

Тони
Уолтхэм

КАТАСТРОФЫ

Неистовая
ЗЕМЛЯ

Землетрясения
Вулканы
Оползни
Наводнения
Проседание
грунта
Подземные
аварии

Тони Уолтхэм

КАТАСТРОФЫ: неистовая Земля



CATASTROPHE:

the violent

Earth

**Tony
Waltham**

Macmillan
London Limited
1978

Тони
Уолтхэм

КАТАСТРОФЫ:
неистовая
Земля

* * *

Перевод с английского
Т. И. ВАСИЛЬЕВОЙ

Под редакцией
доктора геолого-минералогических наук
А. Н. ОЛЕЙНИКОВА

Ленинград
«Недра»
Ленинградское отделение
1982



3790

Уолтхэм Тони

У63 Катастрофы: неистовая Земля: Пер. с англ. — Л.: Недра, 1982. — 223 с., с ил., 2 л. ил. — Пер. изд.: Великобритания, 1978.

В популярной форме рассмотрена геология крупных катастроф: землетрясений, вулканических извержений, оползней, прорывов вод, провалов грунта и других опасных для людей явлений природы. Подробно описаны наиболее крупные катастрофы и их последствия. Автор раскрывает причины этих бедствий, как геологические, так и обусловленные деятельностью человека; описывает способы прогнозирования этих явлений; показывает, что можно предпринять для защиты от катастроф или для уменьшения причиняемых ими разрушений.

У 1904030000—347 77—82
043(01)—82

550

От редактора

Грозные извержения вулканов, разрушительные землетрясения, коварные оползни, неукротимая сила воды... С давних времен знакомо человечество с проявлениями этих могучих природных сил.

Чтобы предотвратить или хотя бы свести к минимуму трагические последствия стихийных бедствий, надо знать причины, их порождающие. Сделаны первые шаги и достигнуты первые успехи на этом пути.

Наряду со всеми благами, которые принес технический и научный прогресс, в мир вошла угроза новой опасности — нарушения природного равновесия. Человек вторгается в гармоничное существование планетарных оболочек — атмосферы, гидросферы и литосферы — и нередко нарушает ход протекающих в них естественных процессов. Недаром великий русский ученый В. И. Вернадский, подчеркивая огромное влияние человеческой деятельности на природу, назвал эту деятельность «новым геологическим фактором».

О связи природных катастроф с геологическими — естественными и антропогенными — причинами и рассказывает эта книга.

Ее автор доктор Энтони Клайв (Тони) Уолтхэм читает курс лекций по геологии студентам Трентского политехнического института в Ноттингемшире (Англия). Он немало путешествовал, принимал участие в ряде геологических экспедиций. Среди достаточно широких научных интересов Э. К. Уолтхэма видное место занимает исследование пещер. В 1970 г. он возглавлял экспедицию в пещеры Непала и Кашмира, в 1978 г. руководил спелеологической экспедицией Королевского географического общества, изучавшей пещеры Мулу на острове Борнео. Будучи прекрасным фотографом, Э. К. Уолтхэм часто иллюстрирует свои публикации собственными снимками. Перу Э. К. Уолтхэма принадлежат многие научные статьи и две книги: «Известняк и пещеры северо-западной Англии» и «Пещеры».

Предлагаемая вниманию читателя новая научно-популярная книга Э. К. Уолтхэма посвящена актуальной теме — взаимоотношениям человека и природы. Автором красочно описан ряд всемирно известных природных катастроф и их горестных последствий.

Если суммировать человеческие жертвы, упоминаемые в ходе повествования, их число достигнет 10 миллионов. Эта внушительная цифра наглядно показывает, насколько велика еще власть неуправляемых сил природы.

Автор раскрывает причины крупнейших катастроф и дает описание геологических условий, в которых возникают опасные для людей ситуации. Просто и общедоступно говорит он о том, что можно и необходимо сделать для предсказания стихийных бедствий и для предотвращения необратимых изменений, вызываемых непродуманной деятельностью человека. При этом он указывает также возможные пути защиты от многих, на первый взгляд неотвратимых, катастроф и способы, с помощью которых можно уменьшить причиняемые разрушения.

Круг вопросов, освещаемых в книге, весьма обширен: от планетарных процессов — движения блоков земной коры по разломам, динамики сейсмических поясов и связанных с ними проявлений вулканизма, землетрясений и цунами — до узколокальных событий, причины которых кроются в неудачной прокладке местной системы водоснабжения, неверно спроектированных горных выработках или непродуманной застройке территории. Камнепады, обвалы, наводнения, проседания и обрушения грунтов, опасные воздействия подземных вод, проблемы разработки месторождений полезных ископаемых и освоения участков со сложным геологическим строением — обо всем этом идет речь на страницах книги. Автор анализирует геологические факторы, явившиеся первопричиной больших и малых катастроф, оценивает нанесенный ущерб и дает рекомендации, как организовать контроль, чтобы предвидеть возможность возникновения опасности в будущем.

Прилагаемый к тексту тематический список специальной литературы, безусловно, представит интерес для читателя, который пожелает глубже познакомиться с материалом.

Книга Тони Уолтхэма дает наглядное представление о современном состоянии важнейших проблем — контроля природных явлений, прогноза стихийных бедствий и защиты от них. Она позволяет лучше понять подлинные причины природных катастроф, определить степень ответственности за них как человечества в целом, так и конкретных специалистов. Эта книга является полезным вкладом в благородное дело охраны окружающей среды.

А. Н. Олейников

Предисловие

Множество книг посвящено процессам, происходящим в недрах Земли. Десятки книг поведствуют о стихийных бедствиях, из уст в уста передаются рассказы об ужасных природных катастрофах. Зачем же написана эта книга? Ответ прост: чтобы восполнить имеющийся пробел, рассказать о связи природных катастроф с их геологическими причинами, показать влияние деятельности человека на, казалось бы, не зависящие от него явления природы.

Все четыре с половиной миллиарда людей, живущих на Земле, привыкли считать земную твердь чем-то прочным и надежным. Когда же она подводит нас, начиная сотрясаться, взрываться, оседать, ускользать из-под ног, мы чувствуем себя уязвимыми. Эти явления угрожают огромному числу людей, но вместе с тем смирение перед ними во многих случаях объясняется человеческим неразумием — противостоять им вполне возможно. Эта книга рассказывает о том, каким путем можно уменьшить вред таких природных бедствий, в доступной для неспециалиста форме описывает сопутствующие им геологические явления и тем самым предоставляет возможность негеологам лучше понять такой прекрасный, но подчас опасный мир, в котором мы живем.

Идея написать эту книгу возникла у меня при чтении курса лекций студентам факультета гражданского строительства Трентского политехнического института. Эти студенты не были геологами, но им следовало понять, как инженеры-геологи и строители могут либо усугубить последствия стихийных бедствий, либо, проявив надлежащую предусмотрительность, свести их к минимуму. Собирая материал для этих лекций, я понял, что такая книга необходима. Подробно изучая историю природных катастроф, я убедился, что об одних событиях имеется масса разнообразной информации, а о других — лишь туман не вполне достоверных сообщений. Сведя все собранные факты в книгу, не претендующей на академичность, я надеюсь, что она представит интерес для многих неспециалистов, а также будет полезной для студентов инженерно-геологических специальностей.

В ряде случаев, когда причиной описываемых катастроф были геологические условия, не удалось избежать введения в текст

специальных терминов. Поэтому в конце книги дается толковый геологический словарь.

Я старался выражать свои мысли простым языком и по мере возможности избегать профессионализмов. Эту книгу можно понять, не обращая ни к каким другим работам. Для тех же, кто хочет познакомиться с вопросом более детально, прилагается список основной специальной литературы.

Если эта книга поможет читателю лучше понять законы окружающей среды, стало быть, она написана не зря.

Тони Уолтхэм
Ноттингем, 1978 г.

Землетрясения

Около полудня 1 сентября 1923 г. пригородный поезд шел из Токио в Июогаму. Внезапно состав начал крениться то в одну, то в другую сторону, и произошла экстренная остановка. Выглянув из окон вагонов, пассажиры с ужасом увидели, как разрушается железнодорожное полотно и разверзается земля. С домов срывались черепица и даже целые крыши, а одно из четырехэтажных бетонных зданий вмиг превратилось в облако пыли. Это было землетрясение.

Глагол «трястись» абсолютно точно описывает происходящее с земной поверхностью: она вздымается, колеблется, вибрирует и даже раскалывается. Эти движения продолжаются несколько секунд, самое большее несколько минут, но тем не менее они могут повлечь за собой катастрофические последствия. Сила землетрясений бывает очень разной. Иногда это слабые колебания, которые беспокоят людей и раскачивают лампы, но не способны нанести какой-либо ущерб конструкциям зданий. Колебания могут быть даже настолько малыми, что их можно определить лишь при помощи приборов; подобные явления наблюдаются каждые несколько минут в различных частях земного шара.

Районы, где сотрясения земной коры особенно часты, называют поясами землетрясений. Один из крупнейших поясов протягивается по периметру Тихого океана, другой прослеживается через Центральную Азию до Средиземного моря. За пределами этих и других, меньших по размеру, поясов вероятность сильного землетрясения невелика. Великобританию, например, можно считать безопасным районом. Но в пределах самих поясов землетрясение может произойти практически в любой момент и в любом месте. Если подвергшийся его воздействию район — безлюдная пустыня или горная местность, последствия бывают незначительными. Даже сильное землетрясение на безлюдных просторах скорее всего останется лишь научным фактом, а в городском районе оно может повлечь за собой ужасающие разрушения. Токио, Лиссабон, Скопье (Скопле), Гватемала, Манагуа, Сан-Франциско и другие города были в свое время практически стерты землетрясениями с лица Земли.

Строго говоря, землетрясения представляют собой движения земной поверхности, вызванные воздействием ударных волн. Геологические силы, действующие в недрах Земли, настолько огромны, что могут, хотя и очень медленно, двигать целые континенты. При плавном движении постепенно нарастают напряжения в породах, образующих земную кору. Эти напряжения могут расти до тех пор, пока не превысят сопротивление самих пород; тогда пласты горных пород разрушаются и резко смещаются, а напряжение ослабевает. Смещение может составить всего лишь несколько десятков сантиметров, но энергия, выделяющаяся при перемещении миллиардов тонн породы даже на малое расстояние, огромна. Эту энергию и рассеивают ударные волны, вызывающие колебания земных слоев.

Но движение горных пород и ударные волны не являются единственными признаками землетрясений. Фактическое смещение породы, вызывающее землетрясение, редко можно наблюдать на земной поверхности. Обычно смещение полностью скрыто под землей, часто на глубине в несколько километров. В этом случае сотрясение земной поверхности влечет за собой множество последствий. В городских районах здания вибрируют настолько сильно, что распадаются на

части. При этом часто возникают пожары, так как разрушаются газовые магистрали и происходят короткие замыкания в электрических цепях. Если и водопроводная сеть оказывается поврежденной, город может сгореть, и предотвратить это почти невозможно.

Рыхлые осадочные горные породы при землетрясениях обычно оползают и оседают, в них появляются крупные трещины. В холмистой местности оползни, вызванные землетрясениями, в свою очередь могут привести к значительным разрушениям. В прибрежных районах опасность представляет еще одно последствие землетрясений — гигантские волны, известные под названием «цунами». Они могут пересекать моря и океаны, пронеситься над пострадавшими от землетрясения городами, все сокрушая на своем пути.

У юго-восточной оконечности острова Ямайка, где возвышаются Голубые горы, есть большая защищенная бухта. В нее вдается длинная песчаная коса Палисейдоус. За этой косой располагается прекрасная естественная гавань — Кингстон-Харбор, на берегу которой вырос город Кингстон — столица и главный порт Ямайки. Но порт не всегда находился в Кингстоне. Более ранним поселением был Порт-Ройал, который располагался как раз на конце косы Палисейдоус, протянувшейся на 13 км. Здесь была прекрасная гавань, значение которой особенно возросло в XVII веке. Порт-Ройал стал центром пиратского мира в Карибском море, его называли столицей Генри Моргана по имени знаменитого пирата. Хотя Порт-Ройал был построен на песке и гравии, там были два хорошо укрепленных форта, церковь, магазины и склады. Многие здания были деревянными и теснились на берегу гавани. Город был торговым центром огромного района, и жизнь там кипела.

Но всему этому пришел конец. Незадолго до полудня 7 июня 1692 г. на Порт-Ройал обрушилось землетрясение. По рассказам современников, вздымалась и «разбухала» земля, качались и разрушались дома, сначала зазвенели, а потом замолкли колокола церкви Святого Павла, поскольку обрушилась колокольня, превращались в груды обломков кирпичные здания. Огромные трещины разверзались и смыкались в земле; песок и гравий, на которых был построен город, погружались в море; две трети города скрылось под водой. В гавани вздымались огромные волны; многие корабли перевернулись, некоторые были выброшены на берег, и командам удалось спастись. Самая большая волна образовалась при отступлении моря из гавани, но вскоре, вернувшись назад, она с грохотом обрушилась на город и накрыла его в одно мгновение. За три минуты погибло 2000 человек, и Порт-Ройал исчез навсегда. Теперь на его месте расположена рыбацкая деревушка.

Фокус землетрясения в Порт-Ройале, т. е. источник, из которого исходили ударные волны, неизвестен. Возможно, он находился на расстоянии нескольких километров от города. Многие постройки разрушились из-за колебаний земной поверхности. Вследствие этих колебаний возникли также большие волны в гавани. Но главной причиной столь сильных разрушений в Порт-Ройале были слабые фундаменты. Песок и гравий на косе Палисейдоус — это рыхлые и неуплотненные образования. Кроме того, некоторые здания были построены на мелко заложеном фундаменте. В результате сильных колебаний грунта здания утратили устойчивость и просто опрокинулись в море. Огромные трещины, которые пересекали город и поглощали спасающихся бегством жителей, возникли в результате обрушения песка в море. Колебания такой песчаной отмели, как Палисейдоус, напоминают утрамбовку в банке сахарного песка: рыхлые частицы перемещаются вниз при малейшем уклоне. Результат землетрясения 1692 г. был именно таков: произошло массовое оползание песка, вследствие чего город скрылся под водами гавани. Если бы Порт-Ройал был построен на возвышенном каменном мысу, он, возможно, пострадал бы от землетрясения, но вряд ли был разрушен полностью.

Сейсмические волны и движения земной поверхности

Наибольшие разрушения при землетрясениях вызываются колебаниями земной поверхности под воздействием самих ударных волн. Различают четыре типа сейсмических волн, распространяющихся с разной скоростью; каждый из типов имеет свои характерные особенности. Прежде всего следует назвать два типа волн, которые очень быстро распространяются в горных породах. Это — первичные продольные сейсмические волны (*P*-волны), отражающие деформации сжатия (так сближаются, например, вагоны поезда при переводе стрелки), и вторичные поперечные сейсмические волны (*S*-волны), которые связаны с деформациями сдвига (как в закручивающейся скакалке). В большинстве случаев амплитуда обоих типов волн настолько мала, что они могут быть обнаружены только при помощи сейсмографов.

Скорость волн фактически зависит от типа породы, в которой они распространяются; обычно *P*-волны перемещаются со скоростью около 7,5 км/с, это в 2 раза быстрее скорости *S*-волн. Поэтому расстояние до источника, или фокуса, землетрясения может быть определено по разности во времени приема этих волн сейсмографами. С гораздо более низкой скоростью распространяются так называемые поверхностные волны. Они движутся примерно в 2 раза медленнее, чем *S*-волны, но отличаются наибольшей амплитудой. Поверхностные волны и вызывают самые сильные разрушения, сотрясая земную поверхность.

Хотя землетрясения часто описывают как мгновенные события, что вполне справедливо в масштабе геохронологической шкалы, они продолжаются в течение измеримого интервала времени. Обычно поверхностные движения не длятся и одной минуты: в 1906 г. в Сан-Франциско землетрясение продолжалось около 40 с. Однако продолжительность великого землетрясения на Аляске в 1964 г. была в 5 раз больше. Затем перечисленные типы волн затухают, а на смену им приходят афтершоки — дополнительные импульсы волнового движения, вызванные дальнейшими подвижками пород в точке первоначального нарушения их целостности или вблизи ее. Афтершоки могут продолжаться в течение многих дней; нередко они бывают достаточно сильными, но иногда настолько слабыми, что определяются только при помощи приборов. В течение суток после землетрясения на Аляске в 1964 г. было зарегистрировано 28 афтершоков, 10 из которых были достаточно ощутимыми. Из-за афтершоков очистительные работы после землетрясения становятся опасными и бесполезными.

Очевидцы землетрясений в своих рассказах обычно приукрашивают и преувеличивают их драматическую природу. В действительности сейсмические волны обычно ощущаются лишь как сильные, интенсивные движения земной поверхности. Тем не менее иногда наблюдаются земные волны в буквальном смысле

слова: волны движутся по земле, как по озеру. Некоторые рассказы об этом явлении можно считать вполне достоверными. При калифорнийском землетрясении 1906 г. в отдельных местах отмечались земные волны высотой до 1 м, было зафиксировано также распространение волн высотой около 30 см и длиной 18 м. Волны гораздо меньшей длины (2—3,5 м) наблюдались при землетрясении в долине Ганга (Индия) в 1934 г. В той же стране ассамское землетрясение 1897 г. вызвало волны, распространявшиеся со скоростью «быстрее ходьбы человека, но медленнее его бега».

Интенсивность землетрясения либо измеряется в баллах, либо выражается его магнитудой. Магнитуда землетрясения обычно измеряется по шкале Рихтера, названной так в честь ее создателя. Рихтер определил магнитуду как число, пропорциональное логарифму амплитуды (выраженной в микрометрах) наиболее крупной волны, зарегистрированной стандартным сейсмографом на расстоянии 100 км от эпицентра, т. е. от проекции на земную поверхность фокуса (или источника) землетрясения. Магнитуда может изменяться от 1 до 9. Если магнитуда равна, например, 5, то это значит, что энергия данного землетрясения в 10 раз превышает энергию, высвободившуюся при землетрясении, имеющем магнитуду 4.

Сила землетрясения в баллах отражает качественную меру его воздействия на любую конкретную точку. Она регистрируется по видоизмененной шкале Меркалли, деления которой основаны на оценке наблюдаемых движений тех или иных предметов и степени разрушения. Баллы отмечаются цифрами от I до XII (цифры римские, чтобы не было путаницы с магнитудой)*. С удалением от эпицентра сила землетрясения уменьшается. Сила VII баллов будет характерна для участка, прилегающего к эпицентру землетрясения, имеющего магнитуду 5. Такое землетрясение может повлечь за собой сильные разрушения зданий, но правильно сконструированные антисейсмические постройки должны выдерживать эти толчки. Крупными считаются землетрясения, магнитуды которых равны 5—6 и более; обширные разрушения соответствуют IX баллам. Самые сильные землетрясения, как, например, землетрясение 1906 г. в Сан-Франциско, магнитуда которого составляла 8,3, вызывают почти полные разрушения и оцениваются в XI—XII баллов.

Сейсмические волны, как и волны всех других типов, могут затухать или усиливаться либо даже резонировать в зависимости

* Существуют и другие сейсмические шкалы, по которым определяется сила землетрясений. Самая ранняя из них была разработана в 1564 г. итальянским картографом Я. Гастальди. На протяжении последнего столетия наиболее широкое применение получили 10-балльная шкала М. Росси и Ф. Фореля (1883 г.), а также упоминаемая автором 12-балльная шкала Д. Меркалли—А. Канкани—А. Зиберга (1912 г.). В нашей стране принята 12-балльная шкала, разработанная Институтом физики Земли Академии наук СССР; градации этой шкалы утверждены в качестве общегосударственного стандарта. — *Прим. ред.*

от того, через какие горные породы они проходят. Таким образом, разрушительная сила землетрясения зависит не только от его магнитуды, но и от местных геологических условий. Наиболее четкое различие в этом отношении наблюдается между коренными породами и неуплотненными осадками. Последние несколько не смягчают колебаний при землетрясении, и потому они наименее пригодны для заложения фундаментов.

Землетрясение 1967 г. в столице Венесуэлы Каракасе, имевшее магнитуду 6,5, не было особенно сильным, но оно разрушило четыре высотных здания, и число погибших составило 200 человек. Все эти здания стояли на аллювии; при усилении сейсмических колебаний рыхлые осадки утратили связность. Кроме того, частота волны в аллювии совпала с естественной частотой колебания зданий, и возникший резонанс полностью разрушил эти постройки. Явление иного порядка имело место во время гораздо более сильного землетрясения, потрясшего в 1952 г. южную Калифорнию. В зоне разрушений оказался Хрустальный грот, который осматривала в этот момент группа туристов. Люди ничего не почувствовали, поскольку их окружал плотный известняк.

Такие различия в геологическом строении имеют очень большое значение при изучении сейсмических зон, особенно при оценке разнообразных побочных эффектов, вызываемых колебаниями грунтов во время землетрясения.

Разломы и землетрясения

Уже давно замечено, что землетрясения тесно связаны с разломами. В начале нынешнего века была выдвинута гипотеза, согласно которой разломы являются следствием землетрясений. Она основывалась на непосредственном наблюдении сбросовых нарушений на поверхности Земли. Однако систематическое изучение более крупных и глубоко расположенных разломов показало, что справедлива как раз обратная зависимость. Во многих частях земной коры действуют ориентированные силы, вызывающие медленную упругую деформацию пород. Эти напряжения постепенно нарастают и в конце концов превышают тот предел, который породы могут выдержать. Пласты пород разрушаются, и происходит их смещение вдоль трещины, что продолжается до тех пор, пока напряжение значительно не уменьшится или не исчезнет совсем. Вследствие этих внезапных движений и выделения энергии возникают ударные волны, вызывающие землетрясение. Такое объяснение землетрясений получило название теории упругого восстановления. Афтершоки, сопровождающие землетрясение и обычно регистрируемые не там, где произошел главный толчок, вызваны переносом деформации на прилегающие массы горных пород. Каждое движение приводит к новым подвижкам, пока не прекратится действие сил, являющихся причиной деформации.

О медленном нарастании деформации в породах свидетельствует также постепенное движение блоков земной коры вдоль разломов, не зависящее от внезапных разрывов и землетрясений. Во время знаменитого землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско дно Тихого океана продвинулось примерно на 6 м к северу относительно Американского континента. Но в течение предыдущих 50 лет здесь уже осуществлялось перемещение безо всяких землетрясений, составившее в целом более половины этого расстояния. Движение все еще продолжается; здания и тротуары в Холлестере, расположенном в более южной части Калифорнии, фактически медленно расходятся в стороны.

На глубине около 5 км давление и температура настолько высоки, что породы не разрушаются, а подвергаются пластической деформации. Однако при просачивании воды трение вдоль трещин уменьшается и становятся возможными внезапные подвижки. Приток воды приводит к тому, что трещины в породе расширяются с увеличением напряжения. Это объяснение получило название теории источника расширения. Эта теория еще не совсем ясна в деталях, но не противоречит имеющимся сведениям о скорости распространения ударных волн; в ряде случаев она помогает дать ответ на некоторые из вопросов, возникающих у исследователей.

Вместе с тем многие мелкие разломы, располагающиеся близ дневной поверхности, особенно в слоях рыхлых осадков, действительно образовались в результате землетрясений. Они вызваны оседанием отложений под воздействием ударной волны. Такие разломы представляют собой исключения из общего правила, утверждающего, что большинство землетрясений является следствием образования разломов.

Обычно сбросовое движение при землетрясении полностью происходит на глубине, но иногда оно наблюдается и на поверхности. Землетрясение 1959 г. в Монтане (США) было вызвано разломом, образовавшим уступ длиной более 22 км и высотой более 4 м. Во время землетрясения 1964 г. на Аляске разлома видно не было, но съемка показала, что сместился участок суши и морского дна площадью около 260 км². Одна половина этого участка поднялась, а другая опустилась, причем максимальное общее относительное смещение составило 11,5 м. Утверждают, что во время землетрясения 1923 г. в Токио участки ложа залива Сагами смещались вверх и вниз на десятки метров, но этому трудно поверить; результаты подводной съемки могут быть подвергнуты сомнению. Самое значительное достоверное вертикальное смещение при землетрясении было зарегистрировано в 1899 г. в заливе Якутат на Аляске, когда некоторые участки береговой линии были подняты на 14,25 м.

Несомненно, распространение землетрясений по нашей планете должно быть связано с размещением разломов, особенно активных, характер распределения которых легко установить. Верхнюю часть земной коры средней мощностью 60 км составляют

около десятка огромных блоков — плит, которые сами по себе являются относительно устойчивыми. Однако эти плиты перемещаются, скользя по пластичным внутренним слоям Земли, находящимся в почти постоянном, очень медленном движении под воздействием конвекционных течений, поднимающихся из высокотемпературных глубин. Таким образом, границы между плитами являются геологически активными зонами. Одни плиты двигаются навстречу друг другу и иногда даже перекрываются, другие расходятся в стороны, третьи скользят вдоль границ в противоположных направлениях. Каждый тип этих движений порождает определенные типы разломов, и все они вызывают землетрясения. В отличие от подвижных пограничных зон, сами плиты устойчивы, в их пределах крупных глубинных землетрясений обычно не бывает. Среди редких исключений можно назвать землетрясение 1811 г. в Нью-Мадриде, произошедшее в зоне устойчивой плиты на востоке США.

Две трети крупнейших землетрясений в мире приходится на Тихоокеанский пояс. Эта наиболее активная из сейсмических зон протягивается вдоль границ нескольких плит, и для живущих здесь людей землетрясения относятся к вполне привычным явлениям. Второй огромный сейсмический пояс прослеживается вдоль границ плит от Ост-Индии *, вдоль Гималаев и далее в Средиземноморье. Хотя общее число землетрясений в этом поясе меньше, чем в Тихоокеанском, но за 20 лет (1950—1970 гг.) 75 % жертв землетрясений во всем мире приходилось на этот пояс, что объясняется высокой плотностью населения.

Землетрясения наносят огромный ущерб Японии, расположенной вблизи границ трех крупных плит. Первого сентября 1923 г. было зарегистрировано землетрясение силой 8,3 балла с эпицентром в заливе Сагами. Оно вызвало значительные разрушения в Токио и Иокогаме, но еще больший ущерб причинили начавшиеся во время землетрясения пожары. Водопроводы были повреждены и бездействовали, пламя бушевало беспрепятственно и поглотило множество деревянных построек. Более половины Токио и практически вся Иокогама были сожжены дотла. Число жертв было ужасающим: 40 000 человек собрались в городском парке, спасаясь бегством из горящих жилищ, и лишь 2 000 из них остались в живых, остальные задохнулись в дыму. В результате одного этого землетрясения погибло 142 800 человек. Это было самое сильное землетрясение, когда-либо случившееся в Японии.

Плиты Тихоокеанского сейсмического пояса продолжают двигаться. В последние годы в Японии не было катастрофических землетрясений, но они продолжают уносить человеческие жизни в других районах, лежащих в пределах этого пояса: Перу —

* Малайский архипелаг.



Основные плиты, слагающие земную кору. Границы плит совпадают с поясами неустойчивости, для которых характерны землетрясения и вулканическая деятельность.

1970 г., Калифорния — 1971 г., Никарагуа — 1973 г., Филиппины — 1976 г. Пояс Гималаи — Средиземноморье также остается активным, наиболее сильное землетрясение было зарегистрировано в Турции.

Турция занимает большую территорию в пределах сейсмического пояса Гималаи — Средиземноморье. Эта страна подвергалась землетрясениям на протяжении всей своей истории. В 1939 г. во время землетрясения, магнитуда которого достигала 7,9, в городе Эрзинджан погибло 40 000 человек. С тех пор в Турции произошло 20 землетрясений, унесших еще 20 000 человеческих жизней. Последнее из землетрясений, магнитуда которого составляла 7,6, фактически смело с лица Земли город Мурадие близ озера Ван. Кроме того, были почти полностью разрушены десятки деревень. Число жертв превысило 4 000, спасательные работы были затруднены из-за многочисленных афтершоков. Отдаленность этого района и минусовые температуры усугубили бедственное положение тысяч деревенских жителей, оставшихся без крова.

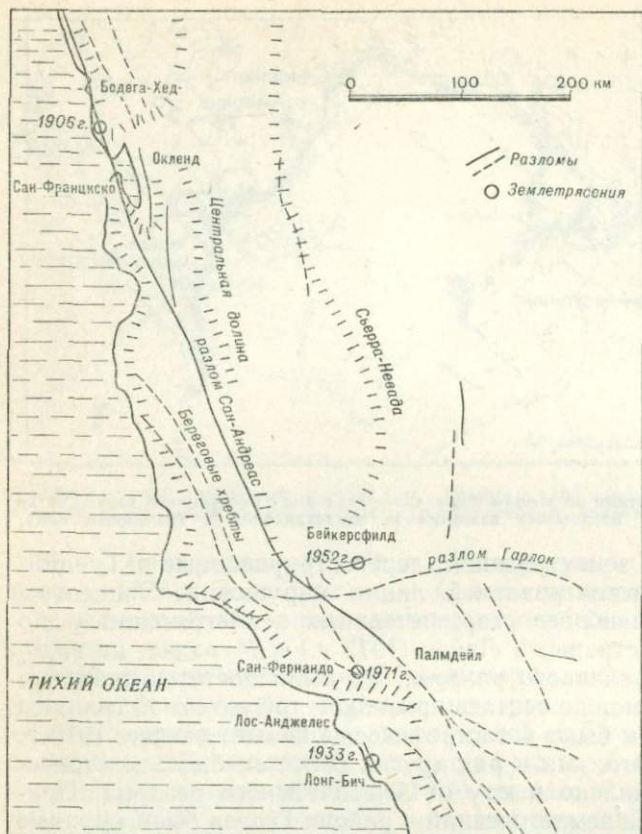
Распределение землетрясений в Турции носит совершенно четкий характер. Половина наиболее сильных землетрясений приурочена к протягивающейся с востока на запад кривой линии, которая повторяет зону Анатолийского разлома. Эта зона крупных трещин представляет собой границу между огромной, располагающейся на севере Евразийской плитой и сравнительно небольшим Турецким блоком, зажатым между Евразией и другой крупной плитой, на которой находится Африка. В настоящее время по Анатолийскому разлому идет горизонтальное движение: южный блок смещается к западу примерно на 10 см в год. Эту линию нарушений можно проследить западнее — в Эгейском и Балканском районах, и восточнее — в сейсмических зонах Ирана.



Распределение землетрясений на земном шаре. Сопоставление с предыдущей картой четко показывает взаимосвязь землетрясений с границами плит.

Однако не все землетрясения, зарегистрированные в Турции, приурочены к рассматриваемой линии нарушений. Эпицентры двух последних наиболее разрушительных землетрясений у восточной границы страны, в Лайси (1975 г.) и Мурадие, не находились на линии главного разлома, но были достаточно близки к ней, так что их можно считать признаком той же самой границы плит. Совсем иным было катастрофическое землетрясение 1970 г. в городе Гедиз. Оно, как и ряд других более слабых землетрясений, произошло далеко к югу от Анатолийского разлома. Причиной большинства землетрясений в районе Гедиза были крупные разломы вокруг структурного блока Мендерес, вызванные нарастанием деформации в самом Турецком блоке и ее ослаблением в результате подвижек на ранее существовавших разломах. Не исключено, что и эти явления определенным образом связаны с движением земной коры по Анатолийскому разлому.

Характерная особенность зоны Анатолийского разлома заключается в том, что движение масс горных пород осуществляется почти вдоль всей длины разлома. В одних местах это движение происходит медленно и непрерывно, а в других — достаточно резко, чтобы вызвать землетрясения. Вдоль зоны разлома наблюдаются два участка, на территории которых сейсмическая деятельность в течение нынешнего века не имела сильных проявлений. Можно предположить, что сейчас здесь накапливаются значительные напряжения, которые, превысив сопротивляемость горных пород, вызовут новые землетрясения. Один из этих участков, западный, приурочен к району, где в конце прошлого века произошло несколько землетрясений. Поэтому здесь напряжение, возможно, несколько ослаблено. Но другой участок, восточный, является самой потенциально опасной зоной вдоль всего разлома.



Система разлома Сан-Андреас в Южной Калифорнии и приуроченные к ней крупные современные землетрясения.

Между тем тысячи людей заново отстраивают свои деревни после каждого землетрясения, так как эвакуировать население всей этой зоны невозможно. Люди либо забывают об опасности, либо смиряются с ней. Они продолжают жить на Анатолийском разломе, даже на том его участке между Эрзинджаном и Варто, где им постоянно угрожает возможность катастрофы.

Разлом Сан-Андреас, вероятно, самый известный в мире, потому что он весьма активен и проходит через такие крупные и богатые города, как Сан-Франциско и Лос-Анджелес. Линия разлома простирается с северо-запада на юго-восток почти вдоль побережья южной Калифорнии. Разлом Сан-Андреас — это крупный поперечный сдвиг, образованный дном Тихого океана вместе с узкой полоской берега, которые перемещаются к северу вдоль Американского континента со скоростью около 6,5 см в год. Разлом представляет собой не одну четко выраженную трещину,

а зону нарушений со множеством ответвлений. Наиболее значительными являются материковые ответвления вблизи Сан-Франциско, проходящие через Окленд и Беркли, а также сложные разломы за Лос-Анджелесом, например разлом Гарлок; который простирается вдоль южного края массива Сьерра-Невада. Постоянные сдвиги по этим разломам служат причиной многочисленных калифорнийских землетрясений.

Сопутствующие явления: оползни, погружение земной коры и цунами

Для землетрясений характерно множество тревожных сопутствующих явлений, которые могут значительно усилить панику и увеличить число жертв. Вероятно, наиболее широко известным и излишне преувеличиваемым фактом является возникновение в земле трещин, которые согласно некоторым описаниям поглощали людей, животных, дома и даже целые деревни. В этих описаниях есть доля истины, хотя фактический масштаб опасности далеко не так велик.

Трещины в земле могут образовываться вдоль линии разломов, что фактически и вызывает землетрясение, но такие трещины встречаются не часто, протяженность их обычно ограничена, и они редко бывают зияющими. Открытые трещины, фигурирующие в рассказах о землетрясениях, вероятно, представляют собой вторичные явления, следствия сдвигов в неуплотненных поверхностных осадках. Они часто бывают связаны с погружением и оползанием пород, наблюдающимися в тех случаях, когда осадочные отложения утрачивают прочность вследствие колебательных движений. Во время землетрясения 1964 г. на Аляске появилось несколько крупных трещин; после землетрясения 1811 г. в долине Миссисипи было обнаружено множество длинных трещин шириной около 90 см и глубиной 3 м; во время землетрясения 1783 г. в Калабрии (Италия) образовалось огромное число трещин, причем некоторые из них достигали почти 70 м в глубину и сопровождались обширными и разрушительными оползнями; трещины также были основной причиной разрушений во время землетрясений в Порт-Ройале (Ямайка) в 1692 г. и в Пегу (Бирма) в 1930 г. Во всех этих случаях трещины развивались в мощных пластах неуплотненных поверхностных осадков. Это еще раз подчеркивает, что такие осадки не годятся для закладки фундамента зданий в сейсмоопасных районах.

Вертикальные подвижки суши, поднятия или опускания, по-видимому, обычны при землетрясениях, но они редко бывают достаточно сильными, чтобы их можно было обнаружить без проведения точной съемки. Исключением является погружение низменных участков, которое может сопровождаться мгновенным затоплением. Самым значительным побочным эффектом землетря-

сения 1811 г. в долине Миссисипи (Нью-Мадрид) стало обширное погружение и образование «затонувших земель». Было зарегистрировано вертикальное перемещение более чем на 6 м. Поскольку погружившиеся участки располагались вдоль долин рек, они быстро наполнились водой и образовалась целая серия вытянутых озер. Длина нового озера Сент-Франсис составила 64 км; озеро Рилфут, хотя и было гораздо короче, достигло в ширину 6,5 км. В то время как одни участки погружались, другие поднимались или наклонялись, и поэтому в некоторых местах реки текли вспять. Как выяснилось, эти явления были вызваны крупномасштабным прогибанием земной коры, причем погружению способствовало и оседание аллювия в речных долинах под воздействием колебаний.

