
Абсарака, хребет 143, 161  
Авасима, остров 59  
Агадир 22, 57, 412  
Адамс, гора 165, 401  
Адриатическое море 375, 376  
Азорские острова 102, 186, 193  
Айдахо, штат 165, 325, 328, 342, 374, 401  
Алабама, штат 325  
Аламеда 196  
Алеппо (Халеб) 411  
Алеутские острова 20, 21, 31, 187, 188, 193, 273, 418, 421  
Алеутский хребет 15, 19  
Алманор, озеро 144  
Альберта, провинция 164, 165, 215, 252  
Альпы, горы 301  
Альтурас 144, 401  
Аляска, залив 15, 17  
Аляска, штат 13, 17—21, 29—32, 43, 54, 91, 92, 112, 113, 187, 191—193, 196—203, 212, 232, 248, 249, 255, 273, 301, 323, 368, 400, 411, 412, 415, 418, 421  
Аляскинский хребет 19  
Амазонка, река 345, 357  
Амчитка, остров 187  
Анафи, остров 170  
Ангауан 117  
Андрус-Брэннан, остров 377, 378  
Анды, горы 27, 54, 61, 108, 205, 251, 301, 312, 332, 357, 421  
Анкана 77, 80  
Анкоридж 13, 17, 19, 114, 200, 255—257, 420  
Апеннины, горы 319  
Аппер-Кламат, озеро 166  
Ареналь, вулкан 100, 104, 114, 155, 181  
Аризона, штат 275, 290, 336, 373, 374, 423  
Арика 188  
Арканзас, река 323, 326  
Арканзас, штат 369  
Арктика 91, 300  
Арно, река 319, 376, 422  
Асама, вулкан 177, 178, 180  
Асо, вулкан 158, 176, 177  
Ассам, штат 66, 411  
Асуанская плотина 363  
Атбара, река 363  
Атрио-дель-Кавалло, горы 122  
Ашхабад 22  
Багно 326  
Байкал, озеро 14  
Бали, остров 167, 168  
Балтийское море 274  
Бандай, вулкан 141  
Банка, остров 168  
Безымянный вулкан 100, 139, 158, 165, 167, 180  
Бейкер, вулкан 165, 401  
Бейкерсфилд 353, 419  
Беллуно 422  
Белый Нил, река 362, 363  
Бемстер, озеро 370  
Бенишия 196  
Бенмор, водохранилище 52  
Беринга, ледник 15  
Беркли 10, 197, 199, 200, 203  
Бермудские острова 35  
Биг-Пайн 35  
Биг-Хорн, река 368  
Бикини, атолл 187

Блэк-Хок, горы 372  
 Болдуин, водохранилище 213  
 Болдуин-Хилс 298, 299, 328  
 Большая Ньюфаундлендская банка 417  
 Большая Фатра, горы 314  
 Большое Соленое озеро 275, 290, 417  
 Большой Бассейн 323  
 Бонневиль, озеро 275, 289, 290  
 Боскотрекасе 110, 122, 123  
 Бостон 32, 36, 293, 413  
 Бохайвань, залив 339  
 Братислава 304, 310, 311  
 Братское водохранилище 290  
 Брахмапутра, река 326  
 Брисбен 316—318, 423  
 Брисбен, река 316, 318  
 Британская Колумбия, провинция 164, 165, 313, 328, 421  
 Бруно, река 342  
 Бухарест 22  
 Буэна-Виста, озеро 353  
 Бьюэрин, полуостров 417  
  
 Ванмеа 204  
 Ваннаку 188  
 Вайоминг, штат 161, 165  
 Вайонт, плотина 190, 245, 269, 329, 422  
 Валдиз 15, 17, 91, 92, 187  
 Валле-дель-Бове, долина 123, 124  
 Валибу, река 148  
 Валлийские горы 253  
 Валхерен, остров 371  
 Ванкувер 401  
 Ванкувер, остров 161, 374  
 Ван-Норман, водохранилище 68, 69, 74  
 Вардар, река 56, 57  
 Вашингтон 375, 401, 422  
 Вашингтон, штат 35, 78, 126, 140, 141, 144, 165, 326, 342, 420  
 Везувий, вулкан 100, 109—112, 114, 121—123, 125, 136, 147, 163, 176, 179  
 Великая Китайская равнина 37, 363  
 Великие озера 32, 322  
 Веллингтон 140, 405  
 Венецианская лагуна 376, 399  
 Венеция 276, 293, 295, 296, 327, 375—377, 398, 399  
 Вернон 79, 81  
 Вестманнаэйр 115, 116, 126, 131, 134, 135, 161  
 Вестманнаэйр, острова 115  
 Вильямс 144  
 Вильяррика, вулкан 140, 145