«Землетрясение страстной пятницы», происшедшее на Аляске 27 марта 1964 г., было одним из самых крупных, когда-либо известных человечеству: его магнитуда составила около 8,5. Случись это землетрясение в более густонаселенном районе, оно стало бы одним из крупнейших стихийных бедствий всех времен. Эпицентр главного землетрясения находился примерно на полпути между городами Анкоридж и Валдиз. Значительные разрушения охватили площадь более 65 000 км². Смещения земной коры были отмечены на огромных расстояниях: у острова Кадьяк, расположенного почти в 800 км к юго-западу, участок дна Тихого океана внезапным толчком переместился под континентальный массив. Даже в таком малонаселенном районе, как Аляска, погибло 100 человек и понесенные убытки превысили 300 млн. долл. Вокруг эпицентра в заливе Принс-Вильям были перерезаны шоссейные и железные дороги, деревни либо разрушены, либо смыты гигантскими морскими волнами. Городам Анкоридж и Валдиз, расположенным на расстоянии около 130 км и построенным на прибрежных равнинах, сложенных неуплотненными осадочными породами, был причинен серьезный ущерб. В то же время шахты, железнодорожные туннели и нефтяные скважины, находившиеся относительно близко от эпицентра землетрясения, но заложенные в твердых породах, претерпели минимальные разрушения.

Тернегейн-Хайтс — одно из низких плато в районе Анкориджа, где велось жилищное строительство. Плато имеет высоту около 20 м над уровнем моря и с северо-западной стороны ограничено поднимающимися над морем утесами. Геология его очень проста: горизонтально-слоистые флювиогляциальные галечники мощностью от 1,5 до 6 м подстилаются озерными глинами и алевролитами толщи Бутлеггер-Коув-Клей, которые залегают гораздо ниже уровня моря. Когда произошло землетрясение, колебания не причинили особого ущерба домам и примерно в течение минуты почва крепко держала их. Но землетрясение 1964 г. было необычно тем, что продолжалось почти 4 мин. За это время вся толща глин и галечников пришла в движение и в направлении морских утесов

развился огромный оползень. На некоторых участках он отодвинул воду от берега на 800 м. Одновременно поверхность суши раскалывалась, проседала и разрывалась огромными трещинами. Десятки домов были разрушены, многие здания серьезно пострадали из-за возникших в земле трещин. Один очевидец рассказывал, что он, стоя на улице, видел, как его собственный дом быстро отодвинулся от него, а соседский дом сполз в образовавшуюся огромную трещину.

Грандиозный оползень на плато Тернегейн-Хайтс, как и другие оползни в городе, объясняются наличием в толще Бутлеггер-Коув-Клей так называемых «чувствительных» слоев. Ими являются глины, которые при постоянном содержании поровой воды, будучи разрыхленными, практически теряют свою связность. Если отдельные зерна глины разделяются водой, весь материал ведет себя, как жидкость. Продолжительной вибрации во время землетрясения 1964 г. было вполне достаточно, чтобы эти глины утратили сопротивление сдвигу и сыграли роль смазки, по которой соскользнули вышележащие алевроиты и галечники.

Самым досадным в катастрофе на плато Тернегейн-Хайтс является то, что ее вполне можно было предсказать. До 1964 г. вокруг плато наблюдалось много мелких старых оползней; специалисты хорошо знают, что галечники, залегающие на глинах, часто оползают. Более того, известно, что Анкоридж находится в активном сейсмическом поясе, где даже мелкие землетрясения вызывают подвижки на неустойчивых склонах. «Чувствительность» глины легко определить при лабораторных экспериментах. В отчете Геологической службы США по району Анкоридж, опубликованном в 1959 г., отмечались и чрезвычайно низкая устойчивость толщи Бутлеггер-Коув-Клей, и вероятность того, что здесь в прошлом уже были землетрясения. Не верится, что планировщики города, инженеры и строители, отвечающие за сооружение пригородных жилых массивов на плато Тернегейн-Хайтс, ничего не знали об этом отчете или не обратили на него внимания. Возможно, нельзя было предвидеть драматические последствия этого оползня, но продолжать в такой ситуации строительные работы — дело непростительное.

Наиболее наглядное воздействие землетрясений на осадочные породы проявляется в уплотнении пористых, насыщенных влагой песков. Под действием колебаний происходит более компактная упаковка зерен песка, уменьшается пространство между отдельными зернами, и выжатая из пор вода устремляется вверх, увлекая за собой песчинки. В результате песок разжижается и становится зыбучим. Расположенный на берегу Японского моря город Ниигата построен на равнине, сложенной пористым, не очень плотным песком, который подвергся интенсивному разжижению во время землетрясения в июне 1964 г. Последствия были ужасными. Здания тихо погружались в жидкие осадки; один домовладелец «потерял» первый этаж дома: когда земле-

трясение прекратилось и почва вновь обрела устойчивость, крыша портика над входной дверью его дома оказалась на уровне земной поверхности. Автомшины, находившиеся на стоянке, погрузились в землю, а зарытая раньше цистерна с нечистотами всплыла на поверхность.

Совершенно необычные повреждения были нанесены нескольким многоквартирным домам. Поскольку Ниигата, как и вся Япония, находится в сейсмическом поясе, дома были построены так, чтобы выдержать колебания при землетрясениях. И действительно, здания не обрушились, но потеряли равновесие на разжиженной почве и накренились или опрокинулись. Один многоквартирный дом улегся на бок, при этом в его железобетонной конструкции не появилось ни одной трещины. Движение к земле было медленным, потому что песок еще сохранял значительную вязкость, и женщина, оказавшаяся во время землетрясения на крыше дома, сумела благополучно соскользнуть вниз по наклонившемуся зданию и сойти на землю.

Когда вода вырывается из разжижающегося песка, она может фонтанировать и выносить на поверхность струи грязи. Во время землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско выбросы воды достигали высоты 6 м. После того как эти струи иссякли, на их месте образовались конические воронки, окруженные небольшими горками песка и грязи.

Еще одним побочным эффектом землетрясений являются сейши — волны, возникающие в результате движений дна озер или рек. Под их воздействием вода иногда переливается через берега озер и дамбы плотин. Но, насколько известно, серьезный ущерб эти явления наносят редко.

Частота колебаний некоторых сейсмических волн бывает такой, что они становятся слышны человеку; животные же могут воспринимать звук в значительно более широком диапазоне. В различных описаниях звуки, сопровождающие землетрясение, сравниваются с сильным ветром, шумом скорого поезда, отдаленными орудийными раскатами и даже взрывами. Все это, возможно, преувеличено, так как люди, переживающие землетрясение, обычно находятся в стрессовом состоянии, но вполне можно согласиться с тем, что землетрясение сопровождается звуками. Скорее можно сомневаться в том, что землетрясению сопутствуют вспышки света, о чем свидетельствуют рассказы некоторых очевидцев. Иногда этот яркий свет можно объяснить разрядами молний или короткими замыканиями электроприборов. Но не исключена возможность, что некоторые из этих вспышек связаны с малопонятным явлением накопления статического электричества при движениях земной поверхности.

Одним из наиболее разрушительных последствий землетрясения являются оползни. Колебания и сдвиги, обусловленные землетрясением, влекут за собой временное уменьшение критических углов, при которых склоны сохраняют свою устойчивость.

Наиболее катастрофические последствия наблюдаются на неуплотненных осадках. Во время землетрясения 1971 г. в Калифорнии развился оползень в Сан-Фернадо, двигавшийся при уклоне менее 2° , тогда как почти для всех типов осадков уклон в 10° обычно считается уже безопасным.

Огромные оползни вызвало землетрясение 1920 г. в провинции Ганьсу на севере Китая. Провинция Ганьсу расположена в бассейне реки Хуанхэ, где преобладающим ландшафтом является сильно изрезанное лёссовое плато, сложенное тонким, нанесенным ветром, несцементированным алевритом с очень низким коэффициентом внутреннего сцепления. При колебании земной поверхности развились сотни оползней. Один из них был таким крупным, что сместил дорогу более чем на 800 м. Потрясает число жертв этой катастрофы. Многие крестьяне жили здесь в пещерных домах, вырытых в склонах лёссовых холмов. Лёсс был идеальным материалом для такого строительства, поскольку его можно обрабатывать вручную обычными домашними инструментами и лёссовые потолки достаточно хорошо держатся над довольно большими комнатами. В результате землетрясения и следовавших за ним оползней пещерные жилища были мгновенно разрушены и захоронили всех, кто в них находился. Число погибших составило 100 000 человек.

Во время знаменитого землетрясения 1923 г. в Японии оползень краснозема запрудил горную речку над заливом Сагами; возник грязевой поток глубиной 15 м, который пронесся вниз по долине и увлек за собой в море дома, дорогу, железнодорожную станцию и поезд с 200 пассажирами. Спасти не удалось никому. Во время землетрясения 1783 г. в горах Калабрии (Италия) произошло оползание толщи глинистых отложений и почв с коренного массива гранитов. В результате этого стихийного бедствия погибло 30 000 человек.

Все упомянутые оползни, вызванные землетрясениями, развивались в неуплотненных осадках. Даже по этим примерам можно судить, какую опасность таят в себе осадочные породы в сейсмических поясах. Ни планирование, ни инженерные замыслы не могут предотвратить возможной катастрофы. Выходом могло бы стать только совершенно неосуществимое на практике мероприятие — эвакуация населения из всех районов сейсмических поясов, сложенных осадочными образованиями и имеющих уклоны рельефа.

Под воздействием сейсмических напряжений могут обрушиться и твердые породы. Землетрясение 1959 г. в Монгане (США) вызвало гигантский обвал у озера Хебген. Обломки выветрелого и трещиноватого материала погребли кемпинг и перегородили долину реки Мадисон, создав временное озеро.

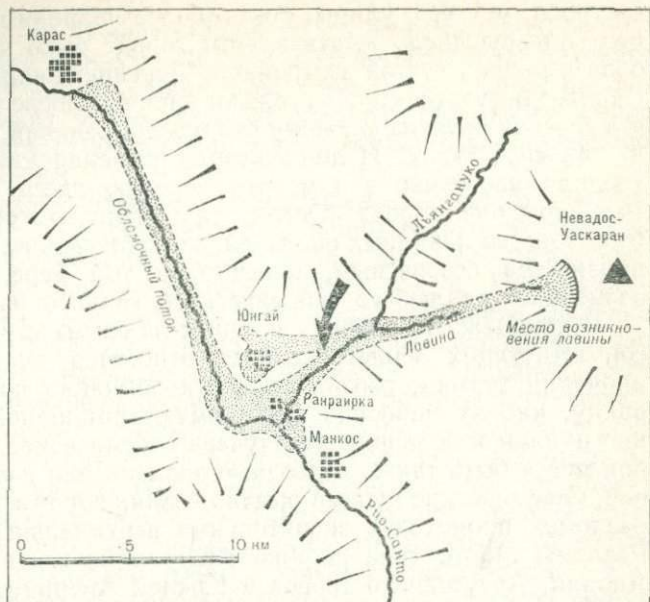
Еще более грозными были оползни, вызванные землетрясением 1970 г. в Перу. Днем 31 мая 1970 г. лавина из снега и льда обрушилась на лагерь чехословацких альпинистов, расположен-

ный на горе Невадос-Уаскаран, одной из самых высоких в Перуанских Андах, и унесла жизни 15 человек. Эта лавина была вызвана землетрясением, последствия которого в других районах Перу были гораздо более разрушительными. Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 24 км от лагеря, под дном Тихого океана. Никаких признаков предстоящего землетрясения не наблюдалось. Оно разразилось внезапно, и магнитуда его составила 7,7. Значительный ущерб был нанесен ближайшему к эпицентру городу Чимботе, построенному на прибрежной равнине. Одни участки земной поверхности покрылись множеством трещин, другие погрузились ниже уровня грунтовых вод и поныне затоплены водой. Правда, многие современные бетонные здания сохранились, но почти все традиционные глинобитные дома были разрушены до основания. Человеческих жертв, к счастью, было немного: как только начались толчки, люди выбежали на улицы, погибло лишь несколько человек.

Но в 50 км вглубь материка, в густонаселенной долине Уайлас, расположенной непосредственно к западу от наиболее высоких гор, число погибших достигло ужасающей цифры. Главный город этих мест Уарас находится в тесной долине; дома в нем были в основном двух- и трехэтажные и теснились по обе стороны узких улиц. Хотя землетрясение здесь было более слабым и продолжилось около 30 с, уже половины этого времени было достаточно, чтобы обрушилась большая часть каменных зданий. Не пощадила стихия и людей: только в одном Уарасе погибло 10 000 человек — половина населения города.

Вниз по долине Уайлас на крутых склонах молодых гор произошли десятки оползней. Обрушились склоны многочисленных аллювиальных и флювиогляциальных террас. Кроме того, землетрясение вызвало множество снежных лавин, которые в свою очередь повлекли за собой более крупные оползни и грязевые потоки. Два оползня блокировали реки и образовали опасные, неустойчивые озера, существовавшие до тех пор, пока не удалось прорыть траншеи в запрудах.

Наиболее сильной была лавина, сформировавшаяся на крутой горе Невадос-Уаскаран. Почти у самой вершины этой горы высотой 6558 м от снежного карниза оторвалась глыба длиной 800 м и обрушилась вниз по вертикальному западному склону. Пролетев около километра, она раздробилась, частично растаяла под действием теплоты трения, смешалась с миллионами тонн разрушенной породы и моренного обломочного материала и устремилась дальше вниз по склону. Огромная масса обломочного материала текла как грязевой поток и на следующих 13 км пути спустилась по вертикали на 3 км. Она двигалась со скоростью до 400 км/ч, настолько быстро, что местами скользяла на воздушной подушке над кустами и другой растительностью, не задевая их. Мчась по боковой долине, лавина устремилась к главной долине Уайлас. В месте их слияния находилась деревня Ран-



Путь разрушительной лавины с горы Невадос-Уаскаран во время сильного землетрясения 1970 г. в Перу.

раирка, она была полностью уничтожена. Скорость лавины была настолько велика, что каменные глыбы до 6 м в поперечнике, будучи подброшенными в воздух, падали уже в сотнях метров позади потока.

Один из языков лавины перевалил через гряду высотой около 150 м и устремился вниз на город Юнгай. Когда произошел первый толчок землетрясения, наполовину разрушивший Юнгай, жители города услышали и увидели, что высоко на горе Невадос-Уаскаран зарождается лавина. Они побежали, стараясь добраться до какой-либо возвышенности. Ближайшим к центру города высоким местом оказался холм, на котором находилось кладбище. Через 2 мин лавина достигла города. Она напоянала прибойную волну, передняя стена которой из грязи и обломков была выше почти всех зданий города. Люди продолжали бежать, но лишь 92 человека успели спастись на кладбищенском холме, большинство же погибло. Приводятся разные цифры погребенных лавиной в городе Юнгай — от 10 000 до 20 000 человек.

В Перу не наблюдалось никаких предвестников землетрясения 1970 г. Население этой страны знает, что подобное стихийное бедствие может повториться. Катастрофа 1970 г. послужила хорошим уроком, после которого были приняты некоторые предохранительные меры. Город Чимботе заново отстроен; хотя он и остался на том же месте, где стоял раньше, но при застройке избегали низких участков со слабыми грунтами. Уарас также

отстроен, но его улицы стали более широкими; учитывалось, что большое число жертв в этом городе было вызвано главным образом очень густой застройкой. Деревню Ранраирка перенесли в другое место, где ей не угрожают лавины. После того как в 1962 г. эта деревня была наполовину разрушена лавиной, ее восстановили на прежнем месте. И лишь вторая ужасная катастрофа 1970 г. убедила население в том, что деревню здесь строить нельзя. Расположение города Юнгай, защищенного горной грядой от большинства лавинных оползней, за исключением самых крупных, признается безопасным, конечно, в той мере, насколько это возможно для любого сейсмического горного района.

В прибрежных районах к одним из самых страшных явлений, сопутствующих землетрясениям, относятся цунами. Цунами — японский термин, обозначающий необычайно крупную морскую волну, иногда ошибочно называемую «приливной». Происхождение цунами в большинстве случаев сейсмическое, хотя их причиной могут быть также подводные оползни или извержения вулканов. Сейсмические цунами обычно возникают там, где в подводных разломах происходят значительные вертикальные перемещения. Разломы такого типа широко распространены вдоль побережий Японии, Алеутских островов и Южной Америки. Статистика показывает, что на восточном побережье острова Хонсю в Японии каждые 10 лет следует ожидать цунами, которые принесут разрушения местного масштаба. Горизонтальные сбросовые движения, такие как сдвиг вдоль Калифорнийского побережья, не вызывают цунами, что позволяет считать этот район довольно безопасным.

В открытом океане цунами имеют незначительную амплитуду и очень большую длину волн. При этом волны следуют одна за другой через промежутки времени от 5 мин до 1 ч, перемещаясь со скоростью около 640 км/ч. Но поскольку скорость волн пропорциональна глубине, в прибрежных районах скорость уменьшается, а высота волн увеличивается; накатываясь на сушу, они могут вздыматься на 30 м над нормальным уровнем моря. Самые разрушительные из всех известных цунами обрушились на густонаселенное побережье Бенгальского залива на севере Индии в 1876 г. При этом погибло около 200 000 человек.

20 лет спустя самые сильные из когда-либо наблюдавшихся в Японии цунами отмечались в сейсмическом районе на побережье Санрюкю на севере Хонсю. Эпицентр землетрясения располагался в открытом море на расстоянии около 150 км от берега, и слабые толчки, ощущавшиеся на суше, особой тревоги не вызвали. Рыбаки, находившиеся в районе эпицентра, не заметили цунами из-за малой амплитуды волны над глубоководьем. Но когда они вернулись в порт, их глазам предстала картина страшных разрушений. Целые деревни сравнялись с землей; многие тысячи людей смыло волной, поскольку лето было в разгаре и все пляжи были переполнены. По средним подсчетам погибло

более 27 000 человек. В марте 1933 г. на тот же самый район опять обрушилась волна цунами. На этот раз погибло 3000 человек. В обоих случаях максимальная высота волн, более 24 м, наблюдалась в верховьях узких морских заливов, где разбег волны ограничен. К несчастью, именно в этих местах было множество рыбацких деревушек.

Цунами обладают огромной разрушительной силой: дома на берегу могут быть просто раздавлены одним только весом воды. Разрушительный эффект возрастает, если с массой воды на берег выбрасываются различные обломки, лодки и т. п. При цунами может вздыматься и земная поверхность из-за увеличения давления грунтовых вод. В 1835 г., когда на город Консепсьон в Чили обрушилась третья волна цунами, гребень ее поднимался всего на 9 м. Но отступление волны вызвало очень сильные разрушения, многие постройки были унесены в открытое море. Первого апреля 1946 г. цунами, возникшие у Алеутских островов, дошли до города Хило на Гавайях. После едва заметного поднятия уровня моря вода освободила приливно-отливную полосу. Многие люди вышли на только что рожденный «пляж». Но делать этого не следовало: вскоре показался гребень новой волны высотой 3,5 м, мчавшейся к берегу со скоростью более 30 км/ч. За этой волной море было почти спокойным. Но затем одна за другой на берег обрушились восемь волн. Высота их гребней в узких заливах превышала 15 м.

При цунами 1946 г. в Хило погибло 159 человек. Это заставило создать в Тихом океане систему оповещения о цунами (Pacific Tsunami Warning System — PTWS). Система PTWS представляет собой сеть коммуникаций, охватывающую все выходящие к Тихому океану страны; ее задача — заблаговременное предупреждение о приближении цунами. Конечно, эта система не успевает предупредить о цунами районы очень близкие к эпицентрам землетрясений. Но в ряде случаев она может оказать существенную помощь. Например, от Японии до Гавайских островов цунами доходят за 10 ч, и своевременное сообщение об их зарождении и направлении движения имеет важное значение.

Проблема заключается в том, чтобы установить, какой разрушительной силой будут обладать цунами по достижении определенного побережья, и решить, следует ли организовать массовую эвакуацию, рискуя объявить ложную тревогу, или надо просто подготовиться к встрече с небольшой волной. Самые сильные цунами наблюдаются в направлении движений морского дна. При менее сильных цунами степень разрушений зависит от формы береговой линии в данном районе.

Сразу после землетрясения 1964 г. на Аляске в город Кресент-Сити (северная Калифорния) было послано предупреждение о цунами. Многие жители успели покинуть побережье до прихода волн. Но после того как прошли две относительно небольшие волны, некоторые люди, успокоившись, вернулись. Они были

унесены в море более крупными — третьей и четвертой — волнами. Иногда оповещение может привести к совершенно неожиданным результатам. Однажды телевизионные программы города Сан-Франциско предупредили о приближении цунами. Результат оказался обратным: тысячи людей устремились на берег моря в окрестностях Сан-Франциско, чтобы «посмотреть на волны». Спасло их только то, что волны на этот раз, к счастью, оказались небольшими.

Результаты недавних исследований цунами в Тихом океане показали, что те же самые силы, которые вызывают появление морских волн, приводят к возникновению атмосферных нарушений. Выяснилось также, что звуковые волны, которые можно обнаружить при помощи приборов, распространяются быстрее, чем цунами. Сейсмические воздушные волны в 1964 г. достигли Кресент-Сити на два с половиной часа раньше цунами. Надо надеяться, что эти воздушные волны можно будет использовать для предупреждения о цунами. Сигналами предупреждения, по-видимому, могли бы стать также нарушения в ионосфере и в поведении отраженных радиоволн.

Однако кроме заблаговременного оповещения о приближении волны еще мало что можно сделать, чтобы предотвратить разрушительные последствия цунами. После 1946 г., когда город Хило отстраивался заново, на некоторых участках береговой полосы здания не возводили. Было признано, что жить в деревнях, расположенных в верховьях некоторых узких морских заливов, опасно. Но вероятность появления цунами на доброй половине побережья Тихого океана не устраняется, и эту опасность следует воспринимать как неотъемлемую часть жизни местного населения.

Сейсмические пояса и устойчивые участки

Как мы уже видели, самые активные сейсмические пояса протягиваются по периметру Тихого океана и вдоль линии Гималаи—Средиземноморье. Активность второго из названных поясов означает, что Европу можно подразделить на два района, характеризующихся разными сейсмическими условиями. Северная часть, по существу, устойчива и не подвергается крупным землетрясениям, тогда как в южной части вокруг Средиземноморья картина совершенно иная. Хотя по частоте землетрясений Средиземноморье нельзя сравнивать с краевыми зонами Тихого океана, оно знаменито тем, что здесь произошел один из самых сильных толчков в мире.

В 1755 г. не было приборов для точного измерения масштаба землетрясений, но сейчас считается общепризнанным, что землетрясение, которое произошло в столице Португалии Лиссабоне 1 ноября 1755 г., по-видимому, имело магнитуду около 8,9. Если

существует максимальный предел магнитуды землетрясений, то интенсивность лиссабонского землетрясения, вероятно, была близкой к этому пределу. Толчок ощущался на огромной территории, включая всю Европу и все Средиземноморье. В самом Лиссабоне разрушения были ужасающими.

Никаких признаков надвигающейся катастрофы не было до 9 ч 30 мин утра, когда раздался звук, похожий на подземный гром. С ним совпал первый из трех главных толчков, который продолжался чуть более 6 мин. Многие районы города превратились в груды обломков, в разрушенных домах забушевали пожары. Это был день всех святых, и многие сотни людей, пришедшие на богослужения, погибли под обломками церквей. Установлено, что число человеческих жертв достигало 60 000, причем большинство погибло в течение первых 6 мин. Примерно через час после главного толчка море отступило, обнажив приливно-отливную полосу. Спустя некоторое время водные массы промчались назад и обрушились на берег в виде нескольких волн цунами. Значительная задержка во вступлении волн цунами позволяет предполагать, что они были связаны с афтершоками. Большинство эпицентров ударных волн, по-видимому, находилось в открытом море. Эти запоздавшие цунами довершили катастрофу. Многие из оставшихся в живых попытались покинуть рушащийся и горящий город, переправившись через реку Тахо. В 11 часов, когда более 100 человек собрались на берегу реки, над набережной пронеслась волна. . . Очевидцы этого происшествия, находившиеся в лодках, видели, как волна скрыла набережную и людей, а когда вода отступила, от массивной каменной набережной не осталось и следа, все стоявшие на ней были смыты и погибли. По рассказам современников, набережную «поглотила трещина в земле», но вероятнее считать, что она полностью погрузилась в песчаный грунт, который утратил свои несущие свойства из-за повышения давления грунтовых вод под действием цунами.

Через 28 лет после катастрофы в Лиссабоне, в 1783 г., крупное землетрясение произошло в области Калабрия южной Италии. Основные разрушения были вызваны многочисленными оползнями, возникшими на крутых склонах долин. Здесь же в 1908 г. случилось еще одно ужасное землетрясение, во время которого погибло более 100 000 человек. Значительный ущерб был нанесен городу Реджо-ди-Калабрия и порту Мессина в Сицилии. Разрушения были вызваны мощными подземными толчками, а также волнами цунами, пронесшимися по обоим берегам Мессинского пролива.

В Средиземноморском сейсмическом поясе землетрясения наблюдаются периодически. В 1926 г. произошло землетрясение, имевшее магнитуду 8,3, эпицентр которого находился вблизи острова Родос в Эгейском море. Южная часть Средиземноморья пострадала дважды — в 1954 и 1960 г. Во время первого из этих

землетрясений погибли тысячи людей в районе Орлеанвиль в Алжире. Бедствие усугубилось тем, что обрушилась плотина Ламартин и в огромном, хлынувшем вниз потоке воды утонуло более 200 человек, оказавшихся поблизости. Землетрясение 1960 г. в марокканском городе Агадир произошло в районе, где с 1731 г. не было отмечено ни одного значительного подземного толчка. Но во время землетрясения 1960 г. город Агадир был разрушен настолько, что восстанавливать его не имело смысла. Территория города была выровнена бульдозерами, и жители покинули его. Во время землетрясения 1963 г. в Скопье (Югославия) было разрушено около 75 % зданий. Погибло более 1200 человек, но эту цифру можно считать поразительно низкой для землетрясения такой магнитуды. Этот факт объясняется тем, что в разрушенном городе не возникло пожаров, поскольку толчок произошел ранним летним утром, когда печи топились лишь в немногих домах, электричество же удалось немедленно отключить.

Несколько землетрясений в Сицилии в 1968 г. разрушили ряд деревень. Первые толчки были не очень сильными, но они заставили жителей покинуть свои дома; при шестом и седьмом толчках рухнуло большинство зданий. В деревне же Монтеваго, где первые толчки были слабыми и почти все жители остались в домах, большая часть населения, насчитывавшего 281 человек, погибла.

Предупреждение в виде предварительных толчков, возможно, спасло многие жизни во время землетрясения во Фриули (северная Италия) в мае 1976 г. Вечером, без пяти девять, начались резкие сотрясения, в домах с грохотом попадали со стен картины и задребезжала посуда. Через 5 мин последовал более сильный толчок. Он не вызвал разрушений, но люди в панике выбежали на улицы. Еще через 2 мин произошел главный толчок, который продолжался 55 с и достиг магнитуды 6,8. Деревни превратились в руины, но многие люди спаслись благодаря тому, что вовремя покинули дома. Тем не менее число погибших достигло 966 человек.

Британские острова являются полной противоположностью сейсмической зоне Средиземноморья. Они лежат на безопасной плите в сейсмически устойчивом районе. Еще ни разу не было зарегистрировано землетрясения с эпицентром в Ирландии. В Англии, Уэльсе и Шотландии землетрясения случались, но они были очень слабыми. В 1975—1977 гг. в районе Сток-он-Трент отмечались десятки мелких сотрясений. Выяснено, что они возникали главным образом на небольших разломах, приуроченных к каменноугольным отложениям. Перемещение по этим разломам было вызвано проседанием горных пород при добыче каменного угля. Возможно, осуществлялись также подвижки по древним разломам в толщах, подстилающих каменноугольные отложения. Незначительные глубинные смещения такого масштаба могут происходить в любом месте, даже на достаточном удалении от активных границ плит, но они редко вызывают серьезные разру-

шения. Так, во время толчков в Уоррингтоне в ноябре 1976 г. упало с подставок несколько телевизоров. Рассказывают, что в начале того же года во время землетрясения в Херефорде с жердочки в клетке упал попугай. Слабые сотрясения, происшедшие в угленосном бассейне к северу от Ноттингема в 1974 и 1975 г., имели такое же происхождение, как и в районе Сток-он-Трент, и столь же незначительные последствия: многих обеспокоил ночью шум, некоторые ощутили вибрации, но разрушений зарегистрировано не было.

Землетрясение в Колчестере 22 апреля 1884 г. было, возможно, самым сильным из всех, когда-либо происходивших в Великобритании. Обрушилась крыша деревенской церкви в Ленгенхоу, колокольня при этом осталась неповрежденной. На острове Мерм открылись трещины в земле, а в деревне Уайвенхоу упали многие дымовые трубы и провалились крыши домов. Этот толчок вызвал, вероятно, единственный в Великобритании смертельный случай при землетрясении: в деревне Роухедж из печной трубы вывалились кирпичи и убили ребенка, сидевшего в кухне на полу. Явление 1884 г. было столь необычным для Великобритании, что получило название «великого английского землетрясения». Однако его едва ли можно сравнивать с землетрясениями в других районах мира.

Одним из наиболее крупных землетрясений, которыми знаменита Калифорния, было землетрясение 19 апреля 1906 г. с магнитудой 8,3. Эпицентр его находился к северу от Сан-Франциско. Смещение по разлому Сан-Андреас наблюдалось на протяжении 440 км и достигало 6,3 м по горизонтали. Произошло три толчка, которые продолжались более минуты; размеры нанесенного ущерба были огромны. Многие районы города были стерты с лица Земли, на окраине города вследствие сильных колебаний земной поверхности был сброшен с рельсов поезд. Самые серьезные разрушения были зарегистрированы в доках на берегу залива; здания, стоящие на рыхлом аллювии, пострадали гораздо больше, чем те дома, которые были построены на твердых коренных породах. Но худшее было еще впереди: разразился пожар, и все деревянные постройки, а город в основном состоял из них, загорелись. Водопровод был поврежден и вышел из строя. Попытка бороться с пожаром при помощи динамита оказалась бесполезной, и огонь бушевал в течение трех суток. В результате 500 кварталов города были полностью уничтожены, но общее число погибших было поразительно небольшим — всего около 700 человек. Хорошо, что небоскребы, столь характерные для американских городов, не стали модными в Сан-Франциско.

До этого землетрясения и после него в Калифорнии случилось еще много других землетрясений, но, возможно, самое показательное из них отнюдь не было самым крупным. В 6 ч утра 9 февраля 1971 г. в Сан-Фернандо, пригороде Лос-Анджелеса, произошло землетрясение, магнитуда которого достигла 6,6.

Оно захватило густонаселенный район и было так подробно зарегистрировано и изучено, что стало своеобразным эталоном, на примере которого можно оценить, какой ущерб способно причинить землетрясение в городском районе.

Землетрясение возникло на ранее не закартированном разломе под горой Маджик-Маунтин в 10 км к северу от главной заселенной долины. Толчки продолжались целую минуту. Подача газа и электричества была прекращена в самом начале землетрясения. Может быть, отчасти благодаря этому после землетрясения не возникло пожаров. Большинство домов в районе были деревянными и хорошо сохранились, хотя многие кирпичные трубы не устояли. В то же время старые каменные здания были разрушены вплоть до центра Лос-Анджелеса. Вероятно, из-за раннего времени суток и малочисленности людей на улицах погибло всего 65 человек, которые были в основном убиты падающими кирпичами.

На холмах за Сан-Фернандо было отмечено около тысячи мелких поверхностных оползней и камнепадов в каньонах. Более сильное нарушение грунта наблюдалось на аллювиальных равнинах вокруг гор. Там были сильно повреждены некоторые шоссе; обрушилась крупная транспортная развязка, включавшая несколько только что построенных путепроводов, из ее относительно тонких опорных башен выпали железобетонные плиты. С тех пор возникли сомнения: приемлемы ли сложные по своей конструкции высокие путепроводы для сейсмоопасных районов? Старое, построенное около 40 лет назад здание Госпиталя ветеранов разрушилось почти полностью и погребло под обломками 44 человека. Современные же, укрепленные железобетонными конструкциями корпуса больницы Олив-Вью выдержали толчки. Упали только лестничные блоки, прикрепленные к крыльям главных зданий. Это еще раз подтвердило антисейсмическую ценность железобетона.

Сохранению многих человеческих жизней при землетрясении в Сан-Фернандо способствовала также счастливая случайность: как раз перед землетрясением уровень воды в нижнем водохранилище Ван-Норман был понижен для проведения профилактического ремонта. Земляная плотина водохранилища была построена по ускоренному методу, и в ее середине остались недостаточно консолидированные, насыщенные водой осадки. При вибрации во время землетрясения возникло обширное оползневое обрушение на внутренней стороне плотины. Вода чуть не перелилась через полуразрушенную дамбу, и 80 000 человек были вынуждены покинуть свои дома до тех пор, пока водохранилище не будет осушено. За этот урок по конструкции и качеству строительства плотин в сейсмических районах чудом не было заплачено дорогой ценой огромных человеческих жертв.

Мы знаем, что на территории Китая, в поясе, простирающемся от Юннзя до Пекина и далее на северо-восток в Маньчжурию, издавна отмечалось много землетрясений. Возможно, там про-

ходит линия какой-либо границы плит. Восточное побережье и остров Тайвань располагаются вдоль активной границы плит по периферии Тихого океана, а юго-восточные провинции страны почти асейсмичны. В западной части известно несколько довольно крупных землетрясений. Но два самых сильных в истории Китая землетрясения, которые одновременно явились и самыми разрушительными из известных в мире, наблюдались на территории пояса Юнньюнь—Пекин.

28 июля 1976 г. примерно в 160 км к юго-востоку от Пекина в густонаселенном районе северо-восточного Китая произошло очень мощное землетрясение с магнитудой 8,2, эпицентр которого находился в огромном промышленном городе Таншань. Масштаб разрушений и число человеческих жертв были почти беспрецедентными. Жилые дома и магазины, учреждения и заводы превратились в груды обломков. Весь город практически сровнялся с землей. Некоторые районы, расположенные на рыхлых грунтах, во время землетрясения сильно осели и покрылись множеством огромных трещин. Одна из таких трещин поглотила здание больницы и переполненный пассажирами поезд. Развитию трещин способствовало обрушение старых выработок в угольных шахтах. Население Таншаня насчитывало полтора миллиона человек, но лишь очень немногим удалось избежать телесных повреждений. Официальных сообщений об этой катастрофе из Китая не поступало, но в достоверном, хотя и неофициальном отчете, помещенном в гонконгской газете, сообщалось, что погибло 655 237 человек. В это число, правда, были включены также жертвы землетрясения за пределами Таншаня, в частности в Тяньцзине и Пекине. Во время землетрясения в восьми глубоких угольных шахтах, пройденных в твердых коренных породах, находилось около 10 000 шахтеров. Судя по сообщениям, ни один из них не погиб. Хотя в подземных выработках начались камнепады и затопление, всем шахтерам удалось спастись. А два месяца спустя почти все шахты вновь приступили к работе.

Эпицентр самого сильного в Китае землетрясения, произошедшего 23 января 1556 г., находился в городе Сиань (провинция Шэньси). Сиань расположен на берегах великой реки Хуанхэ, где равнины, выполненные рыхлыми осадками, чередуются с низкими холмами, сложенными тонким лёссовым материалом. По рассказам очевидцев, целые города погружались в грунт, разжиженный вследствие колебаний, и тысячи жилищ, вырытых в рыхлых лёссовых холмах, обрушились в считанные секунды. Поскольку толчок произошел в 5 ч утра, большинство семей еще находилось дома и с этим, несомненно, связано огромное число жертв — 830 000. Это единственное землетрясение, при котором погибших было больше, чем при катастрофе в Таншане.

Ударные волны Таншаньского землетрясения 1976 г. достигли Пекина и произвели значительные разрушения в столице Китая. Сейсмологи предсказывали, что произойдут новые землетрясения,

поэтому после толчка 28 июля большинство 7-миллионного населения столицы ночевали на открытом воздухе, хотя шел сильный дождь. Людям посоветовали покинуть все здания и держаться подальше от построек, к домам высотой более пяти этажей запрещено было подходить, все крупные магазины были закрыты. Второго августа наблюдался мощный афтершок, который вызвал дальнейшие разрушения; при этом погибло несколько человек, проводивших спасательные работы в ранее рухнувших зданиях. Население Пекина продолжало ночевать под открытым небом, но крупных сотрясений больше не последовало. Наконец, 15 августа власти решили, что опасность миновала, и люди вернулись в свои дома.

Прогноз землетрясений

Предсказание землетрясений всегда было популярной темой, но лишь в последнее десятилетие оно перешло от прорицателей и религиозных фанатиков к ученым. К сожалению, эта проблема и в настоящее время остается трудной. Китайские специалисты заявляют, что в последние годы они предсказали 18 землетрясений из 31, но признают, что иногда объявленная тревога оказывалась ложной. По наблюдениям калифорнийских сейсмологов, в течение последних нескольких лет 25 раз сообщалось о «приближении землетрясений», но лишь в 15 случаях действительно последовали сильные толчки. Хотя, несомненно, имеется определенный прогресс в предвидении землетрясений, успехи в этой области пока еще недостаточны.

Один из распространенных способов предсказания землетрясений основан на анализе предварительных толчков, хотя отчетливые предварительные толчки до начала главного землетрясения скорее являются исключением, чем правилом. Подземные удары могут быть обнаружены при помощи сейсмографов или же определены по поведению животных. Незадолго до землетрясения 1835 г. на побережье Чили все чайки устремились внутрь материка, а собаки покинули город Такауана. Перед землетрясением 1906 г. в Сан-Франциско всю ночь выли собаки. Китайцы заметили, что перед началом землетрясения змеи выползают из своих нор, а крысы покидают здания. Несомненно, животные и птицы ощущают гораздо более слабые колебания, чем человек. Японские исследователи установили, что наиболее чувствительными являются фазаны, которые вполне могут отличить сейсмические сотрясения от колебаний, вызванных движением транспорта.

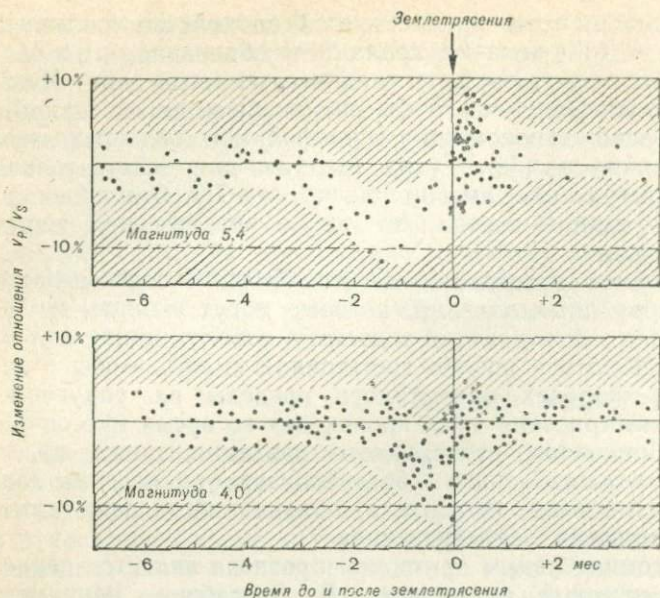
Хотя отклонения в поведении животных позволяют предсказать лишь те землетрясения, которым предшествует несколько предварительных толчков, в Китае этим методом был осуществлен один из самых успешных прогнозов, известных на данный момент. Многие даже непрофессиональные наблюдатели замечали, что в течение всего 1974 г. поведение животных в Хайнэне (Маньчжу-

рия) было странным и что признаки их беспокойства усилились 28 января 1975 г. В 2 ч ночи 4 февраля было объявлено, что в ближайшие два дня следует ожидать сильного землетрясения. Местное население покинуло дома; чтобы «выманить массы из зданий», была организована демонстрация кинофильмов под открытым небом. В половине восьмого утра того же дня действительно произошло землетрясение, имевшее магнитуду 7,3. Оно сровняло с землей 90 % зданий города, но «число человеческих жертв было минимальным».

Некоторые менее определенные методы прогноза основываются на изучении природных явлений, которые могут вызвать землетрясение. Прилив, заполняющий водоемы в новолуние или полнолуние, может оказаться вполне достаточной силой, чтобы в деформированных породах превысили пределы их упругости. В Гималаях землетрясения чаще происходят во время муссонных наводнений. Понижение атмосферного давления также может способствовать землетрясению. Образующиеся при падении давления высокие и тонкие, как дымка, облака иногда даже называют «предвестниками землетрясения».

Еще более сомнительным критерием прогноза является периодичность сейсмической активности. В Лиссабоне, например, сильные землетрясения отмечались в 1344, 1531 и 1755 г., следовательно, вскоре там снова должно произойти землетрясение, но прогноз, основанный на 200-летнем цикле, едва ли может указать точный срок, имеющий практическое значение. Недавно наблюдались подвижки вдоль почти всей зоны Анатолийского разлома в Турции, за исключением одного района близ Эрзинджана. Следовательно, в этой части разлома породы напряжены и в ближайшее время возможно их обрушение, но указать точно время ожидаемого землетрясения нельзя. На основе подобных же соображений, но с привлечением современного оборудования в 1973 г. было предсказано, что через 6 месяцев в Калифорнии в районе «замкнутого» участка разлома Сан-Андреас близ Холлистера разразится землетрясение. Однако ничего подобного не произошло.

Недавно советским ученым удалось достигнуть поразительных успехов в предсказании землетрясений. Они исходили из того, что перед землетрясением свойства породы меняются. Наиболее важным для прогноза является изменение скорости сейсмических волн. Скорость продольных сейсмических волн сначала снижается вследствие образования трещин, а затем возрастает, по мере того как вода заполняет эти трещины. Стало быть, сейсмолог должен лишь регистрировать ударные волны от незначительных, происходящих почти непрерывно сотрясений и уловить момент, когда изменится соотношение скоростей P - и S -волн, которое перед сильным землетрясением уменьшается на 5—10 %. Землетрясения следует ожидать, когда скорости волн снова станут обычными. На основании этих наблюдений можно предсказать время начала землетрясения.



Изменения скорости сейсмических волн перед двумя землетрясениями в СССР, которые были предсказаны на основании временных аномалий.

Это хорошо видно на записях ударных волн, предшествовавших двум землетрясениям на территории Советского Союза. Судя по верхней записи, соотношение скоростей продольных и поперечных волн закономерно уменьшалось в течение двух месяцев. Затем оно начало возрастать, предупреждая, что землетрясение произойдет в ближайшие два месяца. Еще ценнее то обстоятельство, что интервал времени, в течение которого происходят эти изменения, указывает на интенсивность ожидаемого землетрясения. Первое из землетрясений имело магнитуду 5,4, и в течение четырех месяцев до этого события сейсмические скорости были пониженными. Предварительный период для землетрясения с магнитудой 4 составил лишь два месяца. А если бы период изменений длился 14 месяцев, это свидетельствовало бы о потенциальной возможности катастрофического землетрясения с магнитудой 7.

После того как советские ученые обнаружили это явление, оно было подтверждено американскими, японскими и китайскими сейсмологами, которым удалось осуществить удачный прогноз в районах, где имелось достаточно густая сеть сейсмографов.

Смещение пород к очагу землетрясения имеет и другие следствия: например, уменьшается удельное электрическое сопротивление пород, изменяется их магнитная восприимчивость, повышается содержание радона в грунтовых водах. Если удастся учитывать эти факторы в сочетании с изменениями скоростей волн, надежность прогноза, безусловно, возрастет.

Японские сейсмологи отдавали предпочтение прогнозированию землетрясений на основании изучения деформаций земной поверхности, выявляемых при детальной геологической съемке и измерении медленных изменений углов ее наклона вблизи разлома. Но давать прогнозы времени землетрясения на базе такого подхода нелегко. Вокруг городка Палмдейл у Лос-Анджелеса за период с 1959 по 1974 г. наблюдалось очень медленное поднятие участка площадью около 13 000 км², центральная часть которого стала выше на 45 см. Это куполоподобное образование располагается в районе разлома Сан-Андреас, по которому местами не было смещения с 1932 г. Предполагалось, что такое воздымание характерно для ситуации, предшествующей землетрясению. Это подтверждалось и уменьшением скорости сейсмических волн в данном районе. Но начиная с 1974 г. лавовый купол Палмдейл перестал подниматься, и никто еще точно не знает, что это означает.

В наши дни, когда механизм землетрясения изучен достаточно хорошо, было бы заманчиво поставить вопрос: возможно ли осуществлять контроль над этим природным явлением? К сожалению, предотвратить землетрясение человек не может. Но он может вызвать движение земной коры, прежде чем напряжение в породах достигнет критического уровня. Наиболее действенным из существующих приемов является проведение мощного взрыва. Подземный взрыв ядерного устройства в Неваде в 1968 г. вызвал толчок магнитудой 6,3, за которым последовал ряд землетрясений с магнитудой до 5,0.

Еще один искусственный способ усиления напряжений — это строительство крупных водохранилищ, которые не только создают дополнительную нагрузку на породы за счет веса воды, но и повышают давление грунтовых вод, что уменьшает сопротивление пород трению. После 1935 г., когда было заполнено водохранилище Мид в Аризоне, в этом ранее асейсмическом районе за 10 лет произошло 600 толчков магнитудой 5,0. Водоохранилище Койна близ Бомбея было заполнено в 1967 г., после чего последовало множество землетрясений; во время одного из них, магнитуда которого достигала 6,5, были разрушены дома и имелись человеческие жертвы.

Многообещающий способ вызывания землетрясений был случайно открыт в Денвере (США). Здесь начиная с 1962 г. в скважину глубиной 3600 м, пробуренную в трещиноватых гранитах, стали нагнетать отработанные жидкости. За 80 лет до 1962 г. в этом районе было отмечено лишь три слабых сотрясения грунта, а с 1962 по 1968 г. здесь наблюдалось 610 мелких землетрясений. К счастью, Денвер — это район асейсмический. Причины сотрясений грунта были выявлены, и закачивание в породы отработанных жидкостей прекратили.

Удалось выявить очень четкую связь между количеством нагнетаемой жидкости и числом землетрясений: ежемесячно нагнеталось более 27 млн. л жидкости и происходило более 50 мелких

землетрясений. В основном сотрясения возникали в зоне разлома, как раз под забоем скважины, причем толчки начались ровно через семь недель после начала закачки. Выявился достаточно точный метод контроля мелких подвижек, происходящих на глубине в насыщенных жидкостью породах, которые пребывают в напряженном состоянии. Закачка воды в пласты, которую обычно применяют в нефтеносных районах с целью добыть больше нефти, чем может выделиться под собственным давлением пород, подтвердила полученные в Денвере результаты.

Таким образом, нагнетание воды может вызвать множество слабых сотрясений, которые компенсируют одно крупное. Высказывалось мнение, что замкнутые зоны разлома Сан-Андреас следует привести в движение подобным образом, прежде чем напряжения достигнут опасного уровня. Но кто осмелится искушать судьбу, играя с такой бомбой замедленного действия, как разлом Сан-Андреас?

Защита от землетрясений

Прогноз землетрясений недостаточно совершенен. Он позволяет лишь предположить, где следует ожидать крупное землетрясение, и с некоторой вероятностью определить срок, когда оно произойдет. В связи с этим крайне необходимы меры защиты от причиняемого землетрясениями ущерба, которые по существу сводятся к двум рекомендациям.

Во-первых, следует избегать явно опасных районов. Поскольку полная эвакуация из таких мест, как, например, города на Калифорнийском побережье, невозможна, требуется районировать их в достаточно крупном масштабе, чтобы свести риск к минимуму.

Во-вторых, необходимо обеспечить наивысшую надежность зданий в сейсмоопасных районах. Совершенно антисейсмических зданий не существует. Но достаточно стойкое к воздействию землетрясений здание спроектировать и построить вполне возможно.

Антисейсмические свойства зданий можно выявить, основываясь на опыте прошлых землетрясений. Едва ли не самыми неудачными постройками для сейсмического района являются глинобитные и деревянные дома с тяжелыми каменными крышами, столь широко распространенные в Азии и Южной Америке. Следует избегать значительных декоративных нагрузок в верхней части зданий, в том числе парапетов на верхних этажах. Во время недавнего землетрясения в Калифорнии было установлено, что двойные гаражи на первом этаже также значительно уменьшают прочность дома. Современные железобетонные здания обычно хорошо переносят землетрясения, но еще нет соответствующих инженерных расчетов для тех случаев, когда горизонтальное ускорение может оказаться соизмеримым с ускорением свободного падения, как это наблюдалось во время землетрясения в Калифорнии в 1971 г.

Возводя смелые современные сооружения из бетона в сейсмических районах, архитекторы, по-видимому, должны привносить в них долю здорового консерватизма и не забывать о материале, низкое качество которого может сыграть роковую роль при землетрясении. Во время землетрясения 1930 г. в Италии причиной разрушений явилось главным образом использование при строительстве тяжелой окатанной гальки, а при землетрясении в Скопье в 1963 г. множество обрушений было вызвано плохим скреплением бетона с непромытым заполнителем. Тот факт, что здания в Скопье «расплющились», свидетельствует также о слабых железобетонных перекрытиях, лежащих на неукрепленных кирпичных стенах. Плохой фундамент — залог возможных разрушений, будь то недостаточно плотно уложенная кладка или рыхлый грунт под зданиями, как в Ниигате в 1964 г.

Если же здание сооружено из доброкачественного железобетона, имеет стальной каркас, глубокий фундамент, легкую крышу и короткие дымовые трубы, оно всегда проявит антисейсмические свойства. Множеством примеров подтверждено, что если не принимать во внимание возможность возникновения пожаров, самыми безопасными при землетрясении являются деревянные постройки — бревенчатые избы и дома с деревянным каркасом. Японцы пришли к выводу, что рифленая сталь или рулонный пропитанный битумом картон представляют собой гораздо лучший кровельный материал, чем обычная черепица.

Отель «Империал», построенный в Токио как раз перед землетрясением 1923 г., был для того времени зданием, классическим по своей сейсмостойкой конструкции: здание имело глубокий фундамент, конусообразно сужалось вверх и завершалось крышей из легкой меди; в центре отеля был сооружен декоративный пруд, который спас его от пожара, возникшего после землетрясения.

Особенно много хлопот при землетрясениях приносят старые здания. Новые дома, как правило, сооружаются в соответствии с определенными стандартами, хотя это и повышает их стоимость. Снос старых построек и замена их новыми для обеспечения безопасности представляется слишком дорогостоящим делом и требует предварительной оценки размеров ущерба, который может нанести сильное землетрясение густонаселенному городу. Даже при высококвалифицированном проектировании трудно исключить возможность появления резонанса в высотных зданиях, и медленные сейсмические волны могут случайно совпасть по периоду с собственными колебаниями постройки.

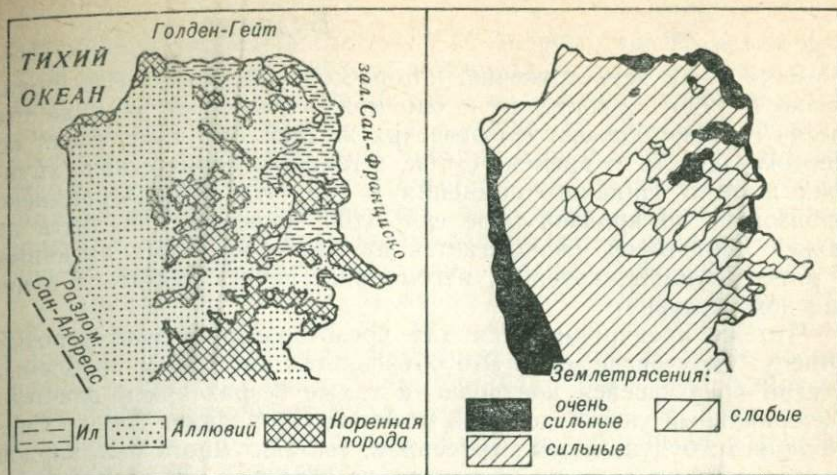
В скоростной железнодорожный путь на Хоккайдо (Япония) смонтированы сейсмографы, и поезд автоматически остановится, если сотрясения грунта превысят определенный уровень. Даже нечетко сформулированные прогнозы землетрясений можно использовать, например, для принятия решения о понижении уровня воды в водохранилищах и увеличить тем самым сейсмостойкость участка.

К сожалению, многие пренебрегают подобными прогнозами. Возможно, в управляемом обществе дело обстоит иначе. Но в Калифорнии, например, как показали недавние исследования, предупреждение о землетрясении приведет лишь к тому, что половина из тех немногих, кто обратит на него внимание, вообще ничего не предпримет, а большинство просто начнет молиться.

С учетом всего сказанного лучшей защитой от землетрясений надо считать районирование территории и выявление различных по степени сейсмоопасности зон. При этом первостепенное значение имеет изучение геологической специфики данной местности. Хотя при большинстве землетрясений наибольшие разрушения вызываются колебанием грунта, а не общим его смещением, важнейшим делом является обнаружение активных разломов, представляющих зоны очевидной опасности. Таким образом, первоочередная задача при районировании сейсмозон заключается в том, чтобы проследить все имеющиеся разломы. Эта задача осложняется тем, что разломы обычно образуют достаточно широкие, с ответвлениями полосы; кроме того, со временем могут возникнуть новые разломы, а старые, «устойчивые» нарушения могут сместиться.

Землетрясение 1971 г. в Сан-Фернандо возникло на разломе, который считали неактивным. Следовательно, при геологическом картировании необходимо регистрировать все разломы, независимо от их активности, а затем — при заселении территории — держаться от них подальше. В настоящее время в Калифорнии запрещается строить новые здания ближе 35 м от известных разломов, за исключением небольших домов на одну семью, которые могут быть построены на расстоянии 15 м от разлома. Если же положение разлома точно не определено, стараются вынести границы здания как можно дальше за предполагаемую зону разлома. Если все-таки необходимо осуществить строительство в зоне активного разлома, прибегают к различным конструктивным ухищрениям. Так, в акведуках, подающих воду в Лос-Анджелес, которые пересекают разлом Сан-Андреас, имеются подвижные соединения. Было отрадно узнать, что недавно отказались от планов возведения атомной электростанции на этом разломе (в районе Бодега-Хед), хотя для этого и потребовался значительный нажим со стороны специалистов по охране окружающей среды.

Несомненно, что наиболее важным критерием районирования сейсмозон для прогноза землетрясений и предупреждения их последствий является учет строительных свойств грунтов. Лучшими в этом отношении являются коренные породы, а худшими — неуплотненные, насыщенные водой молодые осадочные отложения. Чем прочнее порода, тем меньше потенциальный ущерб от землетрясения. Эта связь, хотя она с трудом поддается количественному анализу, служит наилучшим ориентиром для выделения зон относительной безопасности. В неуплотненных толщах



Разрушения во время землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско (справа) были приурочены к участкам пород со слабым фундаментом.

наиболее подвержены разжижению алевроиты и пески с зернами одинакового размера, особенно если эти рыхлые породы насыщены водой и залегают неглубоко. Установлено, что наибольшее усиление сейсмических волн наблюдается на тех участках, где рыхлые осадки залегают непосредственно на твердых коренных породах. Следовательно, при планировании расширения таких городов, как Токио и Сан-Франциско, следует учитывать распределение по площади различных типов отложений.

В качестве критериев районирования могут выступать также оценка возможности наводнений под воздействием цунами и учет опасности возникновения и масштабов оползней, связанных с движениями земной коры.

Как уже отмечалось, разлом Сан-Андреас в Калифорнии можно подразделить на активные и достаточно спокойные участки. Сан-Франциско и Лос-Анджелес расположены в потенциально опасных зонах. Но сегодня не может идти речь о перенесении зданий, а тем более городов, в другое место. Имеющиеся сведения можно использовать лишь при планировании новых застроек. Город Валдиз, разрушенный во время землетрясения на Аляске в 1964 г., был заново построен на коренных породах, тогда как раньше он располагался на рыхлых дельтовых отложениях. А вот в Манагуа (Никарагуа) избежать застройки «слабых грунтов», способствовавших разрушению города во время землетрясения 1972 г., оказалось практически невозможно. Город был восстановлен на прежнем месте. Единственная уступка природе заключалась в том, что участки, протягивающиеся вдоль пяти разломов, активизировавшихся в 1972 г., не застраивались.

Если такое землетрясение, которое обрушилось на Сан-Франциско в 1906 г., повторится, оно может унести от двух до ста тысяч (и даже больше) человеческих жизней. Это число будет во многом зависеть от времени суток, а также от количества рухнувших плотин. Никакого сомнения в том, что в Сан-Франциско произойдет по крайней мере еще одно землетрясение, быть не может: этот город располагается на одном из самых активных в мире разломов, который, несомненно, начнет двигаться в недалеком будущем.

Что же предпринимается для предотвращения этой угрозы? Отвечу: удручающе мало. Это объясняется масштабом проблемы, трудно поддающейся контролю, а также безразличием властей. Материальный ущерб, который может быть причинен городу Сан-Франциско будущим землетрясением, составит много миллиардов долларов, даже если не учитывать те огромные дополнительные потери, которые, безусловно, будут в сфере производства. И все же правильное планирование и расчеты могли бы в значительной мере сократить эти гигантские цифры. В результате проведенных недавно исследований было установлено, что в Калифорнии можно было бы уменьшить материальные потери на 38 млрд. долл., если затратить сейчас 6 млрд. долл. на реконструкцию и переселение. Стоит ли вкладывать такие средства, чтобы минимизировать ущерб от какого-то проблематичного стихийного бедствия, которое к тому же неизвестно когда произойдет? Положив на чашу весов бесценное сокровище — человеческие жизни, мы получили бы однозначный ответ.

Геология системы разломов Сан-Андреас изучена достаточно хорошо, и мы имеем возможность точно указать опасные участки, располагающиеся вдоль линий разломов. Но никто не хочет взять на себя ответственность за принятие соответствующих мер. Существует огромный разрыв между знаниями специалистов и общественной оценкой опасности и рентабельности мероприятий по планированию. Линия активных разломов, несомненно, является зоной самой непосредственной опасности в случае любого землетрясения. В настоящее время законы штата Калифорния запрещают вести строительство вдоль линий сброса; признается, что на этих территориях следовало бы разбивать парки, площадки для гольфа или даже прокладывать шоссе (без возведения на них больших мостов). Но так было не всегда, и ошибки прошлых лет не исправлены. Почему продолжается эксплуатация многих зданий, относительно которых хорошо известно, что они построены на активных разломах? Почему в пригородных районах к западу от Сан-Франциско сохраняются жилые массивы на двух участках в пределах разлома Сан-Андреас?

Еще хуже положение в Окленде, с внутренней стороны залива Сан-Франциско. Окленд находится на разломе Хейуорд — очень

активном ответвлении системы Сан-Андреас, где во время сильного землетрясения 1868 г. наблюдались заметные подвижки. Опасно строить на разломе жилые дома, но еще опаснее возводить там здания общественного назначения. И несмотря на это, в Окленде на полосе разлома Хейуорд расположено четырнадцать школ, две больницы и футбольный стадион студенческого городка Калифорнийского университета в Беркли. Опасность хорошо известна, но в силу инертности, беспечности и ряда других причин на нее не обращают внимания. То же самое наблюдается и в Анкоридже на Аляске. В отчете Геологической службы США за 1959 г. указывалось на возможную неустойчивость толщи Бутлеггер-Коув-Клей при землетрясении. Тем не менее на этих глинах в пределах плато Тернегейн-Хайтс были построены дома, а на плато Гавернмент-Хилл возведена школа. Во время землетрясения все это обрушилось. Сколько тогда было разговоров о происшедшей трагедии!

Какова же будет реакция населения, если разлом Хейуорд снова начнет двигаться под Оклендом и сотни людей погибнут под обломками двух больниц, четырнадцати школ и трибун стадиона?

Вулканы

* * *

В 4 ч пополудни 20 февраля 1943 г. крестьянин Дионисио Пулидо спокойно пахал поле неподалеку от своей деревни на западе Мексики. Вдруг земля пришла в движение, и почти мгновенно перед ним разверзлась узкая трещина длиной около 50 м. Крестьянин продолжал пахать, но час спустя из этой трещины вырвалась струя дыма, а еще через несколько минут дым стал сопровождаться резким свистящим шумом и облаками тонкой пыли. Дионисио поспешил в деревню рассказать о происходящем односельчанам. Когда они вместе с Дионисио прибежали на поле, из щели-жерла уже вылетала не только пыль, но и мелкие камни. Первый взрыв произошел в 10 ч вечера того же дня, из образовавшегося жерла летели камни и раскаленные глыбы. С ужасным грохотом и ревом вырвался столб пепла и взметнулся высоко в небо. Так родился вулкан Парикутин.

Нельзя сказать, что его появление было совершенно неожиданным. За две недели до этого дня сила подземных толчков, обычных для этой части Мексики, заметно возросла. Толчки сопровождались шумом, доносившимся из-под земли окрест деревни Парикутин. Во всем этом было что-то зловещее, предостерегающее и необъяснимое. Так продолжалось около двух недель — до начала извержения.

Как только на поверхности земли образовалось жерло, вулкан стал стремительно расти. Уже на следующее утро высота конуса вулканического пепла достигла 15 м. Через неделю она составила 120 м, а через месяц конус возвышался над полями более чем на 300 м и имел у основания ширину около полутора километров. Рост вулкана сопровождался многочисленными взрывами, слабыми и сильными землетрясениями. На землю падали вулканические бомбы, а столб пепла и пара нередко поднимался в небо более чем на полтора километра. Через четыре месяца кратер начал заполняться лавой и лавовые потоки стали изливаться из трещин по склонам шлакового конуса. Лава текла по земле со скоростью около 30 м/ч. Ее потоки разлились на расстояние до 5 км от жерла. Выбросы пепла и излияния лавы продолжались очень долго. Только через 9 лет извержения вулкана Парикутин прекратились. И как память на поле крестьянина Пулидо осталась гора пепла высотой 400 м. Лавовые потоки погребли деревню Парикутин и половину соседнего селения. На многие мили вокруг земля была покрыта тонким слоем пепла, который уничтожил всю растительность.

Извержение вулкана является, пожалуй, самым захватывающим зрелищем в природе. Извержение возникает там, где расплавленная порода или магма поднимается к поверхности земной коры. Магма образуется под воздействием высоких температур в локальных полостях на глубине, редко превышающей 120 км. К огромной массе расплавленного материала в ядре Земли она никакого отношения не имеет. Если горячая магма, поднявшись к поверхности, изливается в виде жидкой расплавленной породы, ее называют «лавой». Лава и вулканический пепел, представляющий собой обломки горных пород, — это два основных компонента любого вулкана. В остальном же различные вулканы имеют очень мало сходства. Парикутин, например, извергался в течение 9 лет, а затем его деятельность резко и полностью прекратилась, тогда как на побережье Италии довольно слабые извержения вулкана Стромболи начались еще в доисторическое время и продолжают до сих пор. Вулканы на Гавайских островах в течение многих веков постоянно извергают огромные количества лавы, а вулкан Кра-

катау стал знаменит благодаря своему единственному гигантскому извержению.

Сейчас в мире насчитывается около 500 вулканов, которые можно считать действующими, поскольку они извергались в историческое время. Значительно большее число вулканов относят к недействующим, так как известно, что они не извергались уже тысячи лет. Но такой вулкан в любой момент может снова стать действующим. Вулкан Ламингтон на Новой Гвинее считали недействующим, но в 1951 г. произошло сильное его извержение. Вулканы называют потухшими в том случае, если новое извержение произойти не может, т. е. изменение геологических условий сделало некогда активный вулкан совершенно безопасным.

Вулканы существовали почти во всех частях света и за многие миллионы лет извергли на поверхность Земли огромное количество горных пород. Весь остров Исландия представляет собой продукт извержения многочисленных вулканов. В настоящее время действующие вулканы встречаются лишь на вполне определенных, сравнительно ограниченных территориях. Возможно, это и хорошо, потому что, хотя извержение вулкана и представляет фантастическое, незабываемое зрелище, но для человека, оказавшегося в неподходящем месте в неподходящее время, это зрелище может стать последним. Ежегодно жертвами извержений вулканов становится в среднем почти тысяча человек. Это число включает не только сгоревших в лавовых потоках и задохнувшихся под пепловыми дождями, но и умерших от голода вследствие гибели урожая, засыпанного слоем горячего пепла.

Природа вулканической деятельности

Лаки и Везувий — это вулканы разных типов. Они различаются по характеру извержений, по созданным ими формам рельефа и по воздействию на живущих в их окрестностях людей.

Трещина Лаки представляет собой линию вулканических жерл длиной около 25 км, ориентированную с северо-востока на юго-запад. Она находится к западу от Ватнайёкюдль — самой крупной, увенчанной ледяной шапкой горы Исландии. Трещинные вулканы обычно выделяют огромные количества лавы, и в этом отношении Лаки не является исключением. Его извержение 1783 г. было самым лавообильным в мире. Извержение Лаки, которому предшествовал ряд землетрясений и выделений газа, началось 8 июня 1783 г. Поначалу из многочисленных жерл вырывались пепел и пар. Затем через три дня из юго-западного конца трещины стала изливаться лава, а в конце июля выделение лавы началось и в северо-восточной части трещины.

Лава представляла собой жидкий базальт, огромные массы которого быстро стекали вниз по долинам. Долина реки Скафтар была доверху заполнена лавой, хотя местами ее глубина превышала 180 м. Фронт лавового потока высотой 30 м продвинулся вниз по долине почти на 60 км. Кое-где лава выплеснулась через борт долины и разлилась по прибрежной равнине широким 15-километровым потоком. Другую долину — Хвервисфльоут — поток лавы заполнил на протяжении 50 км. За шесть месяцев вулканической деятельности из трещины Лаки излилось 12 км³ базальта, покрывшего площадь 560 км². На своем пути лава поглотила

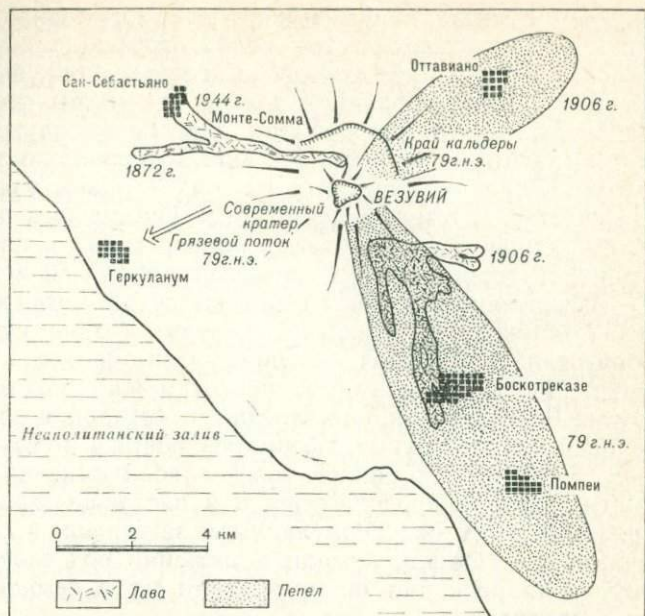
13 ферм. Поскольку лавовый поток редко течет настолько быстро, чтобы догнать человека, жертв, к счастью, было немного.

Однако другие страшные последствия достигли ужасающих масштабов. Реки, отклонившиеся от обычного течения под воздействием лавовых потоков, затопили огромные площади сельскохозяйственных угодий, а разогретый лавой ледниковый лед усилил это бедствие. Выпадавший пепел засыпал и уничтожал растительность. Над островом проносились огромные облака ядовитых сернистых газов. В результате погибло более четверти миллиона овец, коров и лошадей, т. е. три четверти всего поголовья скота. В такой изолированной сельскохозяйственной стране, какой была в XVIII в. Исландия, это привело к страшному голоду. Очень суровая зима и голод унесли около 10 000 человеческих жизней. Лаки стоил Исландии пятой части ее населения.

Везувий, находящийся на юге Италии, возможно, является сейчас одним из наиболее известных вулканов. Но в 79 г. н. э. это была конусообразная гора, возвышавшаяся над Неаполитанским заливом, которая считалась потухшим вулканом. Люди, жившие в близлежащих городах и деревнях, благоденствовали; Римская империя находилась в самом расцвете своего могущества. Удобные склоны Везувия были возделаны почти до самой вершины; плодородные почвы, которые обычно развиваются на вулканическом пепле, приносили богатые урожаи. И всему этому суждено было погибнуть.

Никто не придавал серьезного значения тому, что в течение 17 лет в районе Везувия происходили различные по интенсивности землетрясения: ведь землетрясения в южной Италии бывают довольно часто, а вулкан все считали потухшим. Рано утром 24 августа 79 года н. э. над вулканическим конусом Везувия поднялось облако из пепла и пара. На этот факт вначале мало кто обратил внимание. Продолжалась нормальная жизнь. Однако спокойствие быстро покинуло население, когда из Везувия начал вылетать и подниматься в небо пепел. Сильное извержение продолжалось два дня и две ночи. Тонкий пепел и обломки горных пород, так называемые лапилли, сыпались на окружающие деревни. В воздухе было так много пепла, что солнце полностью скрылось и наступила кромешная тьма; это еще больше усилило тревогу и замешательство людей. На улицу нельзя было выйти, не прикрыв голову подушками, потому что вместе с пеплом с неба летели крупные камни. Ядовитые вулканические газы затрудняли дыхание. Накопление статического электричества в поднимающемся султানে вулканического пепла вызвало сильные молнии. Не прекращались и землетрясения. Под действием цунами в Неаполитанском заливе море то отступало, то вновь обрушивалось на берег.

За сутки стихия совсем измотала людей; они устали, обесилели и решили, что наступил конец света. Тысячи из них в паническом страхе бросились прочь от Везувия на равнину или



Лавовые потоки и пепел, отложившиеся при крупных извержениях Везувия начиная с 79 г. н. э. и до наших дней.

уплыли в море на лодках. Поскольку почти везде в этом районе пепел накапливался относительно медленно, большинству людей удалось спастись.

Однако совсем иначе было в Помпеях. Этот город, расположенный с подветренной стороны от вулкана, был очень быстро засыпан пеплом. К тому времени, когда пришедшие в ужас жители осознали всю серьезность своего положения, улицы уже были погребены под толстым слоем пепла, а он все падал и падал с неба. Все это происходило в абсолютной темноте, солнечный свет не мог пробить пепловое облако. Население охватила паника, многие пытались спастись бегством, но было слишком поздно. . . Мягкий пепел на земле, пепел, низвергающийся с неба, сернистые пары в воздухе — это было уже слишком. Люди, обезумевшие от страха и ужаса, бежали, оступались и падали, погибая прямо на улицах, закрыв лица руками, и их мгновенно засыпал пепел. Некоторые решили остаться в домах, где пепла не было, но дома быстро заполнялись ядовитыми парами, и сотни людей погибли от удушья. Многие нашли свою смерть под развалинами домов, были раздавлены крышами, которые обрушивались под тяжестью пепла. Извержение Везувия уничтожило город. Помпеи скрылись по слою пепла толщиной до 3 м; каждый десятый житель из 20-тысячного населения города остался лежать под его руинами.