Виргинские острова 323  
 Виргиния, штат 326, 415, 423  
 Вогорно, водохранилище 52  
 Вольта, озеро 290  
 Врангеля, хребт 15  
 Вуди, остров 201

Гавайи, остров 55, 101, 102, 121, 127, 128, 174, 176, 181, 188—190, 203, 205  
 Гавайские острова 11, 105, 108, 125, 133, 171, 173, 179, 188, 193, 196—201, 203, 204, 323, 327, 368, 418  
 Гаити, остров 422  
 Галунгунг, вулкан 138  
 Ганг, река 326, 356  
 Ганьсу, провинция 255—257, 412  
 Гаррисберг 342  
 Гекла, вулкан 117, 143, 161, 172  
 Геркуланум, развалины 109—111, 136  
 Гималаи, горы 37, 39, 172, 301, 356  
 Гиндукуш, горы 39  
 Глейшер-Пик, горы 165  
 Гоби, пустыня 366  
 Голубой Нил, река 327, 362, 363  
 Гонконг 38, 198, 199, 208  
 Гонолулу 198—201, 203—205  
 Горда, хребт 34  
 Гота, река 261  
 Гран-Валь, водохранилище 52  
 Граус-Хилл, горы 164  
 Гримсвельт, вулкан 146  
 Гуам, остров 199  
 Гуандун, провинция 37  
 Гуанчжоу 38, 55  
 Гувер, плотина 275  
 Гуджарат, штат 423  
 Гудзон, река 325

Дайамонд, озеро 166  
 Данан, остров 168  
 Дарвин 315  
 Дашти-Баяз 39, 94  
 Девон 261, 262  
 Делавэр, река 325  
 Делавэр, штат 327  
 Денвер 49  
 Джемона 22  
 Джефферсон, гора 165, 401  
 Джордж, озеро 417  
 Джорджия, штат 342, 374  
 Джорджтаун 148  
 Дикси-Валли 40, 41, 419  
 Долина Десяти Тысяч Дымов 112, 158  
 Дон-Педро, водохранилище 353

Ждьяр 314  
 Желтое море 339, 421  
 Женевское озеро 191  
  
 Замбези, река 51  
 Западная Австралия, штат 31, 315  
 Западная Виргиния, штат 255, 325  
 Зейдерзе, залив 290, 370  
 Зеландия, провинция 370—372  
 Зимины вулкан 139  
 Золотые Ворота, пролив 34, 85, 194, 196  
  
 Идзу, острова 421  
 Изабелла, водохранилище 353  
 Икике 188  
 Ил, река 347, 348  
 Илинойс, штат 35, 36, 293, 368, 416  
 Импириал-Валли, долина 80, 416, 417  
 Инангахуа 57, 58, 210, 405  
 Инд, река 321, 423  
 Иньчуань 38  
 Иокогама 72  
 Иос, остров 170  
 Ипсуич 316  
 Иравади, река 366  
 Ирасу, вулкан 114, 117, 141, 142, 160  
 Ирландия 186  
 Исалько, вулкан 147, 154  
 Исландия 103, 115, 116, 120, 126, 135, 143, 145, 146, 171, 172, 421  
 Ист-Форк, река 342  
  
 Йеллоустон, река 368  
 Йеллоустонский национальный парк 143  
  
 Кавах-Иджен, вулкан 139  
 Кавиа, река 344, 353  
 Кавказ, горы 411  
 Кадык 15, 112, 113, 197, 199—201  
 Кадык, остров 19—21, 114, 415  
 Каза-Бьянка 122  
 Каир 361, 363  
 Каймени, вулкан 170  
 Кайфын 38, 366  
 Калабрия, область 411  
 Калаверас, река 353  
 Калимантан, остров 168  
 Калифорнийский залив 34  
 Калифорния, штат 11, 23, 26, 30, 31, 34—36, 39, 40, 43, 44, 48, 51, 64, 65, 68, 69, 73, 74, 78—80, 85, 87—89, 93, 94, 139, 143, 144, 159, 165, 188, 196, 197, 200, 201, 209, 210, 213, 218, 219, 230, 232, 242, 250, 259, 260,

264—266, 268, 279, 287, 288, 293, 296—299, 323, 325, 327, 332, 335—338, 340, 341, 343, 344, 347—356, 361, 362, 373, 374, 379, 382—393, 396, 397, 400—403, 411—423  
 Калькутта 411  
 Камишак, залив 15  
 Камчатка, полуостров 139, 158, 165, 177, 188, 190, 202, 421  
 Кандия, море 170  
 Канзас, река 325, 327  
 Капелиньош, вулкан 102, 119  
 Кариба, водохранилище 51, 52, 275, 290  
 Карпаты, горы 310, 314  
 Карпентария, залив 315  
 Касабланка 187  
 Каскадные горы 108, 144, 165, 173, 401, 421  
 Каспийское море 50, 190  
 Кастейик, плотина 79, 81  
 Катания 124, 125, 130, 132, 411  
 Катла, вулкан 146  
 Катмай, вулкан 112—114, 120, 158  
 Кач 411  
 Каяк, остров 15  
 Кванто 72  
 Квебек, провинция 32, 260, 414  
 Кветта 412  
 Квинсленд, штат 315—317, 319, 423  
 Кеймбридж 11, 413  
 Кейро 368, 369  
 Келуд, вулкан 137—139, 144, 172  
 Кенай, горы 15, 19  
 Кенай, полуостров 415  
 Кент 141, 263  
 Кентукки, штат 35, 325  
 Кермадек, острова 14, 421  
 Киклады, острова 169, 170  
 Килауэа, вулкан 55, 101, 103, 119, 121, 122, 125, 131, 132, 134, 174, 175, 178—182  
 Кингстаун 148  
 Кито 411  
 Клатат-Марш, болото 166  
 Клатат-Фолс 401  
 Клондайк, река 21  
 Ключевская Сопка, вулкан 139  
 Койна, водохранилище 51, 52, 78  
 Кокос, острова 14  
 Колорадо, река 50, 323, 325  
 Колорадо, штат 49, 50  
 Колумбия, река 323, 325, 344, 354  
 Колуса, канал 356  
 Команче, водохранилище 353  
 Кордова 15, 160, 198

Корраль 205, 206  
 Косигуина, вулкан 71, 161  
 Котопахи, вулкан 140, 145  
 Кракатау, вулкан 120, 168, 169, 187, 188  
 Крейтер, озеро 137, 164—166, 401  
 Кремаста, водохранилище 51, 52  
 Кресент-Сити 26, 188, 197, 200—202, 327  
 Крит, остров 169—171, 188  
 Крым, полуостров 190  
 Куба 35, 375, 422, 423  
 Кука, залив 13, 15, 93  
 Куньлунь, горы 366  
 Куньмин 37, 38  
 Курильск 202  
 Курильские острова 31, 190, 421  
 Куробе, водохранилище 52

Лак-де-Пальмист, озеро 149, 151  
 Ла-Манш, пролив 187  
 Ламингтон, вулкан 100, 154  
 Ланг, остров 168, 169  
 Ланьчжоу 37, 38  
 Лассен-Пик, вулкан 139, 144, 166, 401  
 Легаспи 98  
 Лепенец, река 56  
 Лидже 412  
 Лима 62, 78  
 Лиссабон 186, 188, 193, 327, 410, 411, 422  
 Литуя, залив 191, 192, 419  
 Ломбок, остров 167, 168  
 Лонг-Бич 64, 79, 297, 298, 389, 417  
 Лонгвью 401  
 Лон-Пайн 35, 414  
 Лос-Анджелес 64, 67, 87, 88, 210, 230, 264—268, 298, 328, 337, 349, 358, 379, 380, 414  
 Луизиана, штат 193, 326, 415, 422, 423  
 Лусон, остров 190  
 Лхаса 38  
 Льянгануко, озеро 62  
 Льяо-Рок, горы 164  
 Ляонин, провинция 412