Расположенный по другую сторону от Везувия город Геркуланум не был засыпан падающим с неба пеплом, но он тоже был

обречен и исчез с лица Земли. Высоко на склонах вулкана скопились огромные количества пепла, грозящие обрушиться вниз, и когда в результате атмосферных нарушений, вызванных извержением, пошел проливной дождь, эти массы пепла размокли и начали оползать. По склонам понеслись полужидкие грязевые потоки, которые устремились вниз и полностью затопили Геркуланум. Глубина некоторых из этих потоков доходила до 15 м. На счастье, к тому времени, когда Геркуланум постигла гибель, уготовленная ему Везувием, большая часть населения успела покинуть город; там осталось всего около 50 человек.

Извержение неистовствовало двое суток. Когда же оно прекратилось, оставшиеся в живых увидели, что на вершине Везувия образовалась кальдера — огромный кратер около 3 км в поперечнике. Часть стены этой кальдеры можно видеть и сейчас, это Сомма-Везувiana, к юго-западу от которой возвышается современный конус Везувия, сформировавшийся в результате нескольких последующих циклов более слабой вулканической деятельности, которая продолжается и в настоящее время. Постепенно грязевой поток над Геркуланумом затвердел, и оба города, Геркуланум и Помпеи, лежали в забвении под слоем пепла до тех пор, пока раскопки не превратили их в сегодняшнее «золотое дно» археологии.

Лаки и Везувий служат примером того, сколь разными бывают вулканы. Эти различия почти всегда обусловлены составом магмы. Магма состоит главным образом из расплава силикатов различных металлов. Общее содержание кремнезема, обычно от 50 до 70 %, оказывает значительное влияние на вязкость магмы, насыщенность ее газами, а также на скорость течения лавы. При очень высоких давлениях, которые существуют на той значительной глубине от поверхности, где образуется магма, многие газы растворяются в силикатном расплаве. Но по мере продвижения расплавленной массы вверх давление уменьшается и газы могут выделяться из магмы. Если этого не происходит, магма оказывается насыщенной пузырьками, в которых газы находятся под огромным давлением. Для богатых кремнеземом магм характерно более высокое содержание газов, а сильная вязкость таких магм обычно ограничивает утечку газа. Поэтому при богатой газами магме происходит вулканическое извержение взрывного типа с образованием значительной массы пепла.

Низким содержанием кремнезема отличаются базальтовые магмы. Изливаясь из вулканов, они образуют чрезвычайно подвижные лавы. Лаки был типичным трещинным вулканом, базальтовая магма которого породила обильные лавовые потоки. При извержении базальтовой лавы из одного «центрального» жерла она распространяется по всем направлениям. Постепенно остывая и затвердевая, лава формирует огромную коническую гору. Однако благодаря хорошей текучести базальта конус такого типа обычно бывает относительно плоским — со склонами

от 2 до 10°. Характерными образованиями этого типа служат Мауна-Лоа и другие вулканы на Гавайях, которые названы щитовыми. Они резко отличаются от хорошо известных вулканов более четкой конической формы, таких как, например, Фудзияма в Японии, откосы которых составляют около 30°. Вулканы, подобные Фудзияме, называют стратовулканами. Большая крутизна склонов этих вулканов объясняется тем, что они образованы перемежающимися слоями лавы и пепла, выброшенных из центрального жерла, причем с удалением от кратера слои выклиниваются. Состав магмы стратовулканов также обычно базальтовый, причем низкая вязкость магмы обеспечивает постоянное выделение газов и распыление пепла без особо крупных взрывов.

Вулканы третьего типа являются почти чисто взрывными; они выделяют пепел и ограниченные количества лавы. Эти вулканы могут выглядеть и как небольшие шлаковые конусы, высота которых редко превышает 60 м, и как ярко выраженные взрывные формы (например, знаменитый Кракатау). Очень высокая вязкость богатой кремнеземом риолитовой магмы вулкана Кракатау вызвала временную закупорку жерла, из которого изливалась лава. В результате давление газа стало увеличиваться и нарастало до тех пор, пока не произошел взрыв.

Любой вулкан, независимо от того извергает он лаву или пепел, всегда (если только размеры его не очень малы) таит опасность, не поддающуюся контролю человека. Колумбийское плато занимает почти половину штата Вашингтон и обширные районы в Орегоне и Айдахо на северо-западе США. Это плато образовано лавами, излившимися из трещинных вулканов 20 млн. лет назад и покрывшими площадь около 130 000 км². В наши дни извержение такого масштаба было бы ни с чем не сравнимым бедствием. Современные вулканы Италии в более скромных размерах наглядно демонстрируют, какую опасность представляет излияние лав. Вулкан Этна на острове Сицилия — самый крупный в Европе. Этот стратовулкан находится в настоящее время в состоянии почти непрерывной активности. В 1971 г. очередная фаза его извержений началась с того, что из главного вершинного конуса стали выделяться пепел и лава. Лава уничтожила вулканологическую обсерваторию и разрушила лучшие лыжные трассы, а также канатную дорогу. Взрывная деятельность вулкана вызвала дегазацию магмы, и наступила спокойная фаза лавообразования. Лава, истекавшая из трещины на склоне Этны, залила виноградники и фермы, разрушив дома, дороги и мосты, но, к счастью, обошла наиболее крупные деревни.

Хотя лава, как и любая другая жидкость, обычно течет вниз по склону, она может внезапно изменить свой курс. Примером тому служат извержения Везувия. У этого вулкана, находящегося в материковой части Италии, наблюдалось несколько коротких фаз излияния лав. В 1906 г. из трещины на южном склоне горы появился лавовый поток, который частично разрушил деревню

Боскотреказе. В 1872 г. группа туристов в составе 22 человек поднялась высоко по склону, чтобы поближе взглянуть на извержение вулкана. Люди были настолько захвачены этим фантастическим зрелищем, что слишком поздно заметили два лавовых потока, которые, соединившись, отрезали им все пути к отступлению. Островок, на котором они стояли, был постепенно затоплен раскаленной лавой, и вся группа погибла.

Продукты извержения, вылетающие из вулкана, часто называют вулканическим пеплом, но правильнее будет называть их тефрой. Тефра состоит из материала различных размеров: из собственно вулканического пепла, т. е. частиц, не превышающих песчинки; лапиллей — от 1 до 5 см, а также более крупных образований — вулканических бомб и глыб. Глыбы представляют собой обломки коренных пород, а вулканические бомбы — это материал, извергающийся в виде огромных «капель» жидкой лавы, которые в воздухе приобретают округлую форму и затвердевают. Лапилли и вулканический пепел могут быть такого же происхождения.

Слой тефры, даже не такой мощный, как в Помпеях, может произвести катастрофические разрушения. Одного метра пепла достаточно для уничтожения всей растительности, что, несомненно, отразится на состоянии сельского хозяйства. Совсем мало надо пепла, чтобы нанести большой вред животным; они не только лишаются пищи, но и могут жестоко пострадать, съев вместе с травой распыленные вулканические продукты. Тысячи овец погибли в Исландии в 1970 г., когда в результате извержения вулкана Гекла (Хекла) земля была покрыта пеплом, насыщенным фтором, который оказался для животных сильнодействующим ядом.

Огромные количества тефры, накапливающиеся на крутых склонах конического вулкана, представляют собой весьма неустойчивую массу, особенно при увлажнении дождями, которые часто сопровождают извержение вулкана. Мелкообломочная тефра (вулканический пепел), не успев остыть, может уже начать движение вниз по склону в виде полужидкого грязевого потока. Грязевые потоки, подобные тому, под которым погиб Геркуланум, часто наблюдаются на вулканах Индонезии, где они известны под названием лахаров. В настоящее время примеров такого рода немного, однако доисторические вулканические грязевые потоки в Йеллоустонском национальном парке (США) покрывают площадь свыше 10 000 км².

Самые жидкие и подвижные грязевые потоки возникают, когда к пеплу внезапно примешиваются обильные массы воды, которые образуются вследствие таяния снега или льда. 500 лет назад на территории нынешних Соединенных Штатов Америки низвергся грязевой поток, получивший впоследствии название Электрон. Он возник на вершине вулкана Рейнир в результате таяния снега и мерзлоты, расплавленных горячей лавой, и хлынул на запад,

достигнув равнинных районов у Такомы, где сейчас располагается несколько городов. В 1877 г. при извержении растаяло ледяное поле на вершине горы Котопахи в Эквадоре. Талые воды смешались с неуплотненным пеплом и образовали жидкий грязевой поток, который разрушил деревню, находившуюся в 240 км вниз по его течению. Этот поток был настолько подвижным и с таким низким содержанием пепла, что это стихийное бедствие вполне можно было бы назвать наводнением. Катастрофы подобного рода, т. е. наводнения, вызванные вулканическим плавлением ледников, известны еще только в Исландии. Сейчас в Исландии под ледяными шапками скрыто два вулкана: под огромной Ватнайёкюдль — вулкан Гримсвётн и под меньшей Мирдальсйёкюдль — вулкан Катла.

В кратере Гримсвётн расположено озеро площадью 35 км², окруженное огромными ледяными уступами. В связи с таянием льда уровень воды в озере периодически повышается. Достигнув определенной отметки, вода начинает выливаться через подледниковые туннели и, растекаясь по пустующим землям прибрежной равнины, вызывает обширные наводнения. За несколько дней уровень воды в озере может понизиться более чем на 180 м, после чего снова начинает повышаться. Наводнения, порождаемые вулканом Гримсвётн, совершаются с определенной периодичностью, и их можно предсказать: до сильного наводнения 1934 г. они происходили каждые 10 лет, а после него — каждые 5 лет.

Наводнения, вызываемые деятельностью вулкана Катла, предвидеть труднее; они более мощные, опасные и происходят нерегулярно. В кратере вулкана Катла нет озера, но под ледяной шапкой собираются огромные массы талой воды. Во время наводнения 1918 г. сток талых вод Катлы составлял в течение двух дней около миллиона кубических метров в секунду, что в 2 раза превышает сток могучей реки Амазонки. К счастью, наводнение, вызванное вулканическим плавлением ледников на склонах Катлы, затронуло только почти незаселенную зандровую равнину, ведущую к побережью Исландии.

Считается, что вода и газ являются второстепенными продуктами вулканических извержений и не представляют особой опасности. Действительно, многие гейзеры — фонтаны горячей воды, рождаемые вулканами, — весьма популярны среди туристов в разных странах мира, например, Олд-Фейтфул в Йеллоустонском парке США или Большой Гейзер в Исландии. Однако известны случаи, когда просачивающийся газ убивал овец, пасшихся на склонах вулкана Гекла в Исландии; возможно, что именно газ послужил причиной гибели многих людей в Помпеях. Кроме того, газ и вода в форме пара при огромном давлении представляют собой взрывной механизм самых сильных и разрушительных извержений вулканов.

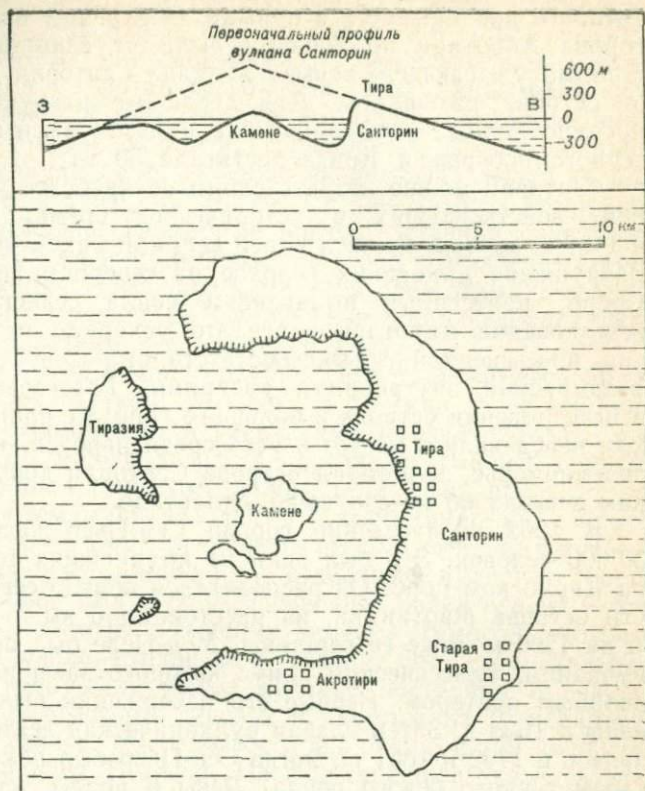
Сила вулканических извержений

Действующие вулканы можно сравнивать между собой по силе их извержений, которая бывает весьма разной. Извержения вулканов Санторин и Мон-Пеле были очень сильными, но, возможно, самым мощным в мире явилось извержение вулкана Кракатау. Остров Кракатау, лежащий в Зондском проливе между Суматрой и Явой, был лишь частью массивного стратовулкана, едва возвышающегося над уровнем моря; на острове имелось три жерла, заполненных андезитовой лавой и пеплом. Кракатау бездействовал два века, а затем внезапно 20 мая 1883 г. ожил. В течение трех месяцев происходили разные по мощности взрывы и возникали облака пепла.

На острове Кракатау не было населения. Люди, жившие на Суматре и Яве, уже почти привыкли к постоянной вулканической деятельности, когда 27 августа того же года произошло четыре сильнейших взрыва. Самым мощным из них был третий. Его грохот был слышен на расстоянии до 5000 км, а пепел был выброшен на такую высоту, что рассеялся по всей земной атмосфере. Вызванные взрывом цунами пронеслись по близлежащим побережьям, и город Мерак, расположенный в верховье конусообразной бухты, был смыт огромной 40-метровой волной. Эти гигантские цунами погубили более 36 000 человек. Большая часть острова Кракатау просто-напросто исчезла. Выпавший поблизости пепел на 95 % состоял из изверженного материала и лишь на 5 % из обломков горных пород; по-видимому, основная часть острова провалилась при обрушении кратера. Огромная мощность взрыва, вероятно, объясняется тем, что он произошел на уровне моря. На ранней стадии извержения, которая сама по себе была достаточно сильной, могли возникнуть трещины. По ним морская вода проникла в магматические камеры, где получилось огромное количество пара. Давления водяного пара и вулканического газа в вязкой магме оказалось достаточно, чтобы остров Кракатау взлетел на воздух.

Морская вода, возможно, сыграла свою роль и при грандиозном взрыве на Санторине — самом южном из островов архипелага Киклады в Эгейском море. В 1500 г. до н. э. диаметр острова составлял около 16 км, а в центре его возвышался огромный вулканический конус. Остров был густо заселен. Численность жителей города Акротири, занимавшего южную оконечность острова, достигала 30 000 человек. Это был один из главных городов минойской цивилизации, центром которой являлся остров Крит, расположенный в 110 км южнее. Остров Санторин представлял собой стратовулкан, который хотя и нельзя было считать потухшим, но вполне можно было отнести к числу недействующих.

Однако примерно в 1470 г. до н. э. положение изменилось: вулкан начал действовать. Землетрясения сотрясали остров, и



Дуга островов — это все, что осталось от вулкана Санторин после извержения, происшедшего более 3000 лет назад.

пепел взлетал высоко в небо. Сначала люди стойко переносили капризы стихии и не сдавались: они ремонтировали поврежденные дома и пытались смириться с дождем из вулканического пепла. Но в конце концов они отказались от борьбы и покинули остров, до сих пор в погребенном городе Акротири не найдено ни одного человеческого скелета.

Эвакуация была своевременной, поскольку вскоре Санторин взорвался. Давление заключенного в магме газа превысило сопротивление пород, и в воздух взлетело огромное количество пепла, пемзы и обломков камней. Мощность слоя тефры на некоторых участках острова достигла 60 м, и даже на Крите она составила около 10 см. По сей день все дно Эгейского моря покрыто довольно толстым слоем тефры. При взрыве вулкан Санторин обрушился. Его центральный конус провалился в огромную кальдеру, а изрезанный утесами край острова погрузился в море, глубина которого здесь составляла в среднем 300 м. Таким предстает сегодня перед нами Санторин. К нему добавился остров Камене, образованный в центре кальдеры небольшим вулканом, деятельность

которого продолжается и поныне. Обрушение кальдеры и гибель города Акротири под пеплом были не единственными последствиями ужасающего взрыва вулкана Санторин. Во все стороны от острова разошлись, неся страшные разрушения, огромные морские волны — вулканические цунами, высота которых у северного побережья Крита достигала 50 м.

Санторин можно назвать одним из наиболее коварных вулканов, действовавших в историческое время. Приблизительно к 1450 г. до н. э. пришел конец великой минойской цивилизации. Разрушение минойских городов на северном побережье Крита, ущерб, нанесенный выпадением пепла сельскому хозяйству, исчезновение Акротири — все это ускорило падение цивилизации, пресыщенной избытком богатств, стонавшей от гнета властей, раздираемой внутренними распрями. Рассказы о разрушении и исчезновении острова и большого города с благоговейным страхом передавались из уст в уста среди народов, населявших Средиземноморье, и история острова Санторин вошла в мифологию как легенда об исчезнувшей Атлантиде.

В 1902 г. население города Сен-Пьер насчитывало около 30 000 человек. Это был один из крупнейших торговых центров на Карибском море. Он располагался вблизи северной оконечности острова Мартиника, на расстоянии 6 км от горы Мон-Пеле и на 1200 м ниже ее вершины. Мон-Пеле был потухшим стратовулканом, классический конус которого завершался небольшим двойным кратером. Первые его извержения были зарегистрированы в 1635 г. Затем слабая вулканическая деятельность наблюдалась в 1792 и 1851 г., когда Сен-Пьер был покрыт призрачным слоем тонкого белого пепла. Лавы и пеплы, извергаемые Мон-Пеле, были представлены андезитами и дацитами. Этот факт в настоящее время, несомненно, вызвал бы беспокойство, поскольку магмы такого состава очень вязкие и в них могут накапливаться газы, что постепенно создает чреватое опасностями высокое давление.

Когда в первых числах мая 1902 г. началось новое извержение вулкана, никто еще не понимал масштабов реальной опасности. Окрестности содрогались от землетрясений, в земле разверзались зияющие трещины. На склонах горы забили, вырвавшись из недр, многочисленные горячие источники, а 5 мая 1902 г. стремительный грязевой поток из горячего пепла пронесся вниз по западному склону горы Мон-Пеле и уничтожил сахарный завод, мгновенно захоронив в своем жидком месиве 150 человек. Ночью пламя и султан из пепла над вулканом вселяли ужас в сердца людей, а на следующий день раскаленный докрасна пепел низвергся на город Сен-Пьер, покрыв его слоем толщиной в 30 см. Начались многочисленные пожары. Среди населения города поднялась паника.

Это не устраивало местные власти, поскольку через несколько дней, 10 мая, должны были состояться выборы. Поэтому с по-

мощью местной газеты было сделано все возможное, чтобы успокоить население. Утверждалось, что городу не грозит никакая опасность и поэтому нет необходимости покидать дома. Народ вроде бы поверил. . . Но на другой день, 7 мая, воцарился хаос. Раскаленный пепел и дым сделали пребывание в городе почти невыносимым. Многие корабли, стоявшие в гавани, снялись с якорей и покинули порт. Губернатор призывал людей не впадать в отчаяние, и даже сам переехал в Сен-Пьер из столичного города Форт-де-Франс. Некоторые жители оставили свои дома, но очень многие, наоборот, приехали в город с отдаленных ферм в поисках убежища. Население Сен-Пьера следовало бы эвакуировать, но этого сделано не было. Политика одержала верх над научными доводами и здравым смыслом.

В 7 ч 50 мин утра 8 мая гора Мон-Пеле содрогнулась от нескольких сильных толчков. Затем в 7 ч 59 мин из ее вершины вырвались две огромные тучи раскаленного газа и пепла. Одна из них поднялась высоко вверх, а другая устремилась вниз по склону. Насыщенная тяжелым пеплом, туча удерживалась у самой поверхности земли. По абсолютно прямой линии она с шумом скатилась вниз по склону, преодолела несколько низких хребтов и за 3 мин прошла расстояние в 6 км, отделявшее вулкан от города Сен-Пьер. . . «Город был в одно мгновение спален огнем», — так описывал эту катастрофу помощник эконома Томпсон, который находился на корабле, стоявшем в гавани. Эта стремительная палящая туча разрушила самые крепкие постройки в городе, вырвала с корнем огромные деревья и уничтожила 17 кораблей, не покинувших гавань. Уцелело всего два судна, в том числе то, на котором находился Томпсон. Но еще страшнее оказался всепожирающий жар; когда туча обрушилась на город, ее температура составляла почти 700 °С. Вода в гавани закипела. Меньше чем за минуту погибло 30 000 человек, в том числе и губернатор. Сначала из-за недостатка кислорода и избытка горячих газов пожаров не было. Они начались позже, когда в обугленный город вернулся воздух. Большинство людей погибли из-за того, что у них были сожжены легкие. Было обнаружено также множество сморщенных или раздутых трупов: содержащиеся в организме человека жидкости превратились в пар, а затем испарились.

Невероятно, но двум жителям города удалось выжить. Один из них находился в почти герметизированной камере смертников в городской тюрьме. Он сильно обгорел и оставался три дня без пищи и воды, пока его не спасли. Вторым оказался сапожник Леон Компер-Леандр, уцелевший в своем собственном доме благодаря случайному дуновению ветра, пахнувшего на него. Все окружавшие его люди погибли. Выжив, он рассказывал: «Я почувствовал ужасный ветер... Руки и ноги горели. . . Четверо, находившихся рядом, кричали и корчились от боли. . . Через десять секунд девочка упала замертво. . . Отец был мертв: его тело стало красным и раздулось. . . Обезумев, я ждал смерти. . .

Через час горела крыша. . . Я пришел в себя. . . и побежал».

Вслед за палящей тучей из вершины Мон-Пеле начала расти огромная башня, состоящая из почти затвердевшей лавы. Вскоре ее высота достигла 250 м, а диаметр составил 120 м. Три месяца спустя по восточному склону вулкана пронеслась еще одна раскаленная туча, убив еще 3000 человек. Через год башня из лавы превратилась в груды обломков, и извержения прекратились.

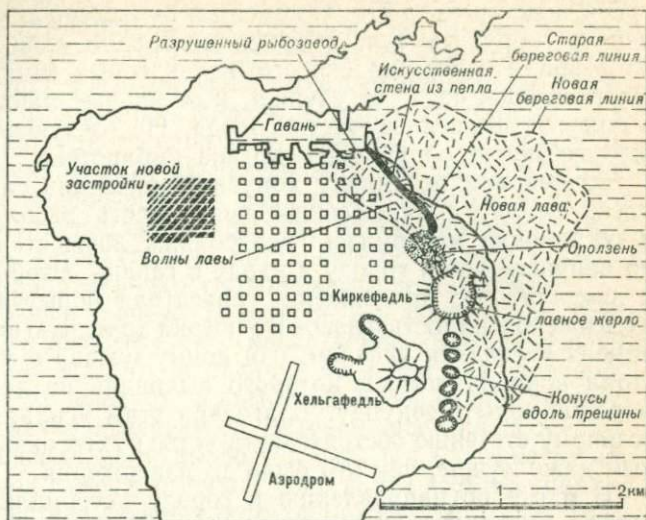
В Ост-Индии очень много активно действующих вулканов. В 1815 г. произошло извержение вулкана Тамбора на острове Сумбава, расположенном к востоку от Явы. Основной ущерб здесь был причинен растительному покрову: его уничтожил пепел, покрывший землю сплошным ковром. В результате погибли все посевы, и страну охватил голод. Точное число умерших от голода не установлено, но даже приблизительные цифры ужасающе велики — от 50 000 до 100 000 человек.

Вулкан Ламингтон на острове Новая Гвинея считали потухшим до тех пор, пока 15 января 1951 г. он не начал действовать. Частые взрывы следовали один за другим. Через пять дней особенно сильный взрыв за две минуты выбросил облако пепла на высоту 13 км. Одновременно развилась огромная ударная волна. Она промчалась над территорией площадью 230 км², мгновенно сровняв с землей вековые леса, полностью разрушив деревню Хигатура и уничтожив часть ее населения (2900 человек).

У всех этих извержений есть одна общая черта: они характерны для вулканов, имеющих более вязкую магму — риолитовую, дацитовую и иногда андезитовую. Такие лавы известны в отложениях всех геологических эпох. В палеовулканах, кроме того, встречается порода, называемая игнимбритом. Это — спекшийся пепел, который, по-видимому, был настолько раскален, что, падая на землю, мгновенно обращался в твердую породу. Когда-то считали, что такая пепловая туча, какая вырвалась из Мон-Пеле, образует игнимбриты. Но, очевидно, это не так; хотя температура тучи была, действительно, достаточно высокой, но из нее осаждалось очень мало пепла — руины города Сен-Пьер были покрыты лишь тонким его слоем. В наше время еще ни разу не наблюдалось игнимбритовое извержение. Это, возможно, и к лучшему, потому что известные нам древние игнимбриты покрывают огромные участки. Нельзя даже предположить, какие ужасные разрушения могло бы вызвать подобное извержение в густонаселенном районе.

Ущерб, наносимый извержениями

Исландцы привыкли к тому, что в различных районах их страны происходят извержения вулканов, но никогда еще вулкан не извергался так близко от одного из крупнейших городов Исландии, как это было в 1973 г. Вестманнаэйяр — главный рыбо-



Город Вестманнаэйяр на острове Хеймаэй, пострадавший во время извержения вулкана Киркефедль в 1973 г.

ловецкий порт страны. Он находится на острове Хеймаэй, самом крупном из группы вулканических островов Вестманнаэйяр, расположенных у южного побережья Исландии. Над городом возвышается гора Хельгафедль — вулкан, который в течение 5400 лет считался потухшим, но в 1973 г. проснулся. Целые сутки отмечались слабые сотрясения земной коры, затем в склоне горы Хельгафедль, как раз над городом, разверзлась трещина длиной 640 м, из которой начала изливаться лава. Это произошло ранним утром 23 января 1973 г. В тот же день длина трещины увеличилась до 1,5 км. Лава била из нее фонтаном высотой 100 м. К счастью, рыболовные суда находились в море, а почти все население острова — более 5000 человек — днем раньше было эвакуировано на материк. На острове оставались лишь несколько добровольцев, предпринимавших действия по защите города.

Лава стекала в море к востоку от гавани, и через две недели площадь острова увеличилась более чем на 2 км². Ежесекундно извергалось до 100 м³ лавы. Поскольку магма была достаточно вязкой и богатой щелочами, образовалось много пепла. Вскоре большая часть трещины оказалась закупоренной, и пепел продолжал вылетать только на одном участке, над которым вырос 200-метровый конус, получивший название Киркефедль. В течение первых двух недель пепел непрерывно падал на город и некоторые дома скрылись под его слоем. Оставшиеся в городе добровольцы счищали пепел с крыш домов, чтобы те не обрушились. 4 февраля возобновилось излияние жидкой лавы базальто-

вого состава, которая со скоростью 5 км/ч потекла к устью бухты, грозя перегореть его. С помощью бульдозеров удалось, сгребая пепел, соорудить вал, который преградил лаве путь к городу. 15 февраля обнаружилось, что в некоторых домах скопился газ. Один человек погиб от удушья, и остальные спасатели отступили в более возвышенные части города. На следующий день под тяжестью пепла обрушилась крыша библиотеки.

20 февраля по склону конуса Киркефедль сползла огромная масса пепла, прикрывавшая поверхность расплавленной лавы, и обстановка изменилась: все больше лавы стало стекать вниз по направлению к городу и входу в гавань. Чтобы охладить лаву и замедлить ее продвижение, спасатели попытались разбрызгивать над поверхностью лавового потока холодную воду. Этот эксперимент увенчался успехом, и к концу месяца в устье бухты уже стоял корабль, насосы которого выливали на лаву 3405 литров морской воды в секунду. Благодаря этим усилиям, а также счастливому стечению обстоятельств устье бухты оказалось защищенным даже лучше, чем это было до извержения.

В марте по направлению к городу устремились две лавовые волны, двигавшиеся со скоростью пешехода. Лава перелилась через воздвигнутую из пепла стену, разрушила 70 домов и один из трех рыбозаводов. Но спасатели не сдавались. Были установлены новые насосы. Теперь на западный конец лавового потока выливалось около 60 000 литров воды в секунду. За две недели каждый насос успевал охладить лаву в пределах зоны своего действия, после чего его переносили в другое место. Чтобы установить насосы, на горячую поверхность лавы нагребали бульдозерами пепел.

Через три месяца, к концу апреля, извержения вулкана Киркефедль прекратились, но каждый четвертый из 1200 домов Вестманнаэйяра был залит лавой или засыпан пеплом. В июле люди вернулись в город. Гавань — основной источник средств их существования — не пострадала. Многие из погребенных домов удалось откопать. Грунт был еще горячим, но пепел легко счищался, и даже блоки лавы можно было полностью удалить с дорог, поскольку лавовые потоки покрылись по периферии коркой закала и не спеклись с дорожным покрытием. С использованием вулканического пепла было выровнено лавовое поле к западу от города, и вместо немногих безнадежно поврежденных домов началось строительство новых зданий. Жизнь на острове Хеймаэй стала входить в свою колею. Но материальный ущерб, причиненный извержением вулкана, составил около 20 млн. фунтов стерлингов. Надо было изыскать средства для его возмещения, и правительство решило погасить половину этой суммы, введя на территории всей страны специальный налог. Этот налог взимался в течение года в размере 10 % личного дохода каждого исландца.

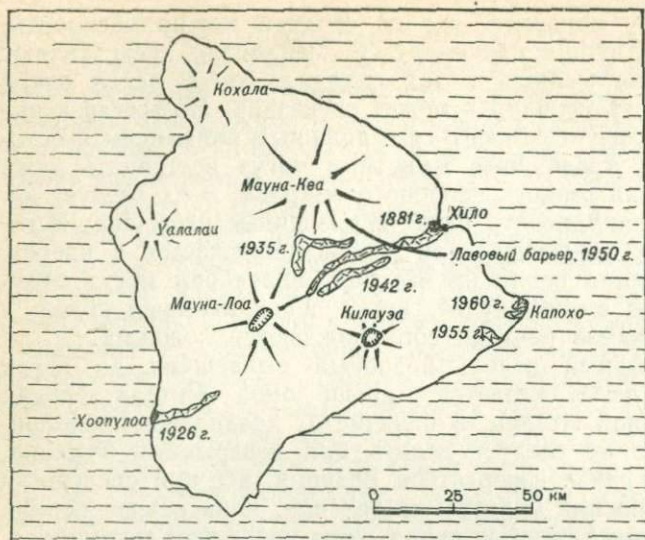
Извержение вулкана Киркефедль в 1973 г. и успешные мероприятия по минимизации ущерба, причиненного городу Вестман-

наэйяр, наглядно показали, что со стихией можно поспорить, что ей можно активно сопротивляться. Пеплопады представляют серьезную опасность лишь в тех случаях, когда пепел очень тяжелый или очень горячий и может спекаться. Но всегда к выпадению пепла следует относиться с должным вниманием и осторожностью. Так, травоядные животные могут пострадать даже при наличии очень тонкого пеплового покрова, и их следует незамедлительно эвакуировать на незагрязненные пастбища. В городских районах первоочередная задача заключается в предотвращении скопления пепла на крышах, иначе они могут обрушиться, особенно в том случае, когда пепел насыщен водой, а извержения вулканов нередко сопровождаются дождями.

Рыхлый холодный пепел, подобный выпавшему на город Вестманнаэйяр, легко сметается с крыш домов. Жители деревни Оттавиано в южной Италии, в отличие от исландцев, продемонстрировали, чего не следует делать при извержении вулкана. Когда в 1906 г. начал извергаться Везувий, все они поспешили в церковь и возносили молитвы до тех пор, пока крыша церкви не провалилась под тяжестью пепла, убив почти всех молящихся.

Опасное воздействие лавовых потоков можно уменьшить тремя путями: отклонив поток, разделив его на ряд более мелких потоков или вообще остановив его движение. В 1951 г. на японском острове Осима, к югу от Токио, произошло извержение вулкана Михара, и здание, известное под названием Како-Дзяя («Чайный домик на кратере»), было залито лавой. Здание устояло: расплавленный материал втекал в его окна с одной стороны и вытекал через дверь и окна на противоположной стороне. Тот факт, что непрочные стены здания не обрушились, навел местных жителей на мысль, что лаву можно сдерживать. И когда расплавленные массы стали заполнять кальдеру на вершине горы, грозя ринуться через ее неровный край на деревню Номаси, жители деревни построили стену. Они загородили опасную выемку в стене кальдеры и прорыли траншею в таком направлении, чтобы лава стекала вниз по незаселенному склону, не причиняя никакого вреда. Лава так и не достигла построенной стены, но действия жителей этой деревни явили собой пример здравого смысла.

Земляные стены могут так же хорошо препятствовать движению лавового потока, как и каменная кладка. В 1955 г. при извержении вулкана Килауэа, когда нависла угроза над деревней Капохо, основной поток лавы отклонился благодаря тому, что на его пути встала старая железнодорожная насыпь. Стены из земли и пепла, воздвигнутые при помощи бульдозеров, прекрасно отводят лавовый поток. Стены следует располагать под углом к течению потока, и если рельеф местности позволяет потоку изменить направление движения, он не причинит значительных разрушений. Если нет осложняющих условий, высота таких стен может не превышать 3 м. Опыт, проведенный на Гавайских островах, показал, что стены все-таки лучше возводить из круп-



Остров Гавайи; на карте показаны некоторые лавовые потоки с вулканов Мауна-Лоа и Килауэа, угрожавшие прибрежным городам и деревням.

ных и тяжелых глыб, поскольку пепел может быть размыт лавой. Однако и стена из пепла, построенная на вулкане Киркефедль в 1973 г., была хорошей защитой до тех пор, пока ее полностью не перекрыла лава.

В 1669 г. во время извержения вулкана Этна на острове Сицилия лавовый поток угрожал городу Катания. Как обычно, поток образовал берега — валы, сложенные застывшей с поверхности лавой. Горожане поняли, что если удастся сделать пролом в одном из берегов лавового потока, то его разрушительная сила может быть ослаблена в результате образования бокового ответвления. Вооружившись железными ломом и накиннув на себя сырые воловьих шкуры, жители города Катания размочили участок берега и отвели часть лавового потока. Но, к сожалению, они не рассчитали последствий, и поток устремился к другому городу — Патерно. Произошло столкновение жителей этих двух городов, искусственный пролом был засыпан. Лава снова потекла на Катанию и разрушила часть города.

В 1935 г. на Гавайских островах подобным образом был отведен лавовый поток с вулкана Мауна-Лоа, угрожавший городу Хило. Была успешно проведена бомбардировка потока с самолетов, через образовавшиеся в береговых валах проломы лава разлилась по склонам горы и затвердела, вскоре застыли и остатки лавы в первоначальном русле. Поток, двигавшийся к городу Хило, был полностью остановлен за два дня. Расположение Хило крайне неудачное: этот город находится на естественной

прямой линии, по которой движутся все лавовые потоки с вулкана Мауна-Лоа. В 1942 г. для отвода лавы, угрожавшей городу, снова применили бомбардировку. Для изменения пути лавовых потоков и предотвращения возможного ущерба было предложено повести на склоне горы над городом Хило стены. Но до сих пор средств для финансирования этих работ не найдено.

Бомбардировку можно применять также для того, чтобы проломить одну из стен кратера и пустить поток лавы в безопасном направлении. Этим методом воспользовались и при извержении вулкана Киркефедль в 1973 г. Но вскоре бомбардировка была прекращена во избежание проникновения морских вод с их гигантской взрывной активностью в подземные лавовые резервуары.

В 1960 г., когда деревне Капохо угрожало извержение вулкана Килауэа, старшина местной пожарной команды был поднят на смех властями за то, что приказал обливаться водой наступающую на деревню лаву. Он полагал, что лава будет охлаждена и застынет. И ему удалось доказать, что даже небольшое количество воды может сыграть важную роль в предотвращении катастрофы. Тринадцать лет спустя его смелому примеру последовали исландцы во время извержения вулкана Киркефедль. Мы уже отмечали, каких успехов им удалось достичь. Оказывается, человек способен остановить даже мощнейший лавовый поток.