Мадисон, река 248, 332  
 Мадуро, остров 168  
 Майами 325  
 Майон, вулкан 98, 137, 142, 155  
 Македония 57  
 Мак-Локлин, гора 165, 401  
 Малая Азия, полуостров 410, 411, 421  
 Малые Антильские острова 98, 148  
 Мамбахао 154, 155

Манагуа 22, 23, 57, 69—72, 79, 82—84, 161, 412  
 Манагуа, озеро 70, 71, 161  
 Манам, вулкан 178  
 Манила 118, 199  
 Маракайбо, озеро 299  
 Марианские острова 421  
 Марри, залив 416  
 Мартиника, остров 98, 147, 149, 150, 394, 395  
 Масая, вулкан 147, 161  
 Массачусетс, залив 32  
 Массачусетс, штат 293, 411, 413  
 Мауи, остров 201  
 Маульин 205, 206  
 Мауна-Лоа, вулкан 54, 55, 121, 122, 125, 128, 129, 131, 132, 142, 174—176, 178, 180, 181  
 Мауна-Улу, вулкан 182  
 Маунтин-Сити 342  
 Маусиро 199  
 Мезама, вулкан 158, 164—168, 173, 401  
 Мекеринг 31  
 Меконг, река 366  
 Мексиканский залив 33, 193, 322, 323, 327, 336  
 Мендосино, мыс 34  
 Мерапи, вулкан 141, 145, 154, 156, 168, 173  
 Мертвое море 22, 44  
 Мертир, гора 253  
 Мессина 412  
 Местре 376  
 Мехико 293, 296  
 Мид, озеро 50, 51, 275, 290  
 Мидлтон, остров 15  
 Мидуэй, остров 198  
 Мизено, мыс 110  
 Милос, остров 170  
 Минданао 188  
 Миссисипи, река 31, 193, 322, 324—326, 328, 341, 354, 359, 361, 363, 367—369, 413, 423  
 Миссисипи, штат 369  
 Миссури, река 322, 325, 368, 411, 413, 415  
 Миссури, штат 31, 35, 369  
 Михара, вулкан 177, 179  
 Мичиган, штат 423  
 Мокелемне, река 353  
 Молокаи, остров 205  
 Мон-Пеле, вулкан 98, 143, 145, 147, 149, 150, 153, 154, 395  
 Монреаль 32, 413, 414  
 Монтагью, остров 20, 273

Монтана, штат 35, 165, 248, 332, 374,  
416, 419, 422, 417  
Монтэнар, водохранилище 52  
Москва 412  
Мохава, пустыня 242, 250  
Мохок, река 35  
Моча, остров 205  
Мурано 376, 377  
Мургаб, река 247  
Мэн, штат 414  
Мэрисвилл 144, 338

Накнек 113  
Нангапарбат, гора 301  
Наньнин 38  
Неаполитанский залив 109, 110, 121  
Неаполь 110, 179  
Невада, штат 26, 35, 40, 41, 50, 159,  
165, 275, 325, 342, 401, 416, 417, 419  
Низкие Татры, горы 314  
Нингата 48, 59—61, 232, 299  
Никарагуа, озеро 161  
Нил, река 321, 324, 327, 361—363  
Новая Гвинея, остров 154, 178, 421  
Новая Зеландия 21, 31, 39, 52, 57—  
59, 93, 118, 139, 140, 158, 173, 188,  
198, 210, 328, 382, 390, 404, 406,  
421  
Новая Шотландия, полуостров 413  
Новый Орлеан 368, 369  
Новый Южный Уэльс, штат 316, 390  
Нурек 52, 247  
Нью-Йорк 36, 327, 342, 343, 416  
Нью-Йорк, штат 374, 417  
Нью-Мадрид 31, 35, 36, 39, 411, 413  
Нью-Мексико, штат 336  
Нью-Хоган, водохранилище 353  
Нью-Экскечер, водохранилище 353

Оаху, остров 205  
Овайхи, река 342  
Огайо, река 325, 326, 340, 368, 369,  
423  
Огайо, штат 322, 325  
Озеллино, канал 376  
Окленд 140, 173  
Олимпия 78, 401  
Опихикао 127  
Орд-Ферри 351, 352  
Орегон, штат 26, 35, 127, 137, 144,  
158, 164—166, 211, 325, 326, 374, 401,  
403, 422  
Оровилл, водохранилище 63, 352  
Орора 416  
Осака, залив 187  
Оттава 32