Лавы обычно движутся относительно медленно, но для задержания грязевых потоков, образуемых массами рыхлого пепла, сползающими по склонам вулканов, необходимо использовать самые разнообразные защитные сооружения. Низвергающийся с большой скоростью жидкий грязевой поток легко залетит невысокую земляную плотину. Вероятно, единственный способ остановить мощный грязевой поток заключается в том, чтобы направить его в водохранилище, где уровень воды заранее понижен в соответствии с прогнозными расчетами. Успех этого мероприятия, естественно, зависит от технических характеристик и качества плотин.

Возможно, что этот метод защиты окажется эффективным, если возобновится деятельность вулканов в Каскадных горах на северо-западе США. В Индонезии, где наблюдаются самые сильные вулканические грязевые потоки, поблизости от некоторых деревень возведены искусственные холмы, на которых могут спастись люди. Извержение индонезийского вулкана Келуд сопровождалось разрушительными грязевыми потоками. В 1919 г. поток, порожденный большим кратерным озером этого вулкана, перелился через неудачно сконструированную защитную плотину; при этом погибло более 5000 человек. Впоследствии голландские инженеры проложили дренажные туннели через стену кратера, чтобы понизить уровень озера. Этот проект вполне оправдал себя. В 1951 г. во время аналогичного по силе извержения грязевые потоки не возникли и погибло только семь человек. К сожалению, при этом извержении дренажные туннели были

повреждены, и глубина озера в кратере заметно возросла. Для понижения уровня воды был прорыт другой туннель на большей глубине, и вода стала стекать в него. Однако этого туннеля оказалось недостаточно для необходимого понижения уровня озера в кратере и при извержении 1966 г. образовались крупные грязевые потоки, которые погубили сотни людей. В 1967 г. был прорыт еще один туннель, и озеро было почти полностью осушено. Угроза миновала.

Борясь с пеплопадами, грязевыми и лавовыми потоками, следует помнить, что потенциальные силы, таящиеся в недрах вулканов, могут быть значительно выше сил человеческих. Особенно мощные лавовые потоки бывают неодолимыми, человек не имеет возможности защититься и от извержения типа «палящей тучи», независимо от того, образуются при нем игнимбриты или не образуются. Единственное спасение в этом случае — бежать, и как можно быстрее.

10 октября 1961 г. все население Тристан-да-Кунья — крошечного острова в Атлантическом океане — было вынуждено покинуть свои дома: вблизи единственного населенного пункта на острове пробудился вулкан. Это извержение не было крупным по мировым стандартам, но для крошечного островка и этого было достаточно. Лишь два года спустя жители острова смогли вернуться в свои дома.

Несколько лет назад было эвакуировано население острова Гвадалупе в Карибском море. В августе 1976 г. произошло извержение вулкана Суфриер. На его склоне разверзлась трещина, из которой поднимались мощные струи пепла. Особенно опасались того, что вулкан Суфриер, где магма так же богата кремнеземом, как и на Мон-Пеле, может породить «палящую тучу», аналогичную той, которая разрушила Сен-Пьер в 1902 г. А у подножья вулкана Суфриер мирно текла жизнь в старом городе Бастер. Поскольку вулкан продолжал извергаться, выбрасывая пепел и обломки, 72 000 человек были поспешно эвакуированы в отдаленную часть острова, прочь от угрозы «палящей тучи» и мгновенной гибели. Хотя извержение вскоре прекратилось, и люди смогли вернуться в свои неповрежденные дома, несомненно, что эвакуация в данном случае была единственной правильной профилактической мерой. В подобных ситуациях надо не только оценить опасность, но и предсказать ее вероятность, что является очень трудной задачей.

Прогноз вулканических извержений

Вулканы распределены по всему миру не хаотично, они приурочены к строго определенным зонам. Это, безусловно, хорошо для тех стран, которым не грозит и никогда не будет грозить



Приуроченность вулканов к границам плит.

извержение вулкана, и плохо для других, на долю которых выпали все опасности, сопряженные с вулканическими извержениями. На карте, насчитывающей около 500 действующих вулканов, четко вырисовываются вулканические пояса, причем львиная доля вулканов приходится на Тихоокеанский пояс. Еще один отчетливый пояс протягивается посредине Атлантического океана. Эти два вулканических пояса сопутствуют распределению сейсмических зон и границам плит земной коры. Подобно землетрясениям, извержения вулканов обычно бывают приурочены к границам плит. Огромные геологические силы действуют там, где наблюдаются движения плит земной коры относительно друг друга. Тихоокеанское «Огненное кольцо» и Срединный Атлантический хребет являются хорошо известными границами плит; по контурам Средиземноморья также есть вулканы. Имеются и другие вулканические области, особенно много вулканов в восточной Африке. Здесь они приурочены к системе Рифт-Велли, которая, возможно, представляет собой очень молодую границу плит. В этом месте Африка могла бы расколоться, если бы она не испытывала мощного сжатия со стороны других плит.

Но есть еще вулканы, расположение которых является исключением из правила. Так, временно не действующие вулканы нагорья Тибести в Сахаре, а также лучше изученные и более активные вулканы на Гавайских островах находятся как раз в центре плит. Будучи совершенно не связанными с границами плит, они обязаны своим происхождением так называемым «горячим точкам» в недрах Земли, которые в этих местах как бы прожгли отверстия в вышележащих плитах.

Поскольку большинство вулканов располагается на границах плит, характер этих границ может указывать на то, вулканы какого типа следует ожидать в том или ином районе. Срединный

Атлантический хребет представляет собой границу расходящихся плит, где расплываются в разные стороны две половины Атлантики и вулканы образуют новую кору в зоне расширения (спрединга). В этом случае магма поступает из глубинных частей мантии и поэтому состоит почти исключительно из базальта. Очень жидкий материал с низким содержанием кремнезема образует подвижные лавовые потоки с относительно слабой взрывной силой, что типично для вулканов Исландии.

Иная картина наблюдается в Тихоокеанской области, где располагаются границы сходящихся плит. Здесь одна из плит перекрывает другую, разрушая ее, и при этом огромные количества залегающих на поверхности пород увлекаются на глубину. На глубине температуры достаточно высоки для плавления пород и образования магмы, состав которой на границах сходящихся плит может быть практически любым. Гораздо более важен тот факт, что в этой зоне могут формироваться вязкие, богатые кремнеземом магмы с высоким содержанием газа. Такие магмы обычно приводят к более сильным извержениям взрывного типа. Вулканам островных дуг, находящимся очень близко от границ плит, как, например, в Вест-Индии * и Ост-Индии, обычно и присущи богатые кремнеземом риолиты. А когда мы имеем дело с подобным вулканическим материалом, следует ожидать извержений такой же огромной силы, какой обладали вулканы Мон-Пеле и Кракатау.

Эти обобщенные геологические выводы никоим образом не могут помочь в прогнозе конкретных извержений, но они служат основой для оценки опасности в том или ином вулканическом районе. Парадоксально, но вулканы, вызывающие столь сильные разрушения, приносят человеку и пользу. Почвы, развивающиеся на вулканическом пепле, очень плодородны и способствуют интенсивному развитию сельского хозяйства. Земли вокруг Везувия и Этны и на их склонах всегда успешно возделывались. Благодаря богатым вулканическим почвам на острове Ява даже склоны Мерапи — одного из самых активных и опасных вулканов в мире — густо заселены. Филиппинский вулкан Тааль расположен на острове в озере; в 1965 г. произошло его сильное извержение, многие жители острова были вовремя эвакуированы и тем самым спасены. Но спустя лишь два дня они вернулись на остров.

В подобных ситуациях огромное значение имеют своевременная оценка степени риска и выделение наиболее опасных зон. Это необходимо и для того, чтобы свести к минимуму размеры массовой эвакуации, когда надвигается опасность извержения. Основой для оценки степени риска являются геологическое и историческое изучение предшествовавших извержений, прогноз возможности возникновения грязевых потоков, определение масштабов лавовых потоков. Для этого привлекаются сведения о предполагаемом составе и вязкости магмы, а также результаты

* Багамские, Большие и Малые Антильские острова.



Станция Уэно в Токио после землетрясения 1923 г. Пожар завершил разрушение домов.



Постройки, разрушенные в результате токийского землетрясения 1923 г., жертвами которого стали более 140 000 человек.



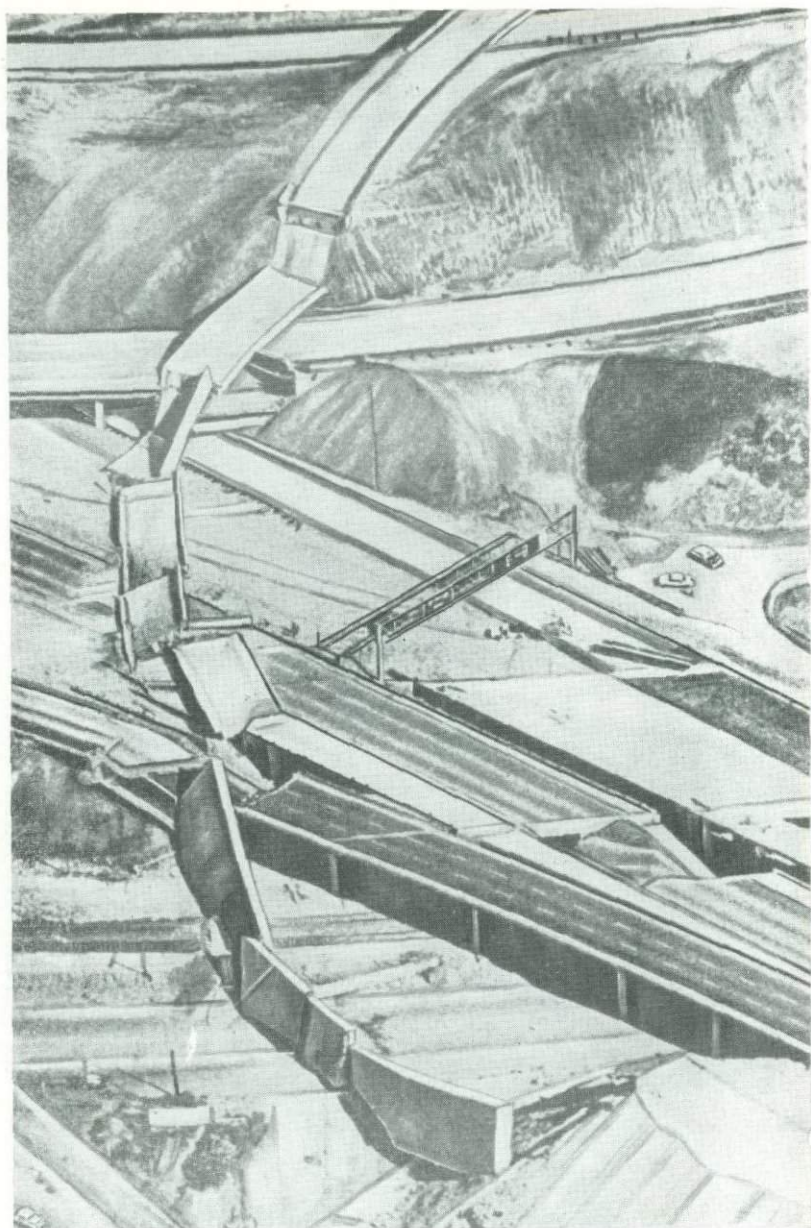
В 1962 г. ледяная лавина сорвалась с горы Невадос-Уаскаран, промчалась вниз по долине Льянгануко и обрушилась на деревню Ранрайрма. Благодаря тому что на пути лавины оказался хребет (показан стрелкой), город Юнгай (слева от сфотографированного участка) не пострадал.



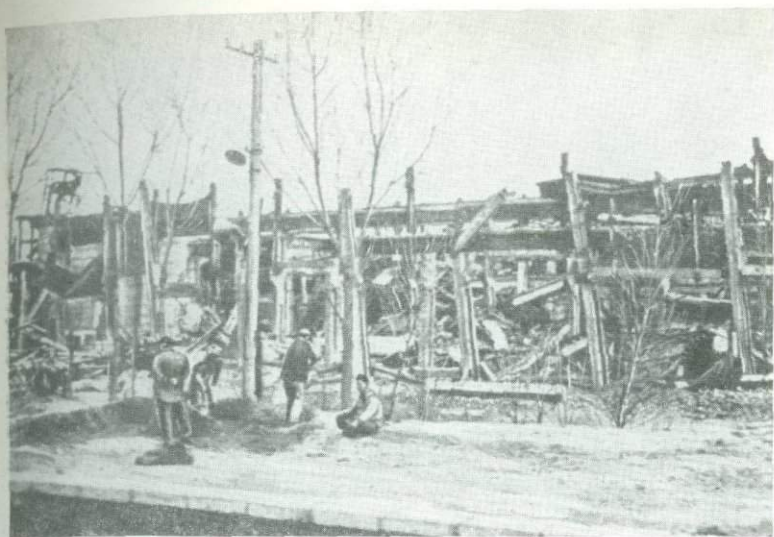
В 1970 г. еще один оползень с горы Невадос-Уаскаран, вызванный землетрясением в Перу, пронесся над седловиной (показана стрелкой), и обломочный материал засыпал город Юнгай.



Среди обломков Иранского землетрясения 1965 г.; полностью разрушено множество глинобитных домов.



Во время землетрясения 1971 г. в Сан-Фернандо была разрушена скоростная автострада с транспортными развязками; ее конструкция совершенно не подходила для сейсмического района.



Редкий фотоснимок ужасных разрушений на железнодорожной станции; сделан из окна поезда после землетрясения в Танишане 1976 г.



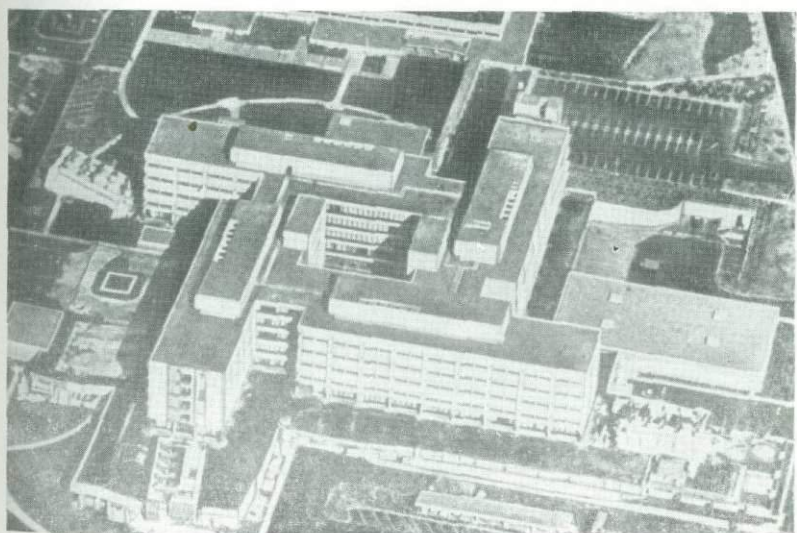
В 1976 г. все население Пекина много дней и ночей провело под открытым небом на улицах города; предсказывалось землетрясение, но оно так и не произошло.



Одно из последствий знаменитого землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско; большинство домов на этой улице покосились так же, как дом на фотоснимке.



Справа от шоссе, почти параллельно ему видна линия разлома Сан-Андреас. Жилые массивы, располагающиеся между дорогой и холмами, находятся на зоне разлома.



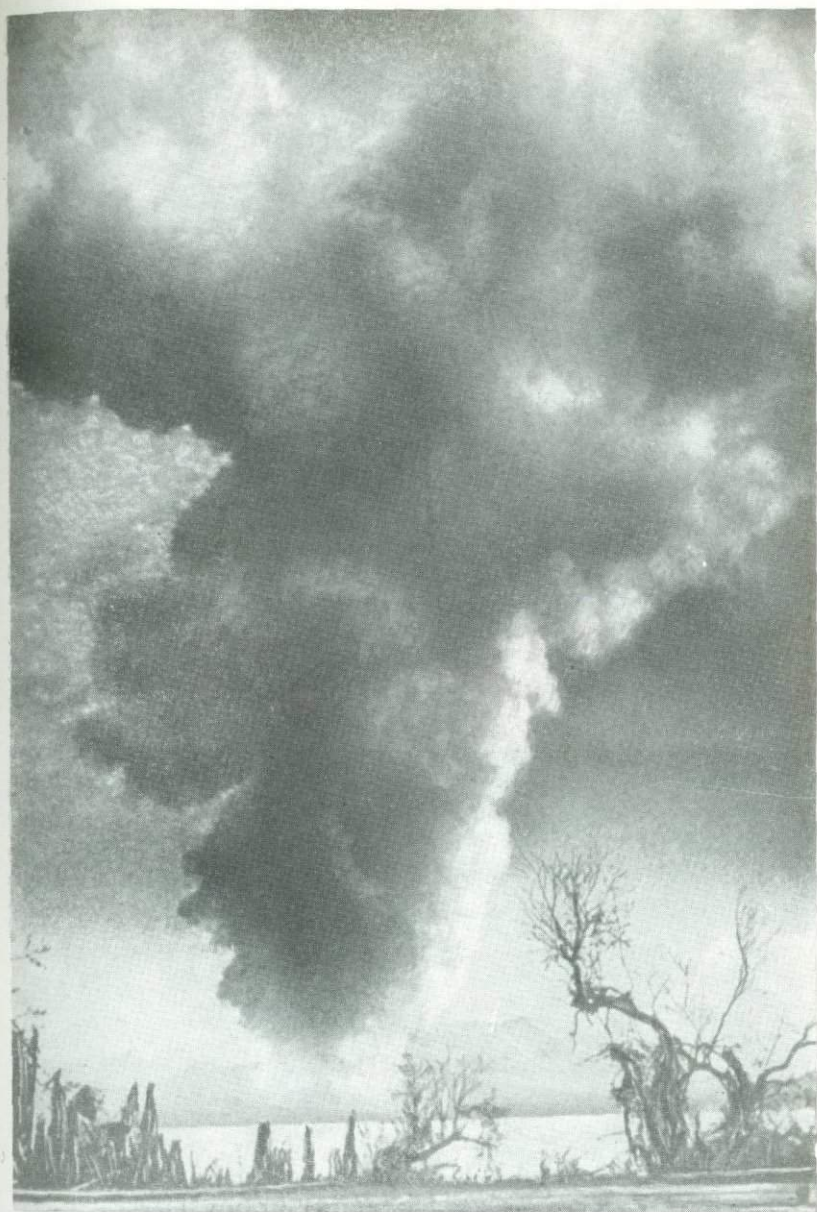
Больница Олив-Вью в Сан-Фернандо после землетрясения 1971 г.; лестничные блоки отвалились от крыльев здания.



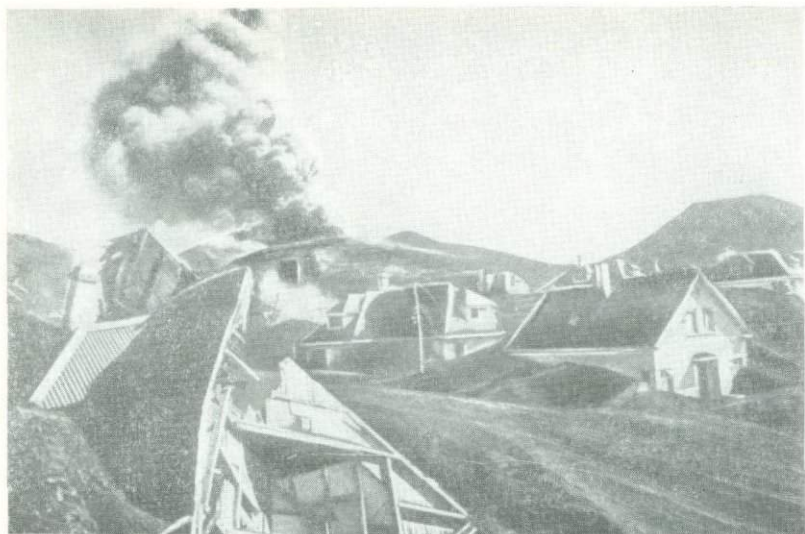
Вследствие вибрации при землетрясении в Каракасе обрушилось многоэтажное бетонное здание, остались целыми только его горизонтальные перекрытия.



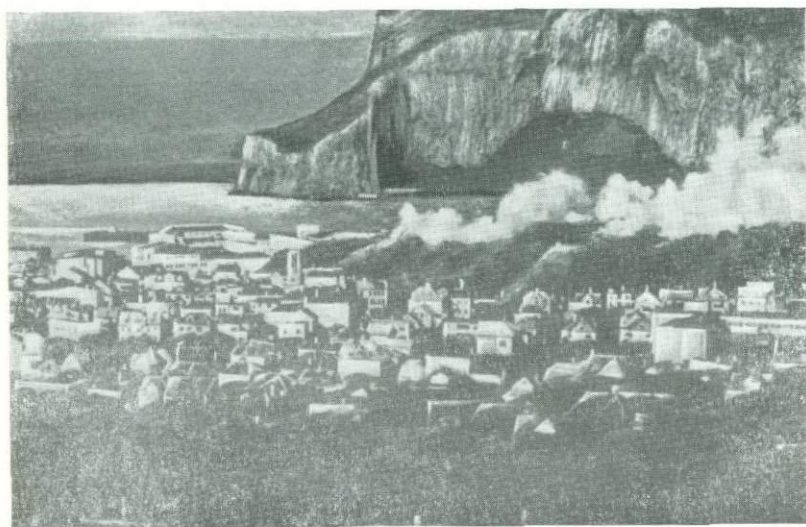
Школа на плато Гавернмент-Хилл в городе Анкоридж сильно пострадала во время землетрясения 1964 г. вследствие оползания конгломератов и глин, на которых она была построена.



Вулкан Тааль вступил в новую фазу активности, и на берег озера обрушился ливень пепла.



Дым, поднимающийся из отдаленного вулкана Киркефедль, и дома в Вестманнаэйре, наполовину засыпанные пеплом.



Город Вестманнаэйр был покрыт пеплом, но основной ущерб нанес лавовый поток, который залил восточную часть города, угрожая перегорсдить гавань.



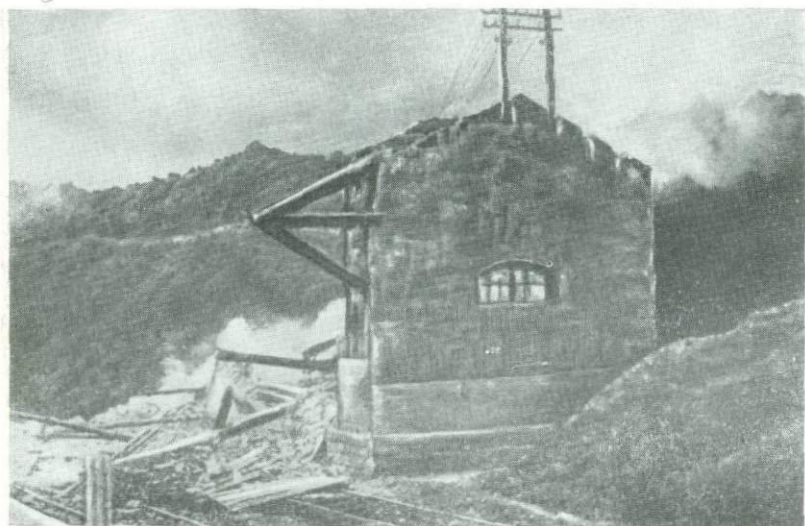
Во время извержения Везувия в 1944 г. образовалось облако пепла, но оно не нанесло никакого ущерба Неаполю, расположенному у подножья вулкана.



Всплески лавы (видны за деревом) предвещают скорую гибель домов близ деревни Капохо на о. Гавайи.



Руины города Сен-Пьер близ Мон-Пеле под покровом вулканической массы после сильного извержения в 1902 г.



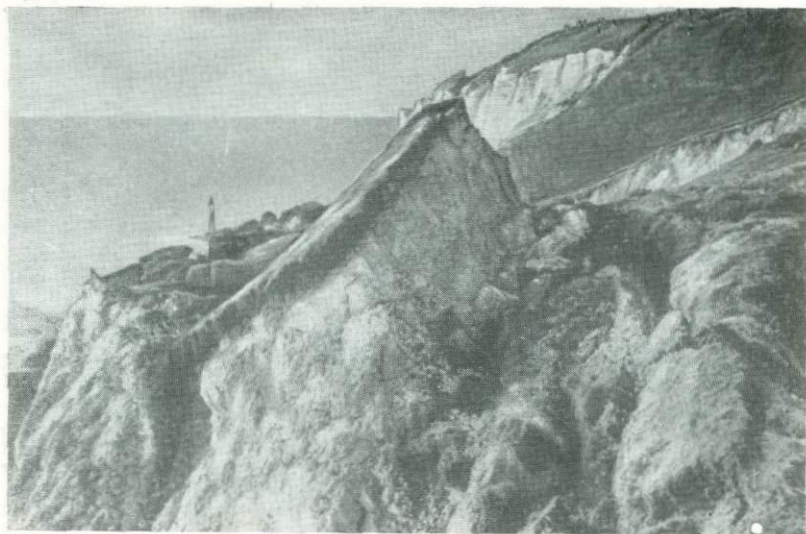
Поток лавы, стекающий со склонов вулкана Этна (1928 г.), заливал железнодорожную станцию в итальянской деревне Маскали.



В 1977 г. при оползне на дороге, идущей по склону горы Мам-Тор, образовался почти метровый уступ.



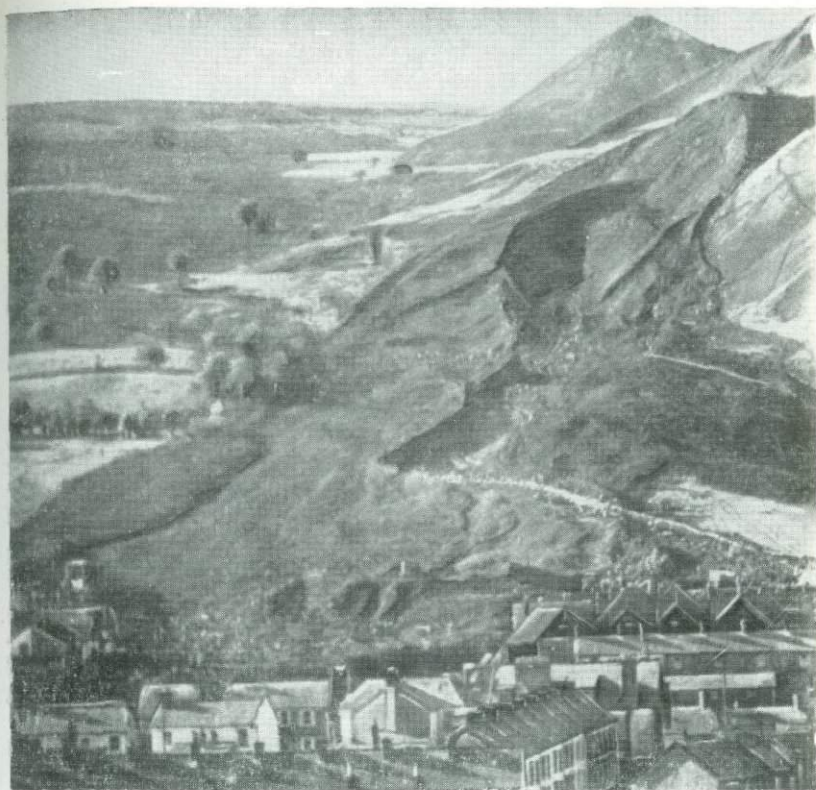
Коттеджи на вершине утеса в Скипси (Хамберсайд) расположены на опасном месте: неустойчивые утесы, разрушаемые водами Северного моря, уже неоднократно обрушились.



Оползни разрушают прибрежный участок в Бичи-Хед (Суссекс).



Этот дом на южном берегу острова Уайт был разрушен в 1978 г.; он продолжил длинный список строений, пострадавших здесь от оползней.



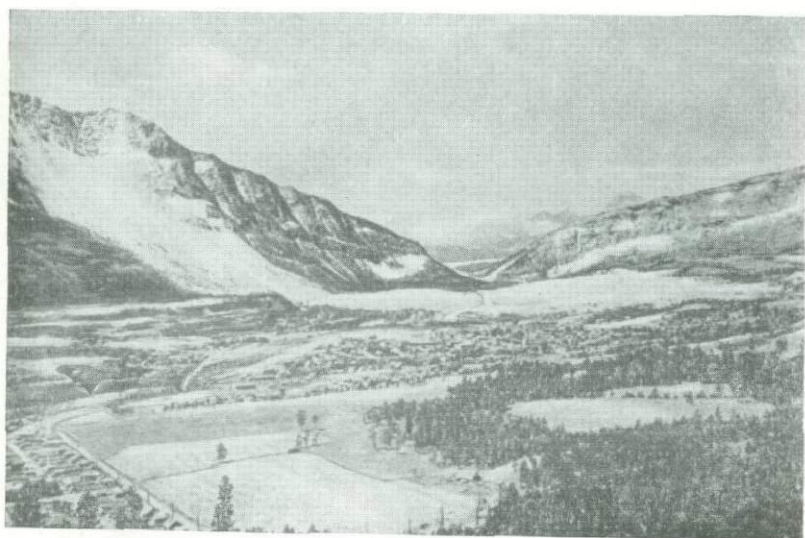
В 1966 г. оползшая часть террикона низверглась на поселок Аберфан и засыпала школу, где находились 109 учащихся.



После оползня на разрушенной поверхности террикона появилась вода — истинная причина катастрофы в Аберфане.



Разрушенные здания и груды обломков — последствия оползня, происшедшего в 1955 г. в канадском городе Николе.



Место возникновения сильного камнепада в городе Франк (Канадские Скалистые горы).

изучения топографии вулкана. Склоны вулкана Келуд в Индонезии подразделены на зоны по степени опасности возникновения грязевых потоков, а вулканы Гавайских островов размечены на зоны по вероятности затопления лавой. Самые лавоопасные площади на острове Гавайи располагаются вдоль активной рифтовой зоны Килауэа. Здесь для каждого дома есть риск (один из сорока) быть разрушенным лавой в ближайшие 25 лет. Архитекторы и инженеры могут использовать эту цифру при планировании строительных работ.

Вулканы Каскадных гор на северо-западе США также изучались с целью подразделения их на зоны по степени риска; это тем более важно, что в этом районе находится несколько крупных городов. Прошлый опыт показал, что примерно раз в 100 лет какой-либо из вулканов извергается. В самых опасных зонах лавовые потоки могут распространяться вниз по долине на расстояние до 15 км от источника, грязевые потоки — до 20 км, а пепел по ветру — на 40 км. Кроме того, вулканы Каскадных гор достаточно богаты кремнеземом, что может обусловить сильные извержения. Но возможность поистине грандиозного катастрофического извержения настолько маловероятна, что с экономической точки зрения ее даже не следует принимать во внимание.

Прогноз вулканической деятельности — трудное и дорогостоящее мероприятие, хотя затраты на него себя оправдывают, если учесть, какой колоссальный материальный ущерб наносят извержения вулканов. Даже в небольшом масштабе давать прогноз нелегко, поскольку мы имеем дело со стихией. Так, в 1976 г. два англичанина поднимались на относительно спокойный вулкан Сангай в Эквадоре и погибли, когда совершенно неожиданно дождь вулканического пепла на мгновение сменился ливнем обломков раскаленной докрасна лавы. Истинную потенциальную опасность вулканической деятельности, даже относительно слабой, предсказать трудно. И меры защиты бывают иногда весьма необычными. Например, во время извержения Этны в 1971 и 1974 г. итальянской полиции пришлось дубинками разгонять толпы туристов, рвущихся к огнедышащему потоку лавы.

При малых масштабах непосредственной опасности любой прогноз, способствующий сохранению жизни людей, является приемлемым и ценным. Но при крупных масштабах бедствия вулканологи стелквиваются с другой проблемой: тревожные сигналы о катастрофах, происходящих в отдаленных районах, поступают лишь тогда, когда уже поздно что-либо предпринимать. В большинстве случаев прогнозы не могут быть точными, а ведь после массовых эвакуаций, вызванных ложными тревогами, на оповещения о стихийных бедствиях население просто перестает обращать внимание. Если вулкан не извергается постоянно, людей очень легко успокоить. Об этом свидетельствует хотя бы успех воззвания «Не надо паники!», обращенного к жителям города

Сен-Пьер перед его разрушением в 1902 г. Обнадеживает тот факт, что наука о предсказании извержений вулканов в наши дни начинает давать многообещающие результаты.

Самый точный прогноз вулканических извержений, очевидно, можно было бы составить, изучая цикличность вулканической деятельности или анализируя последовательность связанных с нею событий. Но, к сожалению, первый способ редко бывает действенным, поскольку ни один вулкан мира не продемонстрировал до сих пор четко выраженной цикличности извержений. Поэтому время следующего извержения конкретного вулкана трудно предсказать с разбросом менее чем 10 лет. Кроме того, сильные и разрушительные извержения вулкана Ламингтон на Новой Гвинее в 1951 г. и извержение вулкана Безымянный на Камчатке в 1956 г., которые считались потухшими, значительно снизили достоверность прогнозов, сделанных на основании анализа периодичности предыдущих катастроф.

Гораздо большую пользу приносит изучение характера вулканической деятельности в период извержения. Например, из вулкана Парикутин лава всегда начинала истекать через некоторое время после того, как пеплопады достигали максимума и затем внезапно прекращались. Сейчас признается опасность, таящаяся за резким прекращением вулканической деятельности потенциально грозных вулканов, лава которых богата кремнеземом. Примером тому служит вулкан Мон-Пеле. В 1902 г. вулканическая деятельность этого вулкана, казалось, достигла апогея, а затем вдруг резко, хотя и ненадолго, прекратилась. Вулкан словно замер, а тем временем внутри его в течение 4 ч возрастало давление газа. В результате произошло катастрофическое извержение, известное всему миру. Ныне подобное развитие событий послужит сигналом к немедленной эвакуации из данного района, как это было сделано в окрестностях вулкана Суфриер в 1976 г.

При прогнозе вулканических извержений необходимо учитывать и возможное влияние внешних (по отношению к вулкану) процессов. Оказывается, что извержение некоторых вулканов совпадает во времени с климатическими изменениями или с действием земного прилива. Вулкан Пуиуеу в Чили, например, начал извергаться в 1960 г. через 48 ч после того, как произошло сильное землетрясение, эпицентр которого находился на расстоянии 300 км от вулкана. К сожалению, подобные механизмы, приводящие в действие вулканы, до сих пор настолько плохо изучены, что использовать их как критерии прогноза извержений почти невозможно.

В качестве предвестников близкого извержения могут выступать разнообразные признаки: повышение температуры горных пород и природных вод, изменение состава газов и др. Когда магма поднимается к жерлу внутри вулкана, ее тепловое воздействие на горные породы иногда может быть обнаружено прежде,

чем начнется извержение. Для этого используется аэрофотосъемка в чувствительных к температуре инфракрасных лучах. Но заметное увеличение температуры горной породы далеко не всегда является предвестником извержения, и эти наблюдения не приносят существенной пользы. Вследствие нагревания магмой может повыситься температура источников и фумарол, причем этот эффект становится заметным гораздо раньше, чем потепление пород. Так, извержение вулкана Тааль на Филиппинах в 1965 г. удалось предсказать благодаря тому, что значительно повысилась температура воды в кратерном озере. На этом основании было принято решение о немедленной эвакуации жителей района; погибло всего 190 человек, хотя извержение было очень сильным.

Нагревание приводит также к размагничиванию пород, если температура магнитных минералов превысит точку Кюри. Это воздействие можно контролировать проведением наземной магнитной съемки. Значительные потери намагниченности горных пород были зарегистрированы перед извержением вулкана Осима в Японии, магматический очаг которого располагался относительно неглубоко. На гавайских же вулканах, которые, очевидно, питаются магмой из более глубоких очагов, магнитных эффектов обнаружено не было.

Весьма вероятно, что достаточно надежным может быть прогноз, основанный на изучении состава газов из фумарол. Вулканологической службой Японии было обнаружено, что в фумарольных газах некоторых вулканов непосредственно перед извержением заметно повышалось содержание хлора и сернистого газа. Хотя на примере других аналогичных вулканов Японии этот факт и не подтвердился, но тем не менее он весьма интересен. Поскольку поведение газов непосредственно связано с механизмом извержения, их изучение, вероятно, позволит выявить надежные методы прогноза.

Перед извержением должны переместиться вверх миллионы тонн расплавленной породы; очевидно, что для прогноза достаточно обнаружить это движение. Практически это можно осуществить двумя путями: измерением небольших поверхностных смещений и сейсмической регистрацией толчков и сотрясений от глубинных подвижек. Магма образуется в земной коре на значительной глубине, а затем движется вверх благодаря своей пониженной плотности по сравнению с окружающими более холодными твердыми породами. Перед самым извержением приближение магмы к земной поверхности вызывает ее региональное воздымание и приподнимает купол вулкана. Это можно обнаружить детальными измерениями превышений и расстояний между точками на участке поднятия, а также определением углов наклона местности. Последняя операция проводится с помощью особых приборов — наклономеров, которые представляют собой заполненные жидкостью трубки, соединяющие два резервуара. Наклонометры просты в обращении, дешевы, высокочувствительны и

позволяют определять изменение углов наклона с погрешностью до одной миллионной доли градуса.

Геологическая служба США подробно изучает состояние вулкана Килауэа на острове Гавайи. Хотя общее поднятие вершины вулкана не превышает там 1 м, при наблюдениях чаще всего используются наклонометры. В течение 1958 и 1959 г. эти приборы постоянно регистрировали воздымание поверхности вулкана, предсказывая возможность его извержения в ближайшем будущем. В ноябре 1959 г. действительно произошло несколько слабых извержений. Однако наклонометры продолжали фиксировать непрерывное поднятие земной поверхности, что грозило новым извержением. Это и случилось: в январе 1960 г. произошло сильное извержение с излиянием большого количества лавы; воздымание поверхности вулкана прекратилось.

Еще одним из последствий восходящего движения магмы в вулкане являются мелкие землетрясения, которые могут быть обнаружены стандартными сейсмографами. Множество слабых толчков в течение 16 лет ощущалось в районе вокруг Везувия, и, наконец, в 79 г. н. э. произошло ужасное извержение этого вулкана. К сожалению, в то время еще не знали, что увеличение частоты толчков — один из наиболее надежных предвестников вулканических извержений.

При помощи сети сейсмографов можно не только обнаружить сотрясения, но и определить их место и глубину зарождения, что очень важно, если мы хотим проследить движение магмы вверх по подводящему каналу вулкана. Предсказание извержений вулкана Асама в Японии ведется сейчас по нарастающей частоте толчков на участке в радиусе 1 км от жерла. На вулкане Килауэа за сутки в среднем отмечается шесть сотрясений грунта, но в начале 1955 г. частота толчков резко возросла, и только за 26 февраля было зарегистрировано 600 сотрясений земной поверхности. Говорили, что извержение неизбежно, и действительно, через два дня оно произошло. Но и после этого продолжались толчки в недрах под деревней Капохо. Была проведена срочная эвакуация населения, к счастью, своевременная, так как последовало второе, более сильное и разрушительное, извержение вулкана.

Точное определение участка, где концентрировались толчки, принесло большую пользу жителям острова Тристан-да-Кунья в 1961 г. У них не было никаких инструментов. Просто сравнивая силу толчков на противоположных концах острова, люди поняли, что там, где они живут, сотрясения более интенсивные. Население покинуло это место, а вскоре началось извержение.

Сочетание контроля за наклоном земной поверхности с сейсмическим контролем может оказать большую помощь в предсказании поведения вулкана. Но, к сожалению, в настоящее время прогноз возможен лишь при условии применения дорогостоящих приборов, поскольку другие методы в большинстве случаев четких резуль-

татов не дают. Но единичные приборы тоже не решают задачи. Автоматизированная же система, соединенная с радиопередатчиками на каждом потенциально опасном вулкане является слишком большой роскошью как с практической, так и с экономической точки зрения.

Тем не менее сеть контрольно-измерительных устройств, установленных Геологической службой США на вулкане Килауэа и других гавайских вулканах, показывает, что если опираться на опыт и хорошее знание особенностей вулкана, то прогноз извержений становится задачей вполне разрешимой. Однажды вечером в 1973 г. сотни туристов любовались извержением Мауна-Улу — небольшого жерла на склоне вулкана Килауэа. Внезапно приборы, находящиеся в вулканологической обсерватории, зарегистрировали сильный толчок. Было отмечено и еще одно явление: начало вытекать лавовое озеро Мауна-Улу. Кроме того, наклонометры показывали, что вершина вулкана Килауэа погружается. Из района срочно было эвакуировано все население, а 4 ч спустя произошло извержение вулкана, которое отрезало бы все пути к отступлению.

Будущее

Извержения вулканов являются в настоящее время наиболее хорошо изученными и, следовательно, наименее опасными из геологических катастроф. Однако это вовсе не означает, что деятельность вулканов можно контролировать. Вряд ли человек сможет когда-либо подчинить себе крупное извержение или же оказать на него заметное воздействие. Сейчас извержение может быть предсказано при условии, что оно развивается относительно медленно. Благодаря своевременной эвакуации можно избежать человеческих жертв, но с разрушением зданий приходится мириться как с неизбежным последствием.

Извержение вулкана Килауэа на острове Гавайи нанесло ущерб на сумму более 2 млн. долл., но ни один человек не погиб. В нескольких километрах от вулкана Килауэа расположен город Хило, построенный на лаве, излившейся из вулкана Мауна-Лоа в 1881 г. В июле 1975 г. извержение вулкана Мауна-Лоа заставило гражданские власти города Хило быть настороже в течение шести дней; затем мелкие землетрясения и прекращение поднятия вулкана показали, что угроза миновала. Но прошлая вулканическая деятельность Мауна-Лоа свидетельствует о том, что в ближайшие несколько лет может произойти более сильное извержение, в результате которого на город Хило может обрушиться лавовый поток. Однако пока продолжают регистрировать подвижки земной коры и землетрясения, нет необходимости в каких-либо иных мерах предосторожности. Угроза городу нарастает настолько медленно, что в случае опасности могут быть возведены стены, отводящие лаву.

Изучение извержений на Гавайях и, конечно, извержения вулкана Киркефедль в Исландии в 1973 г. показывает, что вулканы этого типа представляют не очень существенную угрозу. Истинную опасность таят в себе мощные вулканы, расположенные на территории менее развитых стран, где не ведется всестороннего наблюдения за проявлениями вулканической деятельности. Во время извержения вулкана Ламингтон на Новой Гвинее в 1951 г. погибло 3000 человек; это произошло главным образом из-за того, что жители деревни Хигатура не получили никакого предупреждения о надвигающейся опасности. В подобной ситуации единственным действенным способом защиты является районирование территорий по степени опасности в случае извержений и выделение высокоопасных зон, не подлежащих заселению. Но даже с такими исследованиями во многих странах мира дело обстоит плохо.

Защитные программы по районированию густонаселенных территорий могут оказать существенную помощь при планировании размещения поселений и их застройки. Но и в этом случае необходимо учитывать возможность возникновения непредвиденных обстоятельств. Можно с достаточной степенью надежности предсказать, что во время следующего извержения вулкана Эль-Тейде на острове Тенерифе, когда бы оно ни произошло, есть один шанс из трех, что деревни, расположенные к востоку от этого вулкана, будут покрыты слоем пепла толщиной более метра. Хотя сам по себе пепел не столь уж и опасен, он может затруднить эвакуацию, которая будет необходима, поскольку на следующих этапах извержения могут образоваться лавовые потоки, таящие гораздо большую опасность.

При прогнозировании извержений надо учитывать, что вулканы обычно извергаются неожиданно. В качестве примера можно назвать вулкан Катмай на Аляске. 6 июня 1912 г. произошло сильное извержение этого вулкана, и за один лишь день участок более 250 км² был покрыт слоем пепла, толщина которого в среднем составляла 30 м. К счастью, это была незаселенная местность — лес и тундра. Но Катмай — это лишь один из вулканов в великом «Огненном кольце», протягивающемся по периферии Тихого океана. В пределах этого вулканического пояса только северная его часть, охватывающая Аляску и Камчатку, столь редко заселена. Вулканы подобного типа существуют и во многих других районах, причем извержения их могут быть значительно более сильными. Что смог бы сделать человек, если бы такое извержение, как на Катмае, произошло в Орегоне, Мексике, Чили, Новой Зеландии или Ост-Индии? А ведь там есть вулканы такого типа, они ждут своего часа.

Оползни

* * *

Дорога, ведущая от города Хоп к Принстону, пересекает Каскадные горы в южной части Британской Колумбии (Канада), к востоку от Ванкувера. В 18 км от Хопа она извивается вдоль подножья крутых западных склонов горы Джонсон-Пик. Незадолго до рассвета 9 января 1965 г. по дороге медленно двигались три автомобиля. Внезапно с Джонсон-Пик сорвалась огромная масса породы 130 млн. т и погребла участок дороги около 3 км вместе с автомашинами и находившимися в них людьми.

Оползень, подобный случившемуся близ города Хоп, — вполне обычное событие для местностей, где активно проявляются процессы эрозии склонов. Ни один из очевидцев этой катастрофы не остался в живых, но можно предполагать, что оползень произошел почти мгновенно. Основная оползневая масса переместилась приблизительно на 2,5 км, спустившись при этом на 700 м по вертикали. Обломки были переброшены на 150 м вверх по противоположному склону долины. Следовательно, скорость их падения значительно превышала 150 км/ч.

Как и любой другой склон в аналогичных климатических условиях, западный склон Джонсон-Пик в течение многих тысяч лет подвергался непрерывной эрозии. Под воздействием дождей и солифлюкции, в результате развития осыпей и образования оврагов массы горных пород могут перемещаться по склону, от подножья которого обломочный материал уносится реками. На большинстве склонов эрозионные процессы протекают медленно и продолжают непрерывно на протяжении значительного времени. Но на Джонсон-Пик сложилось своеобразное сочетание геологических условий, которое нарушило ход процесса. Легко раскалывающиеся зеленые сланцы и метаморфизованные вулканические породы, включающие пластовые интрузии фельзита, залегали почти параллельно склону горы и нередко отрывались и перемещались вниз, вызывая крупные оползни. Причиной, которая привела оползень в движение в ту январскую ночь 1965 г., явились два слабых локальных землетрясения. Детали геологического строения и динамики горных масс, подобные рассмотренным, и определяют обычно механизм оползневой деятельности, которая может привести к последствиям разного масштаба — от незначительного беспокойства до крупной катастрофы.

Оползни происходят в том случае, когда массы породы, слагающие склоны гор, теряют опору в результате воздействия каких-либо природных или антропогенных процессов. Теоретическое изучение сил, действующих на толщу горных пород, может предсказать вероятность обрушения склона или развития оползня. К сожалению, не поддается учету влияние неисчислимого множества разнообразных трещин, пронизывающих породу. А поскольку нельзя точно определить характер трещин, оценить сопротивление трения и степень сцепления пород на большой глубине, то нельзя однозначно указать и время обрушения склона.

Наш настрой может показаться слишком пессимистичным, поскольку даже качественные оценки геологической обстановки позволяют обнаружить многие случаи потенциальной опасности обрушения горных склонов. Но постоянные оползни, вызывающие значительные разрушения и даже человеческие жертвы, свидетельствуют о том, насколько трудно учесть все многообразие действующих факторов.

Существование огромных вертикальных или даже нависающих уступами утесов в таких районах, как Йосемит в Калифорнии и Доломитовые Альпы в Италии, показывает, насколько устойчивой может быть плотная слаботрешиноватая порода. Наклон в 70° инженеры обычно считают безопасным постоянным углом для твердой массивной породы с беспорядочно ориентированными трещинами. Однако известно, что в некоторых плохо консолидированных глинах обрушение происходит даже при наклоне менее 7° .

Во всех случаях обрушения склона следует учитывать два признака — основную причину этого события и механизм, приведший его в действие, т. е. вызвавший это обрушение. Наиболее частой причиной является либо отсутствие внутреннего сцепления в неуплотненном материале, либо наличие зон ослабления — трещин или плоскостей напластования — в твердых породах. В обоих случаях эти признаки относятся к статическим геологическим условиям, которые можно определить и предсказать. Гораздо труднее понять механизмы, приводящие оползень в действие. Одним из таких пусковых механизмов является нарушение целостности потенциально оползневых масс независимо от того, вызвано ли оно перегрузкой, связанной, например, со строительными работами и вибрацией при возведении каких-либо конструкций, или землетрясениями. Большинство крупнейших оползней в мире было в той или иной степени обусловлено удалением подошвы оползневой массы, в результате чего породы, слагающие склон, оказывались как бы в подвешенном состоянии.

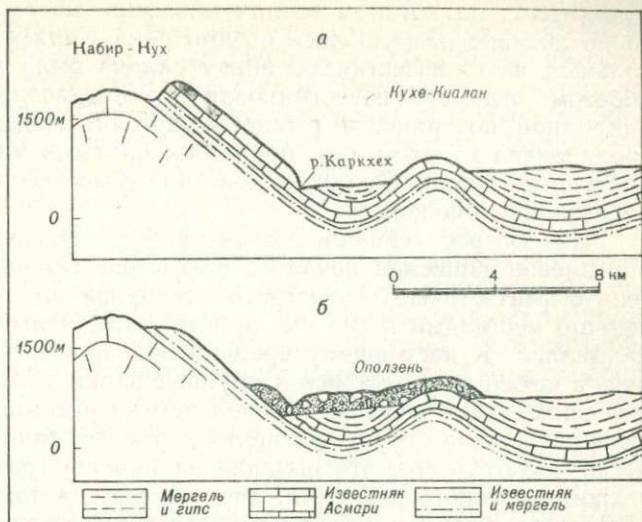
Еще один спусковой механизм — это вода. К опасным последствиям может привести насыщение водой неустойчивого материала, который размягчается и становится непрочным. Но и удаление воды, влекущее за собой обезвоживание глины, также способствует возникновению оползней. Выветривание пород, изменение характера растительности, чередование замерзания и таяния — вот некоторые из природных механизмов, вызывающих развитие оползней. Большинство же крупных оползней, как будет показано на примерах, возникает вследствие сочетания нескольких из перечисленных факторов.

Предпринимались попытки классифицировать оползни, но особым успехом они не увенчались. Это в основном объясняется тем, что нет таких одного или двух параметров, по которым можно было бы проводить классификацию и которые одновременно были бы связаны с причинами образования оползней и механизмами, приводящими их в движение.

Масштабы оползней значительно варьируют, так же как и их скорости. Оползневые массы могут состоять из крупных, относительно неразрушенных блоков породы, из разжиженной глины или обломочного материала. Геологическая структура и место проявления могут быть весьма многообразными, что зависит от причины, вызывающей движение оползня. При дальнейшем описании будет использована весьма приблизительная классификация оползней, в которой особое внимание уделено геологическим факторам.

Камнепады

Во многих случаях при больших разрушительных оползнях наблюдается свободное падение обломков пород — камнепады; они способны с огромной скоростью перемещаться на значительные расстояния. Практически невозможно оценить масштабы крупнейших камнепадов, но некоторые, чисто статистические, данные о доисторическом оползне — камнепаде в долине Саидмаррех в Иране — весьма впечатляющи. Наклонная известняковая плита мощностью 300 м сорвалась с горы Кабир-Кух и обрушилась в долину Саидмаррех. Длина оползневого блока по горизонтали составила около 15 км, в поперечнике он достигал 5 км. При оползании с Кабир-Кух блок спустился на 900 м и, постепенно наращивая скорость, в виде огромной массы обломков



Поперечные разрезы, показывающие соотношение горных пород до (а) и после (б) огромного доисторического оползня в долине Саидмаррех на юге Ирана.

попмчался вниз, пересек долину Саидмаррех шириной 8 км, перевалил через расположенный за долиной хребет Кухе-Киалан высотой 450 м. Круша все на своем пути, эта оползневая масса остановилась только в 17 км от места возникновения.

По самым скромным подсчетам объем оползневого материала составил здесь около 20 км^3 , а его масса — около 50 млрд. т. Обломочный материал перегородил долину, образовав огромную плотину. Возникло озеро длиной 65 км и глубиной 180 м. В настоящее время это озеро уже не существует: оно осушилось через ущелье, прорезанное текучими водами в толще оползневой запруды. Полагают, что оползень в долине Саидмаррех был самым крупным в мире. Поскольку это случилось в доисторическом прошлом и человека еще не было, говорить о нанесенном ущербе не приходится, но, произойди подобный громадный оползень сейчас в густонаселенном районе, последствия были бы ужасающими.

Оползень в долине Саидмаррех находится примерно в 100 км к северо-западу от города Дизфуль на западном склоне гор Загрос в южном Иране. В геологическом отношении он не отличается от других крупных оползней. Кабир-Кух представляет собой гору, рельеф которой повторяет очертания поверхности слагающего ее известняка, образующего антиклинальную структуру. Во внешнем покрове горы, представленном известняками Асмари, и зародился оползень. Известняки падают под углом 20° по направлению к долине. Их подстилают тонкослоистые известняки и мергели. Известняки Асмари обнажились на вершине горы, где гребень антиклинали оказался размытым. Подножье склона

Кабир-Кух, на котором возник оползень, постепенно, но достаточно активно разрушалось водами реки Каркхех. В результате большая часть известняков внизу склона была размыта. Таким образом, огромная известняковая плита оказалась лежащей на наклонной поверхности рыхлого мергеля. Подошва горы была эродирована и, возможно, прорезана крутыми ущельями, дренировавшими склон. Возникли поистине классические условия для образования оползня.

Горы Загрос сейсмически активны, и вполне вероятно, что оползневое движение началось вследствие землетрясения. Оползень с фантастической быстротой двинулся по дну долины, сложенной мергелями и гипсом; при этом массивный известняк раскальывался. К настоящему времени большая часть его превратилась в щебень, но остались и крупные блоки до 2000 т. Эти тяжелые блоки были перенесены оползнем на расстояние более 8 км. Первоначальная структура оползшего известняка позволяла воде легко насытить его, что вызвало на нижней границе повышение гидростатического давления. Этот процесс, а также образование карстовых пустот в базальном известняке в значительной мере ослабили устойчивость толщи пород. Движению, усиленному наличием воды, способствовало также то обстоятельство, что дно долины было сложено гипсом и мергелем и представляло собой поверхность с относительно низким сопротивлением трения. Тем не менее до сих пор не вполне ясно, как такая огромная масса породы могла переместиться на столь значительное расстояние.

Суть спора о способе перемещения камнепадов заключается в следующем: как движется обломочный материал — течет ли он по склону или же скользит над его поверхностью. Гипотеза, согласно которой обломочный материал течет, казалась сначала более привлекательной, поскольку она объясняла отсутствие значительного трения в основании оползня. В пользу другой точки зрения также имеются доводы, основанные, например, на результатах изучения оползня Блэк-Хок в южной Калифорнии.

Этот оползень обрушился с высоты около 1200 м с горы Блэк-Хок тоже еще в доисторическое время. Оползневый материал представлен главным образом обломками мрамора. Есть предположение, что оползневая масса двигалась вниз по склону как единое целое, почти без трения, скользя на подушке из сжатого воздуха. Такая воздушная подушка могла появиться, если оползень на некотором участке своего пути оторвался от поверхности склона. В пользу этого предположения свидетельствует наличие краевых гряд обломочного материала, которые могли образоваться вследствие просачивания воздуха из-под краев оползневой массы. Хотя морфология оползневых отложений в районе Блэк-Хок и может быть объяснена гипотезой воздушной подушки, свидетелей этого доисторического события нет, и поэтому имеет смысл рассмотреть, как ведут себя более современные камнепады,

В 1881 г. огромная глыба сорвалась с горы Платтенберг и, пролетев более 450 м, упала недалеко от деревни Эльм, расположенной близ города Гларус в восточной Швейцарии. Как ни удивительно, этот обвал был по существу делом рук человеческих. Гора Платтенберг сложена аспидными сланцами, разработка которых велась карьерным способом. По мере выемки сланца в карьере образовался искусственный обрыв длиной 180 м и высотой около 60 м. Нависшая верхняя стенка карьера не была укреплена, и к 1876 г. стало очевидным, что она движется и может обрушиться. Буквально на глазах в нависшей части карьера появлялись крупные извилистые трещины. Целых пять лет трещины разрастались и даже поглотили небольшой ручей. К 8 сентября 1881 г. ширина главной трещины уже превышала 3 м, а скорость обрушения и шум от перемещающихся пород настолько усилились, что работы в карьере были прекращены.

В 17 ч 15 мин 11 сентября 1881 г. над карьером произошел небольшой оползень. Жители расположенной внизу деревни следили за ним с благоговейным страхом и изумлением. Через 17 мин за первым оползнем последовал второй. Затем на горе воцарилось спокойствие, но всего на 4 мин, после чего с грохотом сорвалась вся сланцевая масса, нависавшая над карьером. Она обрушилась на дно карьера, а затем подобно огромной струе воды хлынула в долину. Масса каменных обломков объемом более 112 000 м³ пересекла дно долины, взлетела на 100 м вверх по ее противоположному борту, отскочила от него и устремилась вниз по долине. Преодолев около 1,5 км менее чем за минуту, она внезапно остановилась. Несмотря на то что оползень не затронул центральную часть деревни Эльм, под ним было погребено 115 человек.

Не исключена возможность, что оползневая масса, которая устремилась на деревню Эльм, перемещалась вниз по долине на подушке из воздуха, захваченного ею при падении. Это предположение, казалось бы, подтверждается тем, что камнепад на некоторых участках почти не повредил растительности. Но имеются также факты, свидетельствующие в пользу того, что обломочный материал, насыщенный изнутри воздухом и пылью, пребывал в текучем состоянии. Очевидец этой катастрофы, которому удалось спастись от оползня бегством, впоследствии описывал движущийся обломочный материал как бугристо-холмистую, волнующуюся массу, напоминавшую «кипящую перловую кашу». Эта масса проникала и в дома; один старик, находясь в кухне своего дома, был по плечи погребен потоком обломков, который обтекал его со всех сторон, не причиняя никакого вреда. Поскольку постройки не были повреждены, а просто заполнены обломками, предположение о том, что оползневая масса представляла собой поток, кажется более логичным. Подтверждают гипотезу течения и эксперименты с моделями.

Обе существующие гипотезы пытаются объяснить, каким образом камнепады могут перемещаться с такой огромной скоростью

и на столь большие расстояния. К сожалению, сейчас приверженцы каждой из этих гипотез полностью отвергают другую точку зрения и взаимопонимания между исследователями не достигнуто.

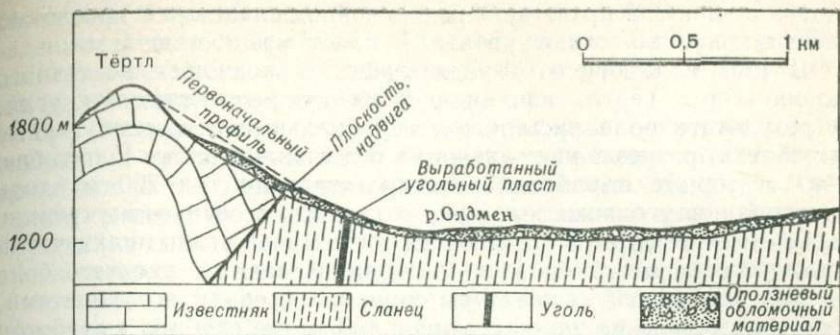
Камнепады часто происходят в районах молодых гор, таких как Швейцарские Альпы. Для некоторых деревень, расположенных в самых глубоких долинах, от камнепадов нет никакого спасения. В 1618 г. на юге Швейцарии со склонов Монте-Конто на город Плёр обрушился огромный камнепад, унесший 2430 человеческих жизней. По-видимому, это бедствие подобно камнепаду в деревне Эльм было вызвано непродуманным расположением карьеров на горных склонах. В Швейцарии же, к западу от Шюра, где сейчас находится деревня Флимс, в межледниковую эпоху оползень перегородил долину Рейна, образовав озеро, первоначальная глубина которого составляла 200 м. Сейчас этого озера уже нет, потому что Рейн быстро прорезал новое русло в массиве каменных обломков, и деревня Флимс на его берегу в настоящее время не подвергается опасности.

Однако кое-где такие созданные стихией озера и поныне существуют. Одно из них возникло в результате самого сильного из наблюдавшихся в наше время камнепадов. Это произошло в 1911 г., когда в долину реки Мургаб на Памире обрушилось около 5 км³ породы. Разбушевавшаяся стихия целиком погребла под обломками одну из деревень и затопила другую водами образовавшегося при этом Сарезского озера.

За 18 лет до этой катастрофы сильный обвал произошел в Индийских Гималаях. Горный склон, сложенный доломитами, сполз в долину реки Бирехиганга близ деревни Гохна к северо-востоку от Дели, образовав плотину высотой 300 м и длиной 3 км, за которой стало быстро наполняться озеро. Уровень воды в озере тщательно контролировался, и через год было точно предсказано, когда вода перельется через плотину. Своевременная массовая эвакуация населения из городов и сел, расположенных в долине, позволила избежать человеческих жертв, но многие населенные пункты были смыты с лица Земли, когда вода хлынула через запруду. После этого наводнения уровень воды в озере понизился на 120 м.

Значительный научный интерес вызвал оползень на Памире, произошедший в 1911 г. одновременно с землетрясением. Сначала полагали, что причиной землетрясения был сильный камнепад, но расчеты опровергли это предположение. Было установлено, что именно камнепад, как и в большинстве случаев, был следствием землетрясения.

Незадолго до полуночи 17 августа 1959 г. оползень обрушился на кемпинг у реки Мадисон в штате Монтана (США); при этом погибло 27 человек. Оползень, который правильнее было бы называть камнепадом, сорвался с крутых склонов каньона в результате землетрясения магнитудой 7,6, эпицентр которого распо-



Поперечный разрез центральной части оползня на горе Тёртл.

лагался под озером Хебген. Обрушившийся материал состоял из смеси доломитов и кристаллических сланцев. Нижняя часть склона каньона была сложена почти вертикально залегающими доломитами, они подстилали толщу кристаллических сланцев, угол падения которой в сторону каньона достигал 50° . Этот неустойчивый склон каньона держался до тех пор, пока сейсмические вибрации не ослабили доломитовый контрфорс. . .

Магнитуда разрушительного землетрясения 1970 г. в Перу была лишь ненамного больше — 7,7, однако вследствие толчков с горы Невадос-Уаскаран сорвались огромные массы горных пород и льда и устремились вниз по долине к городу Юнгай. Под ними погибло 10 000 человек.

Оползнями часто сопровождаются землетрясения в горных районах. Но, возможно, гораздо опаснее те оползни и камнепады, которые не связаны с землетрясениями. Наглядным примером служит камнепад, произошедший в 1903 г. в канадском городе Франк.

К востоку от перевала Кроуснест в Скалистых горах на юге провинции Альберта находится маленький шахтерский городок Франк, расположенный на дне глубокой ледниковой долины. С южной стороны долины вырисовывается обрывистый склон горы Тёртл, возвышающейся на 900 м. Вся верхняя часть горы сложена верхнепалеозойскими известняками, в основном массивными и плотными. Однако в нижней части толщи среди них часто встречаются слабые — сланцеватые и плитчатые — разности. Известняки образуют крутую антиклиналь с опрокинутой нижней частью восточного крыла. Характерная особенность этой структуры состоит в том, что на значительном участке слоистость пород параллельна склону, обращенному в сторону города Франк. Под массивными известняками проходит крупная плоскость разлома, по которой они контактируют с толщей довольно рыхлых меловых осадочных пород, слагающих склоны у подножья горы и дно долины, покрытое аллювием и валунной глиной. В районе города Франк эти меловые осадочные породы залегают почти

вертикально. Они представлены в основном сланцами с прослоями песчаников и включают угольный пласт мощностью 4 м.

В 1901 г. к югу от города Франк, у подножья восточного склона горы Тёртл, начали разработку месторождения угля. В результате появились почти вертикальные открытые горные выработки, разрезавшие залежь на отдельные столбы. К октябрю 1902 г. горные выработки уже протягивались на 700 м вдоль простирания угольных пластов, а столбы, особенно в утренние часы, стали оседать. В апреле следующего года уголь практически «самодобывался»: глыбы угля постоянно падали с всячего бока на дно забоя, откуда шахтеры просто сгребали его лопатами. Это происходило на участке длиной 450 м, где глубина выработок местами достигала 120 м. В 4 ч утра 29 апреля 1903 г. подвижки в шахте внезапно усилились. Породы скрипели и стонали, огромные куски угля отламывались от кровли и падали, загромаждая стволы горных выработок. Работавшие в ночную смену шахтеры поспешили покинуть шахту. Еще через 10 мин раздался сильный треск и вершина горы Тёртл рухнула в долину. За этим треском последовал шум, напоминающий приглушенный взрыв, и более 28 млн. м³ известняка низверглось вниз по склону горы. Перелетев через невысокую гряду песчаника, у подножья горы эта масса почти оторвалась от земли и устремилась по долине со скоростью более 160 км/ч.

Сопровождаемый сильными порывами ветра, выдувавшими людей из расположенных поблизости домов, этот обломочный материал пронесся с ужасным шумом, похожим на звук парового клапана котла высокого давления, пересек русло реки Олдмен, продвинулся еще на 1,5 км, взлетел на 100 м вверх по склону противоположащего холма и затем внезапно остановился. Менее чем за 2 мин, прошедшие после первого громкого треска, беспорядочная масса из глыб и мелких обломков известняка засыпала вход в шахту, перекрыла 1,5 км железнодорожного полотна, идущего вдоль Тихоокеанского побережья Канады, разрушила несколько домов на окраине шахтерского городка Франк. Во время этой катастрофы погибло 76 человек.

Несомненно, что явной причиной оползня в городе Франк были горные работы. Однако этот оползень является классическим, так как в его возникновении определенную роль сыграл и ряд других факторов. Важное значение имела структура известняка, особенно угол его падения. Если бы падение было более пологим, слоистость могла бы препятствовать движению пород по склону. И наоборот, если бы падение пород и склон холма были более крутыми, происходили бы частые небольшие камнепады, что препятствовало бы накоплению значительного количества неустойчивого материала. Но в данном случае угол залегания был критическим и слагающий склоны известняк на большом участке не имел практически никакой опоры. Кроме того, под действием ледника, прорывшего в плейстоценовое время

долину, где располагался город Франк, восточный склон горы Тёртл стал более крутым. Его наклон оказался больше, чем угол падения трещин в породах сланцевой толщи. Все это сделало камнепад неизбежным; удивительно, что гора Тёртл простояла так долго после отступления ледника.

Обрушению могла способствовать также насыщенность трещиноватых известняков водой, периодическое замерзание которой приводило к «вспучиванию» вышележащих слоев. Накануне камнепада температура воздуха днем была достаточно высокой и снег в трещинах сильно подтаял; ночью же ударил мороз, и талая вода, вновь замерзнув, значительно увеличилась в объеме; по-видимому, и этот фактор тоже сыграл некоторую роль. Вследствие снятия нагрузки с отступлением плейстоценового ледника в известняках могли образоваться критически ориентированные, параллельные склону горы, трещины — столь обычные для отложений ледниковых долин. Однако установить наличие таких трещин в данном случае затруднительно. В результате же горных работ была ослаблена опора подножья горы, где сохранились лишь непрочные целики угля, и любые подвижки известняка вызывали обрушение породы. Однако ориентировка некоторых локализованных зон тектонических брекчий в известняке свидетельствует о том, что существенной роли в происшедшем оползне эти явления сами по себе сыграть не могли. Совокупность процессов, действовавших непосредственно в толще известняка, была вполне достаточной, чтобы произошел камнепад. Эти естественные процессы сделали оползень неизбежным задолго до того, как в городе Франк стали вести добычу угля.

После катастрофы 1903 г. жители города стали проявлять беспокойство. А вдруг северный склон горы Тёртл тоже обрушится на город? Ведь по своей геологической структуре этот склон идентичен восточному, тем более что вдоль всего хребта протянулись крупные зияющие трещины. И хотя неизвестно доподлинно, когда они появились: до землетрясения 1901 г., во время оползня 1903 г. или уже после этих катастроф — стало совершенно ясно, что в подобной геологической обстановке вполне может развиваться новый оползень. Не следует ли поэтому перенести город в другое место? Горных выработок непосредственно под городом нет, и если бы основной причиной камнепадов была добыча угля, то город Франк можно было бы считать в относительной безопасности. Что же касается горных работ, которые велись на горе Тёртл до 1903 г., то они, безусловно, были плохо спланированы и в сложных геологических условиях этого района их можно оценить как настоящее самоубийство. Однако прославленная Канадо-Американская угольная компания об этом и не думала; цель у нее была лишь одна — добывать уголь и делать деньги.

В начале оползня, происшедшего в 1903 г. близ города Франк, глыбы известняка скользили вдоль плоскостей отдельности. Но в конце их пути у подножья горы накапливалась беспорядочная груда обломков. Такие оползни называют камнепадами. И наоборот, истинным обвалом считают перемещение блока пород по некоторой ранее существовавшей поверхности, причем блок в этом случае движется как единое целое. Геология подобных оползней обычно бывает достаточно простой. Но, к сожалению, дать прогноз, когда произойдет такой оползень,— очень трудно, так как измерить силы трения, действующие на глубине, практически невозможно.

В большинстве случаев ослабленными зонами, по которым происходят обвалы, являются плоскости напластования осадочных пород. В породах метаморфических эту роль могут играть плоскости рассланцевания. И в том и в другом случае обычно имеет значение присутствие прослоев или включений глин либо пластинчатых минералов — слюд. Классическим примером обвала может служить обрушение склонов невысокой горы Россберг, расположенной к востоку от города Люцерн в Швейцарии; произошло оно в 1806 г. Южный склон горы был сложен третичными конгломератами мощностью от 60 до 90 м с углом падения от 19 до 21°, залегавшими на горизонте битуминозного мергеля с таким же углом падения. У подножья склона эрозия дошла до мергеля, и лишь трение удерживало конгломераты на наклонной подошве. И вот в 1806 г. огромный массив конгломерата обрушился вниз на деревню Гольдау, расположенную в долине; погибло 457 человек.

Причиной возникновения многих подобных обвалов является человек, лишаящий склоны гор их потенциальной устойчивости. Недалеко от города Тин на реке Влтава (юго-запад Чехословакии) возвышалась гора. Угол наклона ее поверхности составлял 30°. Гора была сложена биотитовыми гнейсами с углом падения 40° вниз по склону. Этот склон был достаточно устойчивым до тех пор, пока по нему не проложили дорогу. При строительстве дороги совершенно не учли местные геологические условия. Наклону дорожной выемки придали угол 55°, и поэтому вполне естественно, что выемка обрушилась и обломки гнейсов засыпали дорогу.

В городе Матлок (графство Дербишир) два дома были построены под уступом старого карьера в долине реки Деруэнт с крутыми берегами, несмотря на то что известняк на уступе круто падал в сторону этих домов. 10 января 1966 г. огромная плита известняка, ограниченная сзади нерудной жилой и лежавшая на мало-мощном пласте глины, медленно поползла вниз, и через 10 ч оба дома были полностью разрушены.