Оуэнс, река 35  
Оуэнс-Валли 411, 413, 414

Павлова вулкан 21  
Пайн-Флат, водохранилище 353  
Пакоима 66, 79  
Палос-Вердес, полуостров 266  
Памир, горы 246—248, 251  
Парагвай, река 357  
Парана, река 357  
Парди, водохранилище 353  
Парикутин, вулкан 107, 115—117, 125,  
126  
Паркфилд 79, 81  
Пасадена 199, 200  
Патерно 130  
Пекин 36—38  
Пенна, водохранилище 319  
Пенсильвания, штат 325, 342, 343  
Перт 31  
Петропавловск-Камчатский 202  
Пиза 291, 292, 319  
Пикли 288  
Плимут 413  
По, река 31, 324, 343  
Пойнт-Арена 34, 88—90  
Пойнт-Рейс 39  
Помпеи, развалины 109—112, 122, 136  
Портленд 401  
Портьюгиз-Бенд, бухта 210, 266—268  
Похоики 127  
Принс-Вильям, залив 13, 15, 17, 19,  
20, 91, 273, 412, 420  
Провинция бассейнов и хребтов 35  
Пуйеуэ, вулкан 54  
Пулково 247  
Пурисима 34  
Пьюаллеп 141  
Пьюджет-Саунд, залив 35, 78, 140,  
141, 418, 420  
Пьяве, река 269

Раггет-Крест, горы 164  
Раката, вулкан 168, 169  
Раката-Кечил, остров 168, 169  
Ранраирка 62, 251, 313  
Рапид-Сити 326, 372, 373, 402, 423  
Рашен-Анкоридж 120  
Ред-Блафф 144, 351, 352, 401  
Редвуд-Шорс 26, 85, 86, 196  
Реддинг 144, 351, 352, 401  
Ред-Ривер 322, 323  
Рейн, река 253, 343  
Рейнир, вулкан 140, 141, 164, 165, 401  
Ривер-Бланш, река 149—154, 156  
Рим 412

- Рино 144, 401  
 Рио-де-Жанейро 422  
 Рифтон 58  
 Ричмонд 413  
 Роттердам 320  
 Руапеху, вулкан 140, 328  
 Рюкю, острова 421
- Саидмарре 251, 253  
 Сакраменто 35, 53, 144, 353, 401  
 Сакраменто, река 196, 350—353, 356, 357, 377  
 Саксес, водохранилище 353  
 Сакурадзима, вулкан 54  
 Самнер 141  
 Самоа, острова 198, 421  
 Сан-Бенито 34  
 Сан-Габриель, горы 65, 210, 219, 259  
 Санкт-Филипсланд 372  
 Сан-Луис, водохранилище 51  
 Сан-Пабло 414  
 Сан-Пабло, залив 196  
 Сан-Паулу 422  
 Сан-Педро, залив 266  
 Сан-Себастьяно 110, 123  
 Санта-Барбара 79, 188, 411, 414, 416, 418  
 Санта-Барбара, пролив 188  
 Санта-Клара, река 328  
 Санта-Мария, вулкан 141, 147  
 Санта-Моника 264, 265  
 Санта-Моника, залив 264, 266  
 Санта-Роза 94, 420  
 Санторин, вулкан 169, 170, 188  
 Сантьяго, вулкан 160, 162  
 Сан-Фернандо 30, 40, 45, 47, 64—68, 73, 74, 79, 80, 87, 210, 218, 219, 232, 260, 358, 402, 412, 420  
 Сан-Франциско 23, 30, 34, 64, 70, 74, 193, 194, 202, 412, 414, 416  
 Сан-Франциско, залив 43, 44, 73, 85—87, 91, 191, 194, 196, 203, 353, 377, 378, 392, 414, 419  
 Сан-Хоакин, долина 279, 287, 296, 297, 336, 353, 354  
 Сан-Хосе 94, 114, 414  
 Сан-Хуан 34, 117  
 Сан-Хуан-Капистрано 34, 413  
 Саньхэ 36  
 Саппоро 199  
 Сарез 247  
 Саскачеван, провинция 165  
 Святого Лаврентия река 32, 260, 410, 413, 418  
 Северная Дакога, штат 404, 422
- Северная Каролина, штат 325, 327, 342  
 Северное море 263, 370, 372  
 Северный остров 118, 158  
 Селдовия 112, 113  
 Сен-Пьер 98, 149—152, 156, 183, 394, 395  
 Сен-Винсент, остров 147, 148, 151, 155  
 Сент-Луис 369, 415  
 Сент-Франсис, плотина 325, 328  
 Сент-Хеленс, вулкан 165, 401  
 Сертунг, остров 168, 169  
 Сиань 37, 38, 257  
 Сидар, гора 417  
 Синано, река 60  
 Синьфын, водохранилище 52, 55  
 Ситка 199  
 Сицзян (Жемчужная), река 356  
 Сицилия, остров 124  
 Сиэтл 401, 420  
 Скалистые горы 313, 333  
 Скопье (Скопле) 22, 57, 412  
 Скотт, гора 164—166  
 Скоша 347, 348  
 Солт-Лейк-Сити 35  
 Сонора 415  
 Сорренто, полуостров 109  
 Спенсер, залив 31  
 Спенсер, мыс 161  
 Спер, вулкан 114  
 Спокан 401  
 Средиземное море 188, 363  
 Срединно-Атлантический хребет 14, 171  
 Стабии, древний город 109—111  
 Станисло, река 344, 353  
 Сугами, бухта 187  
 Суматра, остров 159, 168, 169, 187  
 Сумбава, остров 167, 168  
 Суртсэй, вулкан 103, 115, 119, 171  
 Суфрнер, вулкан 147, 148, 154, 157  
 Сухая Хапица, река 165, 167  
 Сьерра-Анча, горы 374  
 Сьерра-Невада, горы 35, 53, 143, 338, 340, 343, 353, 403
- Тааль, вулкан 118, 170  
 Таити, остров 197  
 Тайвань, остров 37, 197, 326  
 Тайпингоу, водохранилище 367  
 Тайханшань, хребет 37  
 Такома 141, 401  
 Таксон 199, 200  
 Талбинго, водохранилище 52  
 Таллахасси 342, 343  
 Таллок, водохранилище 353

Тамбора, вулкан 167, 168  
Танситаро, древний вулкан 116  
Таншань 22, 36, 38, 48, 412  
Татры, горы 314  
Тафт 78, 81  
Теннесси, штат 369  
Терминус, водохранилище 353  
Тертл, горы 215, 252  
Техас, штат 193, 323, 325, 336, 417, 423

Тибетское плато 37  
Тигр, река 321  
Тимор, остров 168  
Тира, остров 169—171  
Тирасия, остров 170  
Токио 72, 74, 197, 199, 407, 412  
Тонга, острова 14, 421  
Торранс 418  
Тоскана 319  
Тоттори 59  
Три-Риверс 32, 413  
Три-Систерс, горы 165, 401  
Туларе, озеро 353  
Туле, река 353  
Тяньцзинь 38

Уайт, река 141  
Уайт, остров 139  
Уаскаран, гора 61—63, 251, 312, 313, 329  
Увадзима 78  
Уизард, остров 165  
Уругвай, река 357  
Урумчи 38  
Усой 246, 247  
Усу, вулкан 178  
Ухань 366, 367  
Уэд-Фодда, водохранилище 52  
Уэлсвилл 342, 343  
Уэльс 253—255

Фаллон 419  
Фанди, залив 190  
Фарго 404  
Ферлатен, остров 168, 169  
Ферт-оф-Форт, залив 193  
Фетер, река 352, 354, 355  
Фиджи, острова 14, 198  
Филиппины 31, 98, 108, 118, 137, 154, 155, 188, 190, 198, 326, 421  
Флоренция 319, 320, 349, 376, 422  
Флорес, остров 168  
Флорида, штат 325, 326, 342, 343, 375, 423  
Фолсом, водохранилище 353

Форт-Техон 34, 44, 393, 411, 414  
Фрайнат, водохранилище 353  
Фресно 353  
Фриули 412  
Фудзияма, вулкан 172  
Фукуи 59, 412  
Фуцзянь, провинция 37  
Фуэго, вулкан 154  
Фэрбенкс 93