Геометрия обвалов, происходящих по плоскостям ослабления, весьма проста. Гораздо сложнее бывает картина, когда прочная

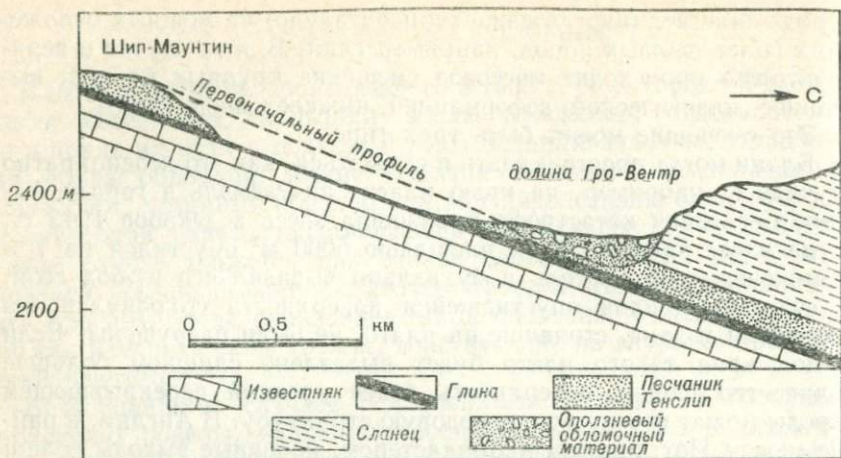
порода залегает (иногда даже горизонтально) на мощных отложениях более рыхлых пород, например глин. В этом случае в верхней толще происходит массовое смещение крупных блоков, вызванное пластической деформацией нижележащей глины.

Это смещение может быть трех типов.

Блоки могут просто оседать и смещаться, как это неоднократно случалось, например, на краю плато Сан-Рафаэль в городе Алжир. Серьезная катастрофа произошла здесь в декабре 1943 г., когда известняковый блок площадью 5000 м² опустился на 7 м в нижележащий мергель и буквально выдавил его из-под себя. К счастью, наклон опустившейся поверхности сохранился без изменения и дома, стоявшие на плато, не были разрушены. Если из-под края такого плато будет выдавлено слишком большое количество глины, поверхность более крепкой перекрывающей породы может изогнуться в сводовую структуру. В Англии, в районе между Ноттингемом и Донкастером, коренные выходы толщи доломитовых известняков, перекрывающей мощную толщу мергелей, образуют выгнутый крутой откос, который нередко движется, вызывая слабые разрушения.

Если нижележащая глинистая порода не поддается пластической деформации, а сдвигается вдоль горизонтальной поверхности, блоки верхнего устойчивого слоя опрокидываются назад — в направлении коренного массива. Оползни такого типа характерны для базальтов, перекрывающих рыхлые глины на побережье графства Антрим в Северной Ирландии, а также на восточном побережье острова Скай в Шотландии. Оползни в Антриме более известны, поскольку там вдоль побережья идет превосходная, хотя и весьма опасная дорога. При крупнейших оползнях, происшедших на острове Скай еще в доисторические времена, оползающие массы перемещались на расстояния до полутора километров, а первоначальное горизонтальное смещение сменялось вертикальным. Общим для всех этих классических оползней является наличие глинистых отложений, перекрытых более крепкой породой.

Долина реки Гро-Вентр, протекающей к югу от знаменитого Йеллоустонского национального парка (США), подвержена оползням из-за особенностей своего геологического строения. Южный склон долины сложен карбонowymi песчаниками, глинистыми сланцами и известняками, которые падают на север под углом от 18 до 21°, почти параллельно склону долины. Это падение сохраняется и в более молодых пластах, образующих северный склон долины. Примерно в середине южного склона некогда существовал холм Шип-Маунтин, сложенный песчаниками толщи Тенслип. Эта толща наклонно залегает на маломощном горизонте глинистых сланцев, отделяющем ее от массивного известняка. Песчаники Тенслип были на значительную глубину прорезаны рекой и весьма неустойчиво удерживались на подстилающих сланцах, также имеющих наклонное залегание.



Поперечный разрез оползня в долине Гро-Вентур — классически простой пример оползания горных пород, подмытых рекой.

Эта ситуация сохранялась до 23 июня 1925 г., когда после сильных дождей и таяния снега огромный оползень увлек за собой холм Шип-Маунтин вниз в долину реки Гро-Вентур. За несколько минут в долину переместился массив песчаников Тенслип длиной 1,5 км, шириной 600 м и мощностью 60 м. Фронт оползня поднялся по северному склону более чем на 100 м. После этого оползень остановился, образовав в реке завал высотой около 70 м. На крутой скалистой вершине Шип-Маунтин обнажился известняк, и только останец песчаника напоминает о ее прежнем облике. Лес, покрывавший склон, в основном сохранился, но при оползании песчаника был перенесен на образовавшуюся в долине реки перемычку. При этом многие деревья сохранили свое вертикальное положение, некоторые погибли, другие были пригнуты к земле и покалечены, но продолжают жить. И сейчас этот лес привлекает причудливыми формами деревьев, у которых молодые ветви растут вертикально вверх от старых, поваленных стволов.

К нашему времени песчаник фактически уже разрушен выветриванием, однако можно с уверенностью сказать, что во время оползня он перемещался в основном как монолитный массив — ведь лес сохранился почти полностью, словно бережно пересаженный, лишь немногие деревья были погребены под обломками. К счастью, оползень не нанес значительного материального ущерба и человеческих жертв не было, хотя запруженная река образовала озеро, затопившее несколько крупных ферм, расположенных выше по долине. Часть воды просочилась через оползневую запруду, но 18 мая 1927 г. весенний паводок снова повысил уровень воды в озере и промыл в завале глубокий канал. Местный лесничий предвидел это и за час до катастрофы успел предупредить людей, живших вниз по течению, о надвигающейся опасности,

так что большинство из них вовремя покинули свои дома. Воды озера устремились через промоину и вызвали сильное наводнение. Оно продолжалось 5 ч и смыло деревню Келли. Шесть человек не успели спастись и утонули в бушующем потоке. Теперь озеро почти полностью осушено и река мирно течет по ущелью, образовавшемуся в оползневом обломочном материале.

Геология оползня Гро-Вентр была классически простой, и эту катастрофу можно было предвидеть, однако ее точное время определить было невозможно. Непосредственной причиной этого оползня, как и многих других, явилось воздействие воды — дождя и талого снега.

Вода в оползнях

Дождевые и талые воды являются важным фактором оползневой деятельности. Одну из двух главных дорог в Непале — дороге от Покхары к югу, в сторону Индии — почти ежегодно преграждали небольшие оползни, происходившие во время летних муссонов. Обломки оползших пород сгребали с дороги лопатами, и на этом борьба с оползнями прекращалась до следующего муссона. Грядущую опасность не оценивали, пока в 1976 г. муссон не вызвал большой оползень, приведший к разрушению деревни Пахирикхет и к гибели 150 человек.

В бразильском городе Сантус в марте 1956 г. 100 человек погибло во время оползней, последовавших за периодом проливных дождей. Дождевая вода может вызвать оползни почти в любой неустойчивой геологической структуре. Сильные дожди часто приводят к оползням в холмистых районах Гонконга: почвенный покров и залегающая ближе к поверхности выветрелая порода скользят по подстилающему граниту. Так, 18 июня 1972 г. оползень захватил участок шириной 200 м и разрушил лачуги в районе Квантун в Цзюмуне; при этом погибло более 100 человек. В июле того же года, когда однажды количество осадков на японском острове Камидзима за день превысило 40 см, в консолидированных мезозойских сланцах и песчаниках возник оползень; было разрушено 350 домов и погибло 112 человек.

Сильный дождь, прошедший 13 сентября 1936 г. в Норвегии, вызвал оползень в слаботрециноватом гранито-гнейсе. Сама оползневая масса, сорвавшаяся с очень крутого горного склона, не вызвала разрушений. Но она обрушилась в озеро Лоен и послужила причиной возникновения огромной волны, которая ринулась на деревню, находившуюся на противоположном берегу, и смыла ее вместе с большей частью населения.

Иногда считают, что вода вызывает оползень вследствие того, что в ее присутствии уменьшается трение пород. Но совершенно очевидно, что это не так. У некоторых минералов, в том числе кварца, в сухом состоянии коэффициент трения ниже, чем в мокром. Кроме того, большинство горных пород всегда достаточно



Оползень Мам-Тор, в результате которого зимой 1977 г. была сильно разрушена дорога, проходящая поперек оползня.

увлажнено и содержит тонкие водные пленки, которых вполне достаточно, чтобы сыграть роль «смазки».

Вода вызывает оползневое движение по ряду других причин. Она может проникать в поровые пространства или трещины в породах, создавая в них дополнительные нагрузки. Она стимулирует процессы внутреннего выветривания материала, что выражается как в растворении цементирующих компонентов, так и в образовании глинистых минералов вследствие гидратации других силикатов. Эти факторы могут способствовать возникновению оползней. Но протекают соответствующие им процессы медленно и, по-видимому, они не играют в этом деле решающей роли.

Сильный дождь и внезапное намокание оказывают совершенно иное воздействие: увеличивается водонасыщенность грунтов и возрастает давление поровых вод. Это, вероятно, и является основным фактором, вызывающим оползни. Повышенное давление поровых вод буквально разъединяет зерна минералов и блоки пород, уменьшая сцепление, поверхностное натяжение и сопротивление трения. Если давление воды достаточно высоко, может даже произойти разжижение неуплотненных осадков. Сильный дождь в течение суток может вызвать повышение уровня вод и увеличение порового давления, достаточные для того, чтобы оползень произошел даже в тех породах, которые в более сухих условиях абсолютно устойчивы. Именно это и послужило причиной оползней в Гонконге и обрушений породы в Гольдау, долине Гро-Вентр и на острове Камидзима.

Повышение давления воды было причиной оползня и на горе Мам-Тор, находящейся в самом сердце Скалистого края в Англии. Среди местного населения эта гора известна под названием Шиверинг-Маунтин («дрожжащая гора»). Это название она получила благодаря тому, что вниз по ее восточному склону в сторону Хопдейла постоянно движется оползень. За тысячи лет оползневая масса продвинулась примерно на 500 м, в настоящее время она

медленно ползет со скоростью от нескольких сантиметров до 0,3 м в год. К сожалению, этот оползень дважды пересекается дорогой, построенной в 1802 г. и являющей яркий пример того, где не следует строить дороги. Однако у инженеров есть прекрасное оправдание: дорогу больше нигде было прокладывать и поэтому приходится мириться с тем, что оползание постоянно разрушает дорожное покрытие и необходимо проводить непрерывные ремонтные работы.

Зимой 1977 г. до конца февраля на вершине Мам-Тор лежал мощный снежный покров. Затем прошел сильный дождь, и снег быстро растаял. Вода ослабила всю оползневую массу, которая, как и следовало ожидать, начала двигаться, причем отнюдь не медленно. Разрывы и трещины разверзались в дорожном полотне, целые участки дороги проваливались, и на ее поверхности образовались ступени высотой до полуметра. Через несколько недель оползание породы прекратилось, но дорога была настолько разрушена, что движение по ней пришлось закрыть почти на год.

Повышение давления воды, вызвавшее оползень, первоначально возникло на вершине Хопдейл, где каменноугольные песчаники и сланцы серии Мам-Тор залегают почти горизонтально на сланцах Эдейл. Подстилающие сланцы и послужили водоупорным горизонтом, задержавшим воды, которые просачивались вниз через песчаники. Оползневые явления, происходившие в 1977 г., оказали воздействие на уже оползшую массу, которая состояла из смеси обломков песчаников и сланцев. Массы воды скапливались в этом обломочном материале, и скважины, пробуренные после оползня 1977 г., обнаружили артезианскую воду на глубине более 20 м.

Насыщенные водой рыхлые образования и коренные породы обычно очень легко обрушаются, и это следует учитывать при строительстве в целом и проложении дорог в частности, чего не было сделано в данном случае. Конечно, дорогу в районе Мам-Тор можно перенести на участки, которые представляются сейчас наименее подверженными оползневым сдвигам, но это лишь временная мера. Для постоянного укрепления склона необходимо проложить сеть глубоких водотоков, которая предотвратит дальнейшее повышение давления поровых вод.

Искусственный дренаж может воспрепятствовать развитию оползня, а искусственное затопление может его вызвать. Примером тому является катастрофа, которая произошла на реке Вайонт. Русло реки Вайонт, текущей в Итальянских Альпах к северу от Венеции, проходит по глубокому ущелью на дне широкой ледниковой долины. Обширное пространство при слиянии двух рек — Вайонт и Пьяве — казалось идеальным местом для сооружения водохранилища, и в 1960 г. Адриатическое общество электрификации воздвигло здесь плотину. Сводовая часть этой арочной плотины составляла всего 157 м, по своей высоте — 253 м — плотина занимала второе место в мире. К сожалению, геология

участка, занятого водохранилищем, оказалась достаточно сложной, хотя место для плотины было выбрано прекрасное.

Эта долина протягивается вдоль синклинали в мезозойских известняках. С южной стороны водохранилища геологическая обстановка была наиболее сложной. Мощные известняки, слагающие склоны горы Маунт-Ток, круто падают в направлении оси синклинали, а затем выполаживаются и обнажаются в ущелье реки Вайонт. Среди известняков часто встречаются их тонкослоистые, с прослоями мергелей разности. На склоне Маунт-Ток эту массу породы удерживала сила трения с подстилающими наклонно залегающими пластами. Две группы трещин, параллельных бортам широкой ледниковой долины и врезанному послеледниковому ущелью, пересекались как раз под выпуклым перегибом склона вдоль южного берега водохранилища, что делало этот склон менее устойчивым. Кроме того, было установлено, что в доисторическое время здесь произошли два оползня — недалеко от городка Пиннеда и близ Кассо. Таким образом, геологическое строение местности заставляло позаботиться о мерах предосторожности. Поэтому до возведения плотины, а также во время ее строительства велись непрерывные геологические исследования с целью оценки потенциальной опасности возникновения оползней с горы Маунт-Ток.

Исследования склона Маунт-Ток, проведенные в 1957 и 1958 г., показали, что здесь возможны камнепады, объем которых не будет превышать 1 млн. м³. Особой угрозы такие оползни, конечно, не представляют. На следующий год в результате сейсмических исследований было установлено, что под поверхностным слоем рыхлого обломочного материала на глубине 20 м залегает твердая порода. В 1960 г. при повторных исследованиях твердые породы были обнаружены лишь на глубине 50—70 м. Но тогда никто еще не предполагал, что этот факт может объясняться постепенным разрушением породы. Скважины, пробуренные в 1959 г., не встретили в известняках плоскостей скольжения, и только со временем выяснилось, что скважины эти были просто недостаточно глубокими.

В 1960 г., когда началось заполнение водохранилища, инженеры установили контрольные реперы, позволяющие регистрировать любые движения грунта. Вскоре было зафиксировано медленное латеральное оползание, но никто не придавал ему особого значения. В это же время было замечено, что холм Пиннаколо, расположенный у подножья склона Маунт-Ток и выступающий в ущелье реки Вайонт, медленно наклоняется. Вращательное движение блоков известняка свидетельствовало о том, что этот холм чем-то подталкивается с юга. В октябре 1960 г. скорость движения всего склона возросла и в известняке развилась трещина. Однако после того как уровень воды в водохранилище понизился, движение прекратилось. Четвертого ноября 1960 г. за 10 мин в водохранилище обрушился небольшой оползень известняка объемом

900 000 м³, но он не был неожиданным и поэтому особой тревоги тоже не вызвал. Более сильные подвижки, наблюдавшиеся в октябре, были объяснены трещиноватостью пород, характером их залегания, сильным дождем, а также эффектом плавучести, вызванным подъемом уровня воды в водохранилище.

В октябре—ноябре 1960 г. весь склон горы Маунт-Ток ежедневно перемещался в среднем на 4,3 см, это движение продолжалось в течение 10 суток. Было установлено, что перемещение заметно ускорялось, когда водохранилище оказывалось заполненным до наиболее высокой отметки. Поэтому заполнение стали проводить этапами и под постоянным контролем, и в последующие два года эта взаимосвязь подтвердилась. К сентябрю 1963 г. общее перемещение склона Маунт-Ток, варьируя на различных участках, составило 4 м. Смещение произошло в основном как результат подвижек в те периоды, когда уровень воды в водохранилище достигал новых высоких отметок. Вот что писал в своем отчете один из инженеров: «Скорость движения обычно возрастала лишь в том случае, когда впервые увлажнялись новые объемы породы. Предполагалось, что в конце концов эта масса достигнет равновесия или же, в крайнем случае, будет перемещаться настолько медленно, что это не вызовет никаких серьезных последствий». Это предположение было частично основано на изогнутой форме оползневого массива, судя по которой можно было заключить, что рано или поздно оползневая масса стабилизируется на своем относительно пологом основании. Но делать подобные выводы в то время, когда миллионы тонн породы нависали над водохранилищем, грозя каждую минуту сорваться и обрушиться на долину, где жили тысячи людей, было большой ошибкой.

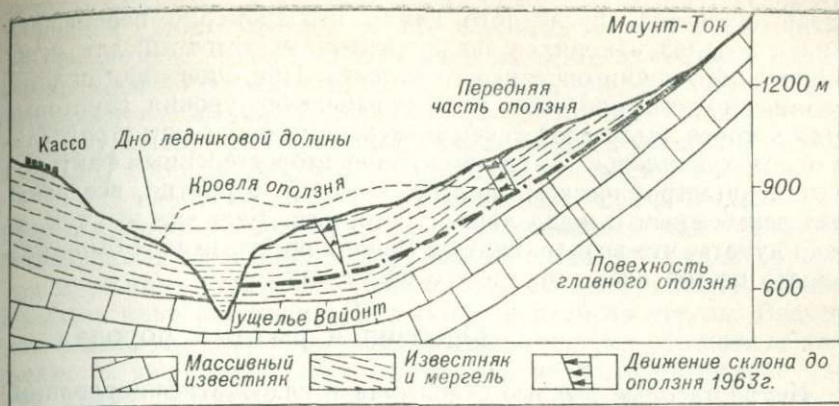
В июле 1963 г. отметка воды в водохранилище впервые превысила 690 м над уровнем моря, и склон Маунт-Ток начал двигаться быстрее. К концу сентября он уже перемещался на 3 см в сутки. Хотя это движение было не столь быстрым, как в 1960 г., оно было тревожным симптомом. Поэтому уровень воды опять понизили до 690 м. При таком уровне волна высотой 20 м (максимально возможная при медленно развивающемся оползне) не перехлестнула бы через плотину. Однако когда уровень воды понизился, склон горы все еще продолжал двигаться. Он перемещался даже быстрее, чем раньше. Первого октября животные, пасшиеся на склонах Маунт-Ток, вдруг забеспокоились и покинули район развития оползня. Они оказались более чувствительными к слабым сотрясениям грунта, чем человек. Контрольные наблюдения показали, что 8 октября весь оползающий участок уже двигался как единая масса, на следующее утро скорость движения достигла 20 см в сутки. В этот же день прошел сильный дождь, и жители деревни, расположенной ниже плотины, встревожились. Но власти не приняли никаких мер, и население эвакуировано не было.



Водоохранилище Вайонт; разрушительный оползень с горы Маунт-Ток и масштабы вызванных паводковой волной разрушений в городах и деревнях, расположенных в предгорьях.

В 10 ч 41 мин вечера 9 октября 1963 г. раздался громopodobный треск и весь склон Маунт-Ток устремился вниз в виде огромного оползня. Около 350 млн. м³ породы с шумом прокатилось вниз со скоростью 110 км/ч в сторону водохранилища, частично перенеслось через него и взметнулось на 120 м вверх по противоположному берегу. В одно мгновение дно водохранилища было покрыто слоем обломков мощностью около 400 м и уровень воды резко повысился. В восточной части водохранилища возникла волна высотой 50 м; она и нанесла значительный ущерб деревне Сан-Мартино. Но в районе, расположенном вниз по течению, положение было еще более плачевным. Волна неслась, возвышаясь на 216 м над уровнем водохранилища; к счастью, она не коснулась деревни Кассо, однако некоторые дома здесь все же были разрушены сильным порывом ветра.

Затем эта огромная волна перекатилась через плотину, которая, к чести ее проектировщиков, осталась в полной сохранности. Ни один из видевших эту волну в живых не остался, однако по размерам участка земли, на котором была уничтожена вся растительность, можно представить, что через плотину промчалась стена воды высотой более 150 м. По ущелью Вайонт пронеслось 40 млн. м³ воды, и буквально через 2 мин после обрушения Маунт-Ток паводковая волна высотой 80 м достигла долины реки Пьяве, где раскинулся город Лонгароне. В одно мгновение он был смыт с лица Земли. Практически все здания превратились в груды обломков, все население погибло. Некоторые жители окрестных деревень, услышав страшный рев паводковой волны, устремились к возвышенным участкам, но их бег был слишком медленным по сравнению со скоростью ревущего потока. . . Волна разрушила также лежавшие на ее пути селения Пираго, Вильянова и Ри-



Поперечный разрез оползня в водохранилище Вайонт.

вальта. Она неслась, словно смерч. Через 15 мин волны уже не было, но долина реки Пьяве являла жуткое зрелище: она была покрыта валунами, обломками камней и строений, среди которых, как на поле брани, лежали трупы 2117 человек.

Плотина на реке Вайонт стала почти бесполезной. Оползневая масса наполовину заполнила водохранилище. Почему же на горе Маунт-Ток произошел такой сильный оползень, и можно ли было его предсказать? Элементы залегания пород, присутствие прослоев мергеля в известняках, врезание ущелья Вайонт и наличие зон трещиноватости — все это указывало на возможность оползания. Тем не менее предполагалось, что этот процесс будет медленным, а обрушение материала у подошвы оползневого склона даже усилит со временем его устойчивость. Атмосферные осадки никоим образом не влияли на зарегистрированные подвижки и не были причиной оползня. Сильный дождь, прошедший в день катастрофы, только увеличил вес неустойчивой массы породы. Заполнение водохранилища и сопровождавшие его повышения давления поровых вод, несомненно, способствовали медленному оползанию, которое продолжалось в течение двух лет, но они не могли иметь никакого отношения к внезапному обрушению, происшедшему 9 октября 1963 г. Уровень воды в водохранилище также не оказывал существенного воздействия на верхнюю часть оползневого массива.

Механизм внезапного движения может быть объяснен двумя причинами. После оползня было замечено, что главная плоскость скольжения сечет слоистость; иными словами, произошло срезание толщи пород, а не просто соскальзывание вдоль плоскостей напластования. Кроме того, регистрация подвижек, проведенная в одной из буровых скважин до октябрьского оползня, показала, что породы в приповерхностной зоне двигались быстрее, чем на глубине. Это может свидетельствовать о наличии разлома, который

активизировался, после того как в неравномерно перемещающихся породах накопился запас энергии, достаточный для мгновенного обрушения оползневого массива. При оползании склона, несомненно, сыграло свою роль и изменение уровня грунтовых вод, которое было следствием инженерных работ при строительстве водохранилища. Но оно было лишь второстепенным фактором в этом катастрофическом оползне, который, вероятно, все равно был неизбежным и ждал лишь своего часа. Если все это так, то надо думать, что водохранилище Вайонт просто нельзя было размещать на той площади, где его построили.

Оползни в рыхлых породах

Неуплотненные рыхлые отложения и слаболитифицированные осадочные породы легко деформируются, даже если в них нет трещин и разрывов, обычно вызывающих обрушение твердых коренных пород. В инженерной геологии горные породы, на которых предполагается вести строительство, называются грунтами. Особая наука — механика грунтов — при помощи лабораторных опытов, а также на основании математического анализа проб грунта позволяет рассчитать устойчивость склонов, предупредить возможную опасность или разрешить имеющиеся спорные вопросы. При гражданском строительстве особенно серьезные проблемы возникают в том случае, когда осадки и породы неоднородны. Обнаружить неоднородность пород бывает нелегко. Эта неоднородность может быть обусловлена присутствием мелких трещин, незначительных структурных изменений, развившихся вкост напластования или ранее существовавших поверхностей обрушения, которые в данный момент кажутся устойчивыми. Поверхности обрушения особенно широко распространены, хотя их и трудно обнаружить, в оползневых районах; они могут быть связаны с отложениями, образовавшимися в различных климатических условиях. Оползневые участки, подвижные в древности, при многолетней мерзлоте и современном климате могут сохранять устойчивость до тех пор, пока в районе не начнутся строительные работы; тогда движение этих участков может возобновиться. Поэтому инженер-геолог должен сделать все необходимое, чтобы не вызвать развитие новых оползней и не привести в движение старые.

В 50-х годах нашего века в одном из районов Лос-Анджелеса периодически возобновлялись проявления оползней, вызывавшие значительные разрушения. В результате судебного расследования, начатого по инициативе группы удрученных домовладельцев, ответственность за случившееся была отчасти возложена на власти округа Лос-Анджелес, которые планировали строительство зданий и дорог в этом районе. Администрация округа проиграла это дело и заплатила домовладельцам более 5 млн. долл.

Основной причиной оползней в неуплотненных горных породах обычно является отсутствие в данном грунте сопротивления

сдвигу, поводом для которого может стать деятельность человека. В районе города Ментона на юге Франции вырубали оливковые деревья, чтобы создать на этом месте плантацию гвоздик, приносящих гораздо большую прибыль. Однако при этом не учли возможных последствий. В результате того что грунт потерял связующую основу, роль которой играли корни деревьев, возникли оползни, которые унесли 11 человеческих жизней.

В Чехословакии над городом Гандлова были распаханы участки склонов, которые раньше использовались как пастбища. В дождливый сезон 1960 г. неожиданно резко повысился уровень вод и склоны утратили устойчивость; 40 млн. т почвы начало сползать вниз по склону. Над городом нависла угроза. Введенная в действие аварийная дренажирующая система остановила движение за два месяца, но к этому времени было разрушено уже 150 домов. У города Уайтхорс на плато Юкон в Канаде были вырублены деревья на краю 60-метровой террасы. Это также повлекло за собой обрушение склонов. После того как на месте вырубленных деревьев была расчищена площадь для строительства дороги, возникло множество оползней и грязевых потоков, обрушившихся на улицы города. Остановить их удалось лишь благодаря активной программе дренажирования и возобновлению растительного покрова у кромки террасы.

Чтобы вызвать движение потенциального оползня, достаточно придать склонам, сложенным рыхлыми породами, бóльшую крутизну. Это может быть вызвано воздействием естественных причин, например, подмывом береговых обрывов морем. В Бартоне на южном побережье Англии, где берега сложены третичными глинами и песками, часто происходят оползни, развивающиеся вследствие сдвига по плоскостям напластования пород. Многие дома, расположенные над береговым обрывом, находятся под постоянной угрозой быть разрушенными. Севернее, к востоку от города Гулль, береговая линия характеризуется быстрой эрозией, не ослабевающей со времен Римской империи. Обрывистые берега высотой до 12 м, сложенные относительно однородной валунной глиной, постоянно обрушаются здесь вследствие оползней. При этом дороги и деревни постепенно перемещаются в сторону приливно-отливной полосы.

На побережье Тихого океана к юго-западу от центра города Сан-Франциско береговые обрывы имеют высоту 120—180 м. Слагающие их пески плиоцен-плейстоценового возраста весьма неустойчивы, тем более что по северной оконечности этого оползневого района проходит активный разлом Сан-Андреас. Оползание пород в большинстве случаев происходит по относительно водонепроницаемым пластам алеврита и глины. Но на крутых обрывах пески обрушаются и сами по себе, будучи недостаточно прочными, чтобы противостоять атакам моря. Проходившее здесь шоссе первоначально располагалось вдоль берегового уступа, такое соседство всегда было чревато опасностью. С 1950 по 1957 г.

шоссе закрывали 17 раз, в общем на 174 дня, чтобы устранить повреждения, нанесенные оползнями. После же землетрясения 1957 г. движение по шоссе было совсем прекращено. Несмотря на то что на береговых обрывах оползни происходят очень часто, городское строительство до последних лет велось совсем близко от их кромки, и сейчас дни многих домов в городе сочтены.

В 1907—1914 гг., когда Соединенные Штаты вели строительство Панамского канала, в его стенах произошло несколько оползней. Для участка Гайллард-Кат, проходившего через водораздел, первоначальный проект был составлен лишь на основании топографической съемки. Было решено расположить стены в виде террас под углом 56° к горизонтали. Но по мере ведения земляных работ выяснилось, что делать стены выемки под таким углом можно только в вулканических породах, а в выходящих на поверхность осадочных породах это грозило бы катастрофой.

Еще хуже обстояло дело с рыхлыми, несцементированными осадками свиты Кукарача третичного возраста. Эти сланцы с прослоями песчаников и конгломератов обнажались в широкой синклинали, через которую должна была пройти трасса будущего канала. Породы оказались очень рыхлыми и постоянно обрушались. Кроме того, было замечено, что вся свита Кукарача движется по поверхности подстилающих известковых песчаников. Был обнаружен ряд участков, где это движение продолжалось в течение многих лет. Площадь самых крупных из них, а таких было три, превышала 300 м^2 . Все попытки укрепить стены будущего канала оказались тщетными. Сваи были просто-напросто смыты, а свободное дренирование поверхностных вод практически не уменьшало вес неустойчивых масс. Оползни продолжали двигаться, и из русла канала приходилось постоянно удалять накапливавшийся там обломочный материал. В настоящее время наклон стен канала сделан равным 11° вместо запланированных 56° , и оползневая зона отстоит от канала по меньшей мере на 300 м. Но уровень грунтовых вод и поныне не приведен в полное соответствие с уровнем воды в канале, поэтому возобновление оползневых движений вполне возможно.

Исследования показали, что в районе Панамского канала можно было различить три типа оползней. Первый — это поверхностное смещение обломочного материала, которое имеет незначительные масштабы и особого беспокойства не причиняет. Ко второй группе относятся крупные оползни, скользящие по плоскостям напластования пород. Третий, наиболее распространенный, тип оползней приурочен к подошве глинистых отложений свиты Кукарача; эти оползни сопровождаются вращательными движениями и вызывают поднятие и смещение дна канала. Если бы американские инженеры располагали сведениями, которые дает современный уровень знаний, им удалось бы предсказать возможные оползни и спланировать затраты более рационально, чем это было сделано при проектировании канала.

Изучение устойчивости склонов, сложенных глинами, дает ключ к прогнозированию оползней, подобных панамским. Если угол наклона таких откосов составляет от 7 до 12°, оползневые движения со временем прекратятся. Разные значения угла обусловлены геологическими факторами, например содержанием в породе зерен того или иного размера либо состава. Более древние породы обычно более устойчивы, но при лабораторных исследованиях проб грунта необходимо определить сопротивление сдвигу и проверить, действительно ли это так в данном конкретном случае. С течением времени в породах могут происходить медленные структурные изменения. Экспериментально может быть, например, установлено, что изучаемая глина имеет максимальное сопротивление сдвигу на стадии первоначальной деформации, но по мере того как деформация усиливается, сопротивление породы постепенно уменьшается, переходя в так называемое остаточное сопротивление сдвигу. Это объясняется главным образом перемещением зерен, слагающих породу, и изменением общего объема пор. Знание подобных изменений очень важно, когда мы имеем дело с глинами, так как оно позволяет судить о том, в каких случаях может произойти обрушение склона.

Находясь длительное время под воздействием деформаций, глина становится более рыхлой. Это особенно свойственно уплотненным глинам, т. е. таким, которые были сжаты при захоронении на большой глубине, а затем вследствие эрозии земли под меньшим давлением. При этом обычно наблюдается уменьшение сопротивления сдвигу от максимального до остаточного.

В районе Лондона обрушились стены нескольких железнодорожных выемок, сложенные третичными глинами. Одна из стен — в Кенсал-Грин — обрушилась через 116 лет после проведения земляных работ, когда сопротивление сдвигу в породе упало на 60%. Другая стена — в Садбери-Хилл — рухнула через 49 лет, ее сопротивление сдвигу уменьшилось на 80%. Исходя из опыта таких наблюдений, можно контролировать скорость изменения сопротивления сдвигу и, следовательно, рассчитать, когда тот или иной склон может обрушиться. Расчеты показали, что многие лондонские железнодорожные выемки, построенные в начале века, уже достигли критического возраста и требуют проведения работ по их дополнительному укреплению.

Оползни течения

В оползне течения обломочный материал обильно насыщен водой, а отчетливая плоскость скольжения отсутствует. Разжижение пород может произойти по разным причинам. Одна из наиболее частых причин — нарушение «чувствительных» глин, примером чего служит катастрофа в городе Николé в Канаде. Николé — небольшой городок, расположенный на южной стороне долины

реки Святого Лаврентия в Квебеке. Он находится на низкой террасе, примыкающей к реке Николе — притоку реки Святого Лаврентия. Терраса некогда была сложена мелкозернистыми песками, имевшими мощность 2,5 м и залегавшими на сплошной толще серых слоистых глин, относящихся к формации Леда. Незадолго до полудня 12 ноября 1955 г. крупный блок террасы сполз в реку и образовалась воронка размером 100 × 200 м и глубиной 5—10 м. Движение продолжалось всего несколько минут, однако за это время были уничтожены школа, к счастью, пустая, и несколько домов. Погибло три человека.

Оползневый обломочный материал вел себя почти как жидкость. Это был классический оползень течения, а причиной его послужила «чувствительная» глина формации Леда. Чувствительность глины — это снижение прочности, вызванное разрыхлением или нарушением структуры породы. Чувствительность таких материалов, как глины Леда, которые могут быть названы «высокочувствительными» или пльвучими, составляет около 90 %. Этого вполне достаточно, чтобы при нарушении глина вела себя как жидкость и могла течь. Образцы глин Леда выдерживали испытание на одностороннее сжатие 100 кПа, и все же эту глину можно выливать как жидкость после простого помешивания, не добавляя ни капли воды. Чувствительность глин Леда, возможно, обусловлена их осаждением в обстановке спокойного мелководного моря вблизи края ледника, образовавшегося во время последнего оледенения. Вследствие этого в глине более 50 % некоагулированных зерен имеет размер менее 2 мкм, к тому же 50 % массы всего материала составляет вода.

В таком состоянии сцепление зерен обеспечивается присутствием в воде соли. Послеледниковое поднятие этой толщи привело к тому, что через глины стала просачиваться дождевая вода, постепенно удаляя соль из вод, заполнявших поры. Уменьшение содержания соли примерно на одну десятую по сравнению с первоначальным значением сопровождалось потерей связи между зернами. В таком выщелоченном состоянии «чувствительные» глины могут изменить свою структуру и стать текучими под воздействием практически любого внешнего фактора. Вообще говоря, вопрос о причинах чувствительности глин весьма сложен, и вымывание солей — лишь одно из возможных объяснений этого явления. В числе других причин можно назвать добавление диспергирующих агентов, например соединений гумуса из залегающего выше торфа, а также разрушение неустойчивого гидроксидного цемента. По-видимому, на этот процесс могут одновременно влиять несколько факторов.

Основная причина оползня в городе Николé заключалась в том, что нижележащая глина становилась постепенно все более рыхлой и наконец превратилась в «чувствительную». Непосредственным стимулом оползня могло быть либо увеличение давления воды вследствие повреждений канализации, либо вибрации

при движении транспорта и при ремонте канализационной сети. К сожалению, в то время, когда строили город Николé, еще ничего не было известно о свойствах «чувствительных» глин. В настоящее время такие глины распознаются по их геологической истории, гранулометрическому составу и содержанию воды. Их вполне можно определить в лабораторных условиях. Поэтому теперь никому не придет в голову возводить здания на участках, подстилаемых «чувствительной» глиной, как это было при строительстве города Николé.

«Чувствительные» плейстоценовые глины морского происхождения широко распространены на приподнятых участках низменностей на востоке Канады и в Скандинавии. За последнее столетие в этих районах было зарегистрировано не менее 40 крупных оползней. Самый разрушительный из них произошел в Норвегии в 1893 г., когда 70 млн. м³ глины сползло в долину Вердаль рядом с Тронхеймсфьордом. Этот оползень течения разрушил 22 фермы и унес 111 человеческих жизней. Разжиженная глина двигалась как волна — сначала очень быстро, а затем все медленнее и медленнее, однако она успела за 45 мин продвинуться на 8 км вниз по долине, где остановилась и постепенно затвердела. Эта жидкая грязевая волна причинила значительный ущерб, хотя были и казусы: одной семье удалось «проехать верхом» на грязевом потоке более 6 км, сидя на крыше жилого дома. Но у большинства людей не было никакой надежды на спасение, когда их фермы, расположенные в долине, были затоплены этой грязевой волной.