Хайленд-Парк 264, 266  
Хайчэн 38, 48  
Хантерс, мыс 196  
Ханькоу 38, 366  
Харбин 38  
Хартум 362  
Хебген, озеро 419  
Хеймаэй, остров 115, 116, 126, 134, 135  
Хельгафедль, гора 115, 116, 135  
Хибокхибок, вулкан 154, 155  
Хило 128, 129, 131, 132, 188, 196, 202, 203, 205  
Хило, залив 128  
Хилоа, озеро 70  
Хок, залив 405  
Холлистер 34, 43, 48  
Хонсю, остров 59, 188, 196  
Хот-Спринг 342  
Хошань, хребет 37  
Хуанхэ (Желтая), река 38, 321, 326, 339, 354, 356, 363, 365, 366  
Хубэй, провинция 367  
Хувер, водохранилище 51, 52  
Худ, вулкан 165, 401  
Хунань, провинция 37  
Хэбэй, провинция 36, 37  
Хэнань, провинция 365, 366

Цзинань 37, 38  
Цзянси, провинция 37  
Циньлин, хребет 37  
Цинциннати 413

Чанша 38  
Чарлстон 36, 387, 411, 415  
Черное море 190  
Чесапикский залив 413  
Чжили 410  
Чикаго 293, 415  
Чильтепе, полуостров 70  
Чильян 412  
Чимботе 60, 64  
Чиниак, мыс 201  
Чугач, острова 19  
Чунцин 366

Шанхай 38, 293, 296, 366, 398  
Шаста, гора 139, 144, 165, 350  
Шаста, озеро 351, 352, 361, 401  
Шемаха 411  
Шерман, остров 362  
Шерман-Глейшер 248, 249, 251, 252  
Шеттер-Пик, гора 248  
Шотландия 193, 299  
Шошони, река 368  
Шэньси, провинция 36, 257, 410  
Шэньян 38

Эльдафедль, вулкан 115, 116, 161  
Эльм, горы 215, 252  
Эль-Пасо 415  
Эль-Сентро 79—81  
Эрзинджан 412  
Эр-Рода, остров 361  
Эрткуэйк, озеро 332  
Этан-Сек, озеро 149—151  
Этна, вулкан 123—125, 130, 178

Юба, река 338  
Южная Голландия, провинция 370  
Южная Дакота, штат 326, 372, 373, 402, 415  
Южная Каролина, штат 36, 387, 411, 415  
Южно-Сахалинск 202  
Юкатан, полуостров 375  
Юнгай 62, 63, 251  
Юта, штат 35, 159, 165, 275, 289, 290, 417

Ява, остров 137—139, 141, 145, 154—156, 167—169, 173, 187, 188  
Язу, река 369  
Якима 401  
Якутат, залив 411, 415  
Ян-Майен, остров 421  
Янцзы, река 38, 326, 356, 363, 366, 367  
Ярбридж, река 342



# Оглавление

Предисловие к русскому изданию . . . . .	5
Предисловие ко второму изданию . . . . .	8
Предисловие к первому изданию . . . . .	9
Глава 1. Опасность землетрясений . . . . .	13
Глава 2. Опасность вулканических извержений . . . . .	97
Глава 3. Опасность цунами . . . . .	186
Глава 4. Опасность оползней . . . . .	207
Глава 5. Опасность оседания грунта . . . . .	271
Глава 6. Опасность снежных лавин . . . . .	301
Глава 7. Опасность наводнений . . . . .	315
Глава 8. Уменьшение ущерба от стихийных бедствий . . . . .	382
Приложения . . . . .	410
Предметный указатель . . . . .	425
Указатель географических названий . . . . .	432

ИБ № 1414

## ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТИХИИ

Б. А. Болт, У. Л. Хорн, Г. А. Макдоналд,  
Р. Ф. Скотт

Редактор В. С. Краснова  
Художник В. К. Бисенгалиев  
Художественный редактор В. К. Бисенгалиев  
Технический редактор Л. П. Чуркина  
Корректор А. Я. Шехтер

Сдано в набор 12/VIII 1977 г.  
Подписано к печати 28/XI 1977 г.  
Бумага тип. № 1 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>=13,75 бум. л.  
27,50 печ. л. Уч.-изд. л. 29,30. Изд. № 5/9301  
Цена 2 р. 80 к. Зак. № 729

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»  
Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени  
Ленинградская типография № 2  
имени Евгении Соколовой  
Союзполиграфпрома при Государственном  
комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии  
и книжной торговли. 198052, Ленинград, Л-52,  
Измайловский проспект, 29.