В качестве причины, провоцирующей движения таких грунтов, нередко выступает сам человек, точнее, его действия. Так, в 1950 г. в Сурте (долина Гота, Швеция) в одном из населенных районов шло строительство. Вибрации грунта при забивании свай вызвали оползень «чувствительной» глины. За 3 мин грунт переместился на 130 м, при этом был уничтожен 31 жилой дом и разрушены значительные участки шоссе и железной дорог. К счастью, обошлось почти без человеческих жертв — погиб только один человек. В декабре 1977 г. оползень течения произошел в районе, который считался безопасным в этом отношении. В Туре, пригороде Гётеборга, поток снес 67 домов и погибло 8 человек.

Город Сен-Жан-Вьянней в Квебеке расположен в защищенной лощине, окруженной террасами, но под ним залегает пользующая ныне дурной славой глина Леда. Незадолго до описываемых событий было установлено, что эта лощина представляет собой верхний конец большого оползня течения, который произошел здесь в XV или XVI веке. 4 мая 1971 г. часть оползня опять начала двигаться. Первыми в 7 ч вечера эти подвижки ощутили животные: их невозможно было загнать на некоторые пастбища. А 3 ч спустя эти пастбища были уничтожены оползнем. Оползневый процесс быстро разрастался. К сожалению, было уже темно и

людей не смогли оповестить о надвигающейся опасности. Тем временем самая подвижная часть оползня разрушила большой жилой массив. Один из оставшихся в живых очевидцев катастрофы видел, как дороги, автобус, машины и 40 домов исчезли в воронке глубиной 20 м и более 0,5 км в поперечнике. Именно эта воронка и была местом образования оползня. Обломочный материал в виде 15-метровой волны переместился вниз по небольшой долине на расстояние 3 км и влился в реку Сагений. Погиб 31 человек. После катастрофы было эвакуировано все население города, так как укрепить неустойчивую «чувствительную» глину даже под очень пологими склонами практически невозможно.

Чувствительные, или пльвучие, глины могут разжижаться при малейших внешних воздействиях либо под влиянием медленных внутренних изменений, незаметно происходящих в породе. Наиболее сильно сказываются на них природные нарушения, возникающие вследствие вибраций при землетрясениях. В подобных условиях перешли в текучее состояние глины Бутлеггер-Коув-Клей в районе города Анкоридж на Аляске. Установлено, что в окрестностях Сан-Франциско оползни течения происходят главным образом в хорошо сортированных, насыщенных водой песках, которые при вибрации очень быстро разжижаются. В приведенных выше примерах разжижение было вызвано тем, что поры подвергшихся вибрации пород были насыщены водой. То же самое может произойти, если обширные поры породы заполнены воздухом, что характерно, например, для таких материалов, как лёсс. Наиболее разрушительными из когда-либо зарегистрированных в мире были катастрофические оползни течения в сухом лёссе, происшедшие во время землетрясения 1920 г. в провинции Ганьсу (Китай); при разрушении жилищ, построенных в лёссовых террасах, погибло около 100 000 человек.

Сотни оползней течения были отмечены в неуплотненных песках на побережье острова Зеландия, находящемся во владении Дании. Оползни здесь наблюдаются в основном при полной воде и в прилив. Пески, первоначально имеющие поверхностный наклон около 10° , обычно стабилизируются, когда наклон откосов достигает $3-4^\circ$. Повышенное содержание воды явилось также причиной образования множества обломочных и грязевых потоков в районе города Санта-Моника на юге Калифорнии во время сопровождавшихся ливнями ураганов в январе 1969 г. Оползни развивались на крутых склонах гор, окружающих многочисленные деревни, расположенные в столь привлекательном, но опасном для строительства жилых домов месте. Вполне типичным был оползень в каньоне Топанга. Он произошел в самый разгар бури, начался на склоне около 40° , совершенно неожиданно устремился вниз, и его грязевой поток поднялся выше крыш домов; при этом три человека погибли.

Оползень, который начинается как относительно безобидное перемещение блоков породы, может под воздействием рассмотрен-

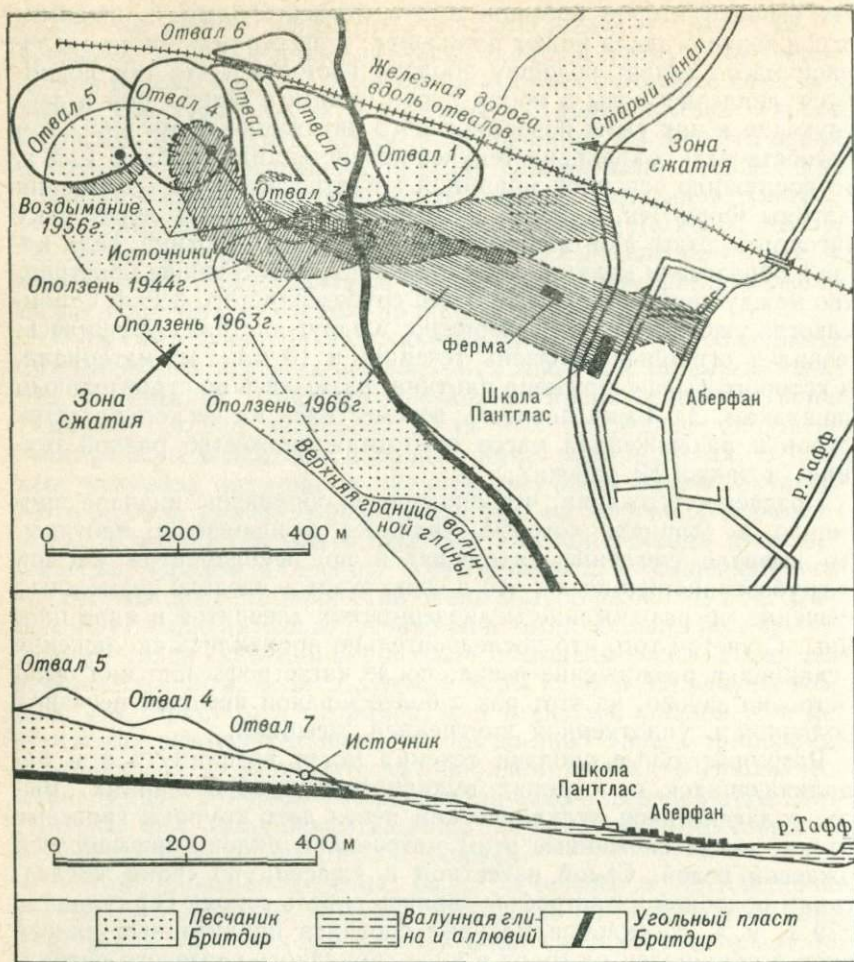
ных выше факторов внезапно стать стремительным и опасным. Разжижение осадков может произойти, если верхняя часть оползневой массы сдавит подошву оползня настолько, что там поднимется давление воды в порах пород. Малые размеры пор и действующие в них силы поверхностного натяжения будут при этом способствовать сохранению текучей консистенции грунта. В 1938 г. это послужило основной причиной катастрофического обрушения плотины Форт-Пек, которая в то время возводилась через реку Миссури в штате Монтана. Это была намывная плотина, тело которой образовали мелкий песок и алевроит, заполнившие пространство между двумя стенами из более грубозернистого песка. Строительство уже было почти завершено, и вдруг плотина обрушилась. Развился огромный оползень течения, и 10 млн. м³ материала, из которого была сооружена плотина, размылись по строительным площадкам. За 3 мин оползень переместился на несколько сотен метров и разжиженная масса поглотила множество разной техники, а также 80 рабочих.

Позднее утверждали, что оползневое обрушение вначале произошло в сланцах, которые являлись фундаментом плотины. Это вызвало смещение находящейся под фундаментом насыпи из грубозернистого песка, что в свою очередь сделало возможным смещение и разжижение мелкозернистых алевроитов в ядре плотины. С учетом того что последовательно проявились скольжение в сланцах и разжижение песка, после катастрофы плотина была построена заново, на этот раз с более мощной внешней песчаной оболочкой и уплотненной внутренней засыпкой.

Разрушительные оползни течения могут возникнуть и в накапливающихся на склонах вулканогенных образованиях. Быстро отлагающийся вулканический пепел дает крупные грязевые потоки, когда сложенные этим материалом склоны насыщаются дождевой водой. Самой известной и ужасной по своим последствиям подобной катастрофой явилась гибель города Геркуланум: в 79 г. н. э. со склонов Везувия сорвался пропитанный влагой пепел и обрушился на город в виде громадного грязевого потока. Город вместе с населением был обречен.

Не менее страшны и разрушительны потоки любого обломочного материала вулканического происхождения. Так, в 1953 г. на вулкане Руапеху в Новой Зеландии обломочный материал был подхвачен весенней паводковой водой. Образовался грязевой поток огромной разрушительной силы. Этот поток промчался вниз по реке Уонгеху и смыл железнодорожный мост Танджива за две минуты до того, как по нему должен был пройти поезд. Поезд сорвался с разрушенного железнодорожного пути, и погибло 154 человека.

Почти такую же опасность таят в себе создаваемые человеком отвалы пород близ шахт и карьеров. Несмотря на то что эти отвалы обычно сооружаются под углом естественного откоса и на сухом основании, все же обрушения в результате смещения насы-



Отвалы у деревни Аберфан и происшедшие на них оползни.

ценного водой и разжиженного обломочного материала происходят довольно часто. Обычно они незначительны по своим масштабам и потому особых бед не причиняют. Но оползни больших отвалов в рудничных поселках иногда приводили к крупным катастрофам.

В 1966 г. обрушился террикон, расположенный над шахтерской деревушкой Аберфан в Уэльсе. Теперь это название известно всему миру и упоминается во многих книгах по инженерной геологии. Эту катастрофу помнят потому, что она унесла 144 человеческие жизни. Среди погибших было 109 детей — учащихся деревенской начальной школы. Печальная известность этого события отчасти связана также с длительными дебатами, которые

велись по поводу того, что послужило причиной оползня и кто должен нести за него ответственность.

Аберфан расположен в Уэльсе на дне долины Тафф-Вейл, лежащей на 300 м ниже образованного карбовыми песчаниками плато Пеннант. Здесь выходят на поверхность промышленные каменноугольные пласты; действует много угольных шахт, и постоянно возникает проблема отгрузки пустой породы. Отвалы угольной шахты Мертир-Вейл были размещены на не защищенной от ветра верхней части долины — как раз над деревней Аберфан и примерно на 100—200 м выше нее по склону, имеющему уклон 13° . Эти склоны сложены массивным песчаником, относящимся к формации Бритдир, которая является самым нижним литологическим подразделением серии Пеннант. Песчаники пересечены множеством трещин, обуславливающих высокую водопроницаемость породы. Песчаник падает под углом 5° на юго-восток и перекрывает непродуктивный угольный пласт Бритдир, залегающий в свою очередь на водонепроницаемых глинах. На верхней части склонов наблюдаются маломощные перигляциальные отложения, представленные песчаниками и глинами, а вдоль нижней их части протягивается горизонт моренных глин, выполняющих также и дно долины. Характерной особенностью местности является обилие мелких источников; многие из них сконцентрированы либо вдоль выходящей на поверхность подошвы водопроницаемого песчаника Бритдир, либо, если этот песчаник перекрывают водонепроницаемые моренные глины, — вдоль верхней границы глин.

Отвалы над деревней Аберфан появились еще в 1918 г., и пока росли отвалы под номерами 1, 2 и 3, никаких проблем не возникало. В 1939 г. обрушился очень похожий на них отвал в поселке Силфинидд, расположенном в 8 км к югу. Образовавшийся оползень течения промчался 400 м вниз по склону, имевшему уклон 10° , со скоростью около 16 км/ч и покрыл дорогу Кардифф — Мертир 6-метровым слоем обломков (кстати, то же самое повторилось 27 лет спустя). К счастью, ни один человек не пострадал, и об этом случае вскоре забыли. Между тем отвалы породы в деревне Аберфан продолжали расти. Отгрузка породы на отвал 4 была начата в 1933 г. Этот отвал располагался на участке, где имелось несколько источников и мокнущих зон, питаемых из песчаников Бритдир. В 1944 г. отвал 4 также обрушился. При этом произошло смещение пород и возник оползень течения, но жертв, к счастью, не было.

Отвал 5 был размещен над открытой дренажной канавой. В 1956 г. в нижней части этого уже заброшенного отвала образовался угрожающий выступ, однако оползня не произошло. Отвал 6 находился на сухом грунте в северной части участка и выглядел вполне устойчивым, но его пополнение было прекращено после того, как основание отвала наполнило на территорию соседней фермы. В 1958 г. начали формировать новый отвал — 7. Для него

было отведено, казалось бы, очень удобное место — между двумя другими терриконами, хотя и здесь на дневную поверхность выходило несколько источников. В отличие от других отвалов, в отвал 7 кроме обломков пустой породы сгружали около 10 % материала так называемых «хвостов» — мельчайшего шлама, представлявшего собой отходы обогатительной фабрики. Это значительно понижало общую водопроницаемость отвала.

Отвал 7 впервые обрушился в 1963 г. Поначалу произошел небольшой оползень течения. Однако никто не обратил внимания на это зловещее предзнаменование, и пустую породу продолжали сгружать прямо в расселину, образовавшуюся вследствие оползня. Не было принято практически никаких мер предосторожности против повторения этого явления, за исключением одной: хвосты в отвал больше не сбрасывали. Весь «надзор» за этим районом сводился к тому, что его изредка посещали ответственные за безопасность горных работ лица, которые из-за своей недостаточной квалификации ограничивались поверхностным осмотром объектов.

Начиная с 1963 г. обеспокоенные жители деревни стали обращаться в Государственное управление угольной промышленности. В итоге переписки управление признало, что в районе действительно существует потенциальная опасность оползания отвалов. Но занимавшиеся этим вопросом чиновники решили, что любое смещение пород должно происходить достаточно медленно и поэтому в случае опасности население удастся заблаговременно предупредить об эвакуации. Никаких специальных мер принято не было, и лица, ответственные за состояние отвалов, продолжали пребывать в полном неведении. Они не знали даже того, что было известно местной детворе, фермерам и рабочим, производившим разгрузку породы и давно знавшим, что отвал 7 неуклонно расползается, перекрывая все новые и новые водные источники. Государственное управление угольной промышленности словно забыло о том, что обычно происходит с такими насыщенными водой отвалами.

В течение всего 1966 г. склон отвала 7 неоднократно оседал. В 7 ч утра 21 октября 1966 г. склон резко опустился на 3 м. Разгрузку породы прекратили, технику убрали, было послано предупреждение вниз — в шахту. Никто даже не предполагал, какая угроза нависла над деревней. В 9 ч утра отвал погрузился еще на 3 м, а 10 мин спустя в его основании возник оползень течения. Сначала он двигался медленно, но постепенно набрал скорость и помчался вниз по склону со скоростью 15—30 км/ч, грохоча, как скорый поезд, и направляясь как раз в сторону деревни. Промчавшись 600 м, оползневая масса разрушила два дома на ферме, затем пересекла канал и железнодорожный путь и погребла край деревни под 10-метровым слоем обломочного материала.

Оставшиеся в живых рассказывали, что на деревню надвигалась волна черной грязи. Разжиженные осадки были в 2 раза

плотнее воды. Внешние края потока состояли из почти сухого обломочного материала, но в основном поток представлял собой жидкую взвесь, достаточно густую и тяжелую, чтобы разрушать здания, и одновременно достаточно текучую, чтобы заполнять все пустоты пространства. Несколько человек убежали от потока, некоторым удалось спастись, укрывшись в защищенных местах, где они оставались до тех пор, пока не были открыты спасателями. Погибло 144 человека, в том числе ученики начальной школы Пантглас, на которую оползень обрушился со всей силой и залил ее почти мгновенно до самого фронтона. К несчастью, все дети были на утреннем собрании в этом здании, обреченном на гибель, и никому из них не удалось спастись.

Для зарождения классического оползня течения необходимо совпадение целого ряда геологических и гидрогеологических особенностей. Именно это и случилось в районе отвала 7. Отвал был насыщен водой, особенно в своей нижней части, где располагались многочисленные источники, питавшиеся из водоносных песчаников Бритдир. Присутствие в отвале хвостов заметно уменьшило водопроницаемость самого отвала, что способствовало сохранению текучести оползневых пород. Поверхность происшедшего вначале обрушения пород (подобные движения часто возникают на отвалах), по-видимому, совпала с той поверхностью, которая образовалась во время подвижек в 1963 г. Затем в результате разуплотнения частиц в породе произошло ее разжижение и образовался оползень течения. Плотность сухого обломочного материала в отвале составляла $1,5 \text{ г/см}^3$, а в материале, отложившемся после оползня, повысилась до $1,85 \text{ г/см}^3$. Стало быть, исходный материал обладал способностью значительно изменять свой объем, что указывает на его высокую чувствительность и потенциальную склонность к разжижению.

Кроме того, во время первого вращательного обрушения подстилавшая отвал валунная глина была удалена с коренной породы, вследствие чего погребенные грунтовые воды могли поступать из водоносного песчаника прямо в подошву отвала. Сток воды из песчаника усилился еще и потому, что в результате оседания поверхности над подземными горными выработками в этом районе образовались две зоны сжатия — к северу и к югу от комплекса отвалов. Существование этих зон также способствовало повышению напора грунтовых вод. Значительное количество этих вод вышло на поверхность, и в средней части оползня возник грязевой поток.

Поскольку причины оползня в Аберфане известны теперь достаточно хорошо, встают вопросы, можно ли было предсказать и предотвратить этот оползень и как избежать повторения подобной катастрофы в других местах.

Как выяснилось в ходе официального расследования, степень рыхлости грунтов в отвалах у Аберфана вообще не учитывалась. Такие фразы, как «восемь лет безрассудства и халатности» и

«абсурдные действия», произносившиеся при анализе катастрофы, были вполне справедливой критикой в адрес владельца отвала — Государственного управления угольной промышленности. Были нарушены практически все основные правила техники безопасности. Отвал просто разместили на том участке, который был в то время свободен, при этом геологические и гидрогеологические условия абсолютно не учитывались. Не было обращено никакого внимания на обилие источников, несмотря на то что они были хорошо заметны на поверхности, известны местным ребятишкам и фермерам и даже четко обозначены на всех опубликованных картах.

Официальные лица, на которых была возложена ответственность за создание отвалов, оказывается, не знали о том, что отвалы можно располагать лишь на хорошо дренированном грунте. На опубликованную в 1927 г. статью, в которой говорилось о возможности оползней в районах развития песчаников Бритдир и валунных глин, тоже не обратили внимания. Не придали также никакого значения отчетам, изданным в 1939 и 1965 г., в которых отмечалось, что оползень течения в Силфинидде произошел почти в таких же геолого-гидрогеологических условиях, которые наблюдаются в Аберфане. Аэрофотоснимки, сделанные в 1963 г., где хорошо была видна начавшаяся деформация склонов, тоже не возбудили опасений. Много только говорилось о необходимости принять меры противооползневой защиты, но никаких действий в этом направлении не предпринималось. Власти не придали значения и предупреждениям, в которых сообщалось об уже имевших место обрушениях отвалов в районах Силфинидда и Аберфана.

Уроки Аберфана несомненны и состоят в следующем. Прежде всего, необходимо проводить обязательные предварительные исследования для определения гидрогеологической обстановки на участках заложения отвалов. Следует также осуществлять постоянный контроль за состоянием отвалов, оценивая при этом водопроницаемость материала, слагающего отвалы, и смещения грунтов. Необходим и обязательный лабораторный анализ чувствительности пород. Не может быть никаких оправданий, если аберфанская катастрофа повторится. После 1966 г. было введено специальное законодательство, предусматривающее все перечисленные меры. Но уже ничто не сможет вернуть к жизни учеников Пантгласской начальной школы.

Контроль над оползнями и их прогноз

Для предотвращения катастроф необходимо детально исследовать участок и знать его геологические условия. Потенциально опасные зоны можно уверенно выделить, если геологические условия известны достаточно хорошо и определены структуры, где

могут развиваться и, возможно, развивались в прошлом оползней. Основная проблема — установить степень опасности, т. е. вероятное время наступления катастрофы и ее масштабы. Число жертв могло бы быть гораздо меньше, если бы люди всегда старались селиться подальше от опасных зон.

Первоочередная задача при прогнозе оползней — выявить места присутствия старого обломочного оползневой материала, независимо от того образует ли он огромные скопления или изредка встречается в полуустойчивых, наблюдающихся начиная с плейстоцена солифлюкционных конусах выноса (солифлюкция — это движение насыщенного водой почвенного материала, происходящее быстрее, чем оползание грунта, но медленнее, чем течение жидкости). Визуально при наземных исследованиях оползневый материал не всегда бывает легко определить. Однако на аэрофотоснимках контуры оползневых участков и их бугристая поверхность проявляются характерным и очень четким рисунком. Этот диагностический признак весьма важен для изучения площадей, где происходят оползни, и для выявления новых потенциально оползнеопасных зон или участков. Лабораторными исследованиями можно определить сопротивление сдвигу и, следовательно, устойчивость однородных грунтов; параметры чувствительности и проницаемости изучаемых грунтов позволяют судить об их способности к разжижению.

Дело осложняется тем, что обрушение нередко происходит не в массе однородного материала, а на поверхностях раздела пород, имеющих разную плотность. Поэтому определить сопротивление сдвигу в лабораторных условиях иногда бывает затруднительно. Однако знание литологических особенностей пород, углов склонов, характера дренажа и течения подземных вод, а также опыт, накопленный при исследовании ранее произошедших оползней, — все это помогает дать полуколичественную оценку оползневой опасности любого участка. Основанные на этих параметрах районирование и выявление зон, где потенциально возможны оползни, в настоящее время с успехом используются при планировании и проведении строительных работ. Выделение участков, наименее благоприятных для застройки, позволило, например, заметно сократить урон, наносимый современным зданиям в оползневом районе Лонсестон на острове Тасмания. В районе города Санта-Моника в Калифорнии с учетом измерений физических свойств, таких как уклоны, сопротивление сдвигу и проницаемость, прогнозируются интервалы повторяемости оползней для каждой точки местности. Этот метод пригоден для неглубоких обломочных оползней, причиной которых являются кратковременные изменения уровня подземных вод.

Еще одним методом контроля над оползнями служит постоянная регистрация движений склонов с целью предсказания любого внезапного, быстрого их обрушения. Поскольку неожиданному оползневому обрушению склона почти всегда предшествует мед-

лённое оползание, происходящее на протяжении достаточно длительного периода времени, этот метод приносит большую пользу. Особенно важно применять его в районах, где при гражданском строительстве создаются откосы, более крутые, чем естественные углы склонов, и таким образом автоматически вводится элемент неустойчивости. Масштабы этой опасности были наглядно продемонстрированы в 30-х годах нашего века, когда за три года в мире произошло 13 обрушений железнодорожных выемок, в результате которых погибло 227 человек. И хотя система постоянного контроля обходится недешево, она вполне оправдывает себя.

Методы обнаружения движений склона представляют собой комплекс исследований, включающий периодическую съемку между опорными реперами, регистрацию шумов в породах (т. е. вибраций, вызванных деформациями), измерение скорости распространения сейсмических волн с целью определения деформаций, связанных с изменением объема пород. При этом используются такие приборы, как экстензометры, инклинометры для буровых скважин, штанговые тензометры и пьезометры для грунтовых вод. Особенно полезно устанавливать инклинометры в неглубоких буровых скважинах на краях неустойчивых склонов, так как их можно вмонтировать в автоматические системы оповещения, которые приводятся в действие, как только оползание склона превышает заданный предел.

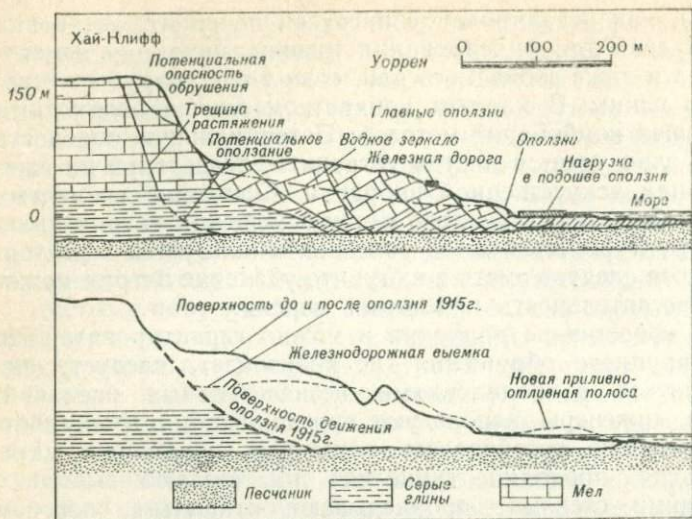
Любое ускорение движения и признаки деформаций, связанных с изменением объема, можно обычно считать симптомами надвигающегося обрушения. Но надо еще установить, когда это обрушение произойдет. На основании опыта удавалось достаточно точно предсказывать некоторые обрушения склонов в крупных открытых карьерах. Однако выполнять прогноз на участках, сложенных разнородными грунтами, трудно, если нет надежных сравнительных данных. Например, зарегистрированное движение склонов горы Маунт-Ток не дает должных количественных характеристик, чтобы можно было предусмотреть оползень на реке Вайонт. В 1969 г. в Японии проводился эксперимент по контролю движений склона. Для этого склон был специально насыщен водой, но оползень начался раньше, чем ожидалось, и в результате погибло несколько наблюдателей. Этот случай наглядно свидетельствует о том, что устойчивость склона невозможно предсказать точно. Тем не менее современный уровень знаний все-таки позволяет избежать повторения некоторых всемирно известных катастроф.

Строительные работы обычно влекут за собой увеличение крутизны склонов. Даже в том случае, когда строительство ведется с учетом результатов лабораторных исследований грунтов, реальные критические углы склона часто удается выявить лишь на самом объекте в естественных условиях. Устойчивость склона может быть повышена при тщательном поверхностном и подземном дренировании. В небольшом масштабе можно применять

такие методы, как регулирование нагрузок на грунт, установка штанговых крепей для фиксирования трещин, инъекция цементного раствора и даже забивание свай, если это не нарушит «чувствительные» глины. В каждом конкретном случае необходима соответствующая комбинация методов. Потенциальную опасность разжижения глин удается иногда устранить, подвергнув их сжатию в условиях искусственной вибрации. Сцепление глинистых частиц может быть также усилено путем замещения натрия кальцием в их структуре. Этот метод успешно используется в настоящее время, хотя следует иметь в виду, что удаление натрия может повысить чувствительность некоторых морских глин.

Если эти средства не подходят и можно гарантировать, что внезапного крупного обрушения не произойдет, следует, очевидно, смириться с проявлениями незначительных оползней. Итальянские инженеры используют при дорожном строительстве кратковременную устойчивость некоторых природных материалов. Вместо проходки туннелей они создают выемки с крутопадающими стенами, прокладывают открытым способом будущую дорогу, а затем, когда трасса и перекрытие туннеля готовы, засыпают их сверху. Это оказывалось экономически более выгодным, чем сооружение туннеля способом подземной проходки или чем создание открытых выемок с очень пологими склонами.

Если мелкие оползни, возникающие при строительных работах, можно ликвидировать путем забивания свай или полной выемки породы, то более крупные оползни можно лишь стабилизировать при помощи одной из форм дренажа. Поверхностное дренирование осуществляется канавами, расположенными либо по периферии оползнеопасной площади, либо в одну линию непосредственно на оползневом участке. Подземное дренирование проводится путем проходки штолен или бурения горизонтальных скважин с перфорированными обсадными трубами. Однако эти виды дренирования не годятся для таких грунтов, как относительно непроницаемые глины и алевриты. Поэтому для стабилизации оползня в мокрых глинах его требуется предварительно осушить. Для этого используют метод электроосмоса, который успешно практиковался в «чувствительных» глинах Норвегии и Канады, либо нагнетают в скважины горячий воздух, что впервые было применено в Калифорнии в 1932 г. Хорошо известен также метод стабилизации оползня замораживанием. Однако замораживание увлажненных осадков приемлемо лишь на короткий период, его удобно использовать, например, для создания временных выработок при строительстве. Во всем мире для борьбы с оползнями наиболее широко и успешно применяются сравнительно несложные методы дренирования. Оползень отвала в городке Пентре (долина реки Рондда, Уэльс) в 1916 г. был остановлен при помощи поверхностной и подземной систем дренажа, удалявших ежесекундно около $0,056 \text{ м}^3$ воды.



Оползни в районе Фолкстон — Уоррен.

В районе Сиез-Пойнт на севере Калифорнии в 1950 г. произошло несколько оползней в неуплотненных осадках вдоль дорожной выемки протяженностью 450 м. Оползни удалось стабилизировать с помощью пробуренной дренажной сети длиной около 2 км, а также путем искусственного уменьшения наклона выемки. Канавы, скважины и штольни дренировали оползни в Гандлове (Чехословакия), благодаря чему их движение через два месяца было остановлено. Все эти оползни были, по счастью, небольшими. Более крупные оползни, к сожалению, контролировать труднее, и инженерам-строителям почти беспрестанно приходится с ними бороться.

К востоку от Фолкстона на юго-восточном побережье Англии под высокими меловыми утесами протягивается пересеченная местность, известная под названием Уоррен. Оползни на этом участке начались несколько тысяч лет назад и продолжают до сих пор. Оползневый участок Уоррен представляет собой зону шириной около 360 м и высотой над уровнем моря от 15 до 45 м, которая прослеживается на расстояние более 3 км вдоль побережья. Нижней границей этой зоны является невысокий береговой обрыв, а другой край обращен в сторону системы Хай-Клифф — сложных белым мелом утесов, возвышающихся на 100—120 м.

Геология района Фолкстон — Уоррен очень проста. Мощность мела в утесах Хай-Клифф составляет более 150 м. Подстилает эту толщу гольт — крепкие переуплотненные серые глины мощностью от 40 до 50 м, залегающие в свою очередь на водопроницаемых песчаниках. В разрезе встречаются также тонкие, иногда водоносные, прослои мергелей и песчаников, но они не оказывают никакого влияния на оползни в зоне Уоррен. Вся

толща падает под углом около 1° на северо-восток. В западной части зоны крутой меловой откос обращен в сторону материка, а в восточной части контакт мела и гольта располагается ниже уровня моря и, находясь в условиях постоянной влажности, не оказывает влияния на устойчивость пород.

В 1765 и 1800 г. в зоне Уоррен были зарегистрированы крупные оползни, однако они не причинили ущерба. Об опасности вскоре забыли и не учли ее при сооружении железнодорожной линии Фолкстон — Дувр, которая была проложена вдоль зоны Уоррен. Движение поездов по этой линии началось в 1844 г. Она может служить классическим примером того, где не следует прокладывать железную дорогу. Проектировщики просто не понимали, насколько опасен выбранный ими район, но отчасти их можно оправдать тем, что другого варианта у них не было: рельеф мела Даунс исключал всякую возможность строительства железной дороги во внутриматериковых районах, а прокладывать 6-километровый туннель, чтобы обогнуть зону Уоррен, было бы слишком долго и дорого. К настоящему времени успешные работы по борьбе с оползнями устранили необходимость постройки обходного туннеля. В 1934 г., когда возникла угроза оползня и народ пребывал в панике, распоряжение о строительстве туннеля было дано, но его проходка так и не была начата.

За два столетия в этом районе было зарегистрировано более 30 крупных оползней, причем те из них, которые произошли после 1844 г., изучались достаточно детально. В 1877 г. случился крупный оползень, вследствие чего обрушился туннель Мартелло. Поездов в туннеле, к счастью, не оказалось. Не столь удачливы были пассажиры поезда, проследовавшего по этой дороге в декабре 1915 г., тогда здесь произошел сильнейший оползень, который сбросил состав с железнодорожного пути. При этом почти вся зона Уоррен переместилась в виде одного массивного блока. Верхний уступ съехал почти вдоль всего основания системы Хай-Клифф. Железнодорожный путь сместился на 50 м в сторону моря, опустившись на 6 м. В результате подвижки донных грунтов образовался мыс, который выдается в море на 400 м. Обломки пород, упавших с утесов Хай-Клифф, засыпали часть железнодорожного пути. В полотне дороги внезапно возник уступ высотой 5 м. При этом южным краем оползневой массы был достигнут поезд и произошло крушение. Движение на линии было восстановлено лишь в 1919 г., что в известной мере вызывалось потребностями военного времени. Во время оползня 1937 г. в облицовке туннеля Мартелло образовались трещины, но ни этот оползень, ни последующий, произошедший в 1940 г., не привели к особым разрушениям железнодорожного полотна.

В настоящее время в зоне Уоррен наблюдаются оползневые движения трех типов.

Прежде всего следует назвать небольшие по объему обрушения мела с обрывов Хай-Клифф. Этот процесс обычно идет в два этапа.

Оползневое движение зарождается вдоль трещин растяжения, почти параллельных фронту обрывов, где образуются изогнутые поверхности скольжения. Породы при своем движении сначала опрокидываются назад, закрывают трещину растяжения и временно сдавливают коренной массив, а затем, через некоторое время, соскальзывают.

Более широко распространены в зоне Уоррен крупные многократные вращательные оползни, развивающиеся преимущественно в гольтских глинах. Эти оползни зарождаются в зоне глин, обогащенной монтмориллонитом, для которой характерно гораздо более низкое сопротивление сдвигу, чем это наблюдается в выше лежащих богатых кальцитом слоях. Происхождение оползней подтверждается наличием в керне скважин штриховатых поверхностей скольжения, приуроченных к одному из горизонтов глин, тогда как за пределами района Уоррен на том же самом уровне зеркала скольжения в глинах отсутствуют. В 1915 г. произошел оползень именно такого типа.

К третьему типу относятся гораздо более мелкие оползни вращения, развивающиеся на внешнем крае зоны Уоррен. Они вызвали смещение пород в 1937 и 1940 г. Этот тип оползней обусловлен эрозией и подмывом береговых утесов. В третичное время гольтские глины были погружены на значительную глубину, где подвергались давлению до 4000 кПа. Но и в настоящее время эффект снятия давления не наблюдается, поскольку эти породы перекрыты толщей мела. Гольтские глины, свободно перемещаясь по рыхлому, богатому монтмориллонитом горизонту в сторону своего эродированного на береговом обрыве края, порождают развитие горизонтальных плоскостей сдвига под зоной Уоррен. Движение глин также способствует раскрытию трещин в меле, по которым внешние блоки породы откальваются от главного массива. Оползанию благоприятствует временное увеличение давления поровых вод в сместившихся массах. Все вращающиеся оползни, зарегистрированные после 1844 г., произошли в период с декабря по март — в сезон наивысших пьезометрических уровней, которые в иное время располагаются ниже поверхности земли — в сместившемся меле и глине. В свободно дренируемом меле подобной связи оползней с длительными изменениями уровня воды не наблюдается. Не отмечается корреляции и с высотой поверхности воды в нижележащем песчанике, которая обычно близка к уровню моря.

Много полезной информации о естественных поверхностях оползания и гидрологии в зоне Уоррен дала всесторонняя и хорошо спланированная программа буровых исследований, которая позволила осуществить конструктивный подход к проблеме укрепления этого участка. Уже в 1896 г. было начато строительство защитных сооружений в море — бун и галечных молов. Целью этих мероприятий было свести к минимуму процессы эрозии, но особым успехом они не увенчались, поскольку не устраняли

основную причину оползней. Несомненно, очень важным процессом явилось дренирование оползневых участков. Хотя дренирование начали сразу после оползня 1877 г., масштабы этих работ были недостаточны, и большую часть дренажных сооружений разрушил оползень 1915 г. В дальнейшем дренажная система была восстановлена, и число канав и штолен заметно возросло. В настоящее время вдоль зоны Уоррен штольни заложены через каждые 200 м. Штольни начинаются примерно в 7 м над уровнем моря, некоторые из них заходят под зону Уоррен более чем на 240 м. Кроме того, после 1948 г. вдоль приливно-отливной полосы были построены огромные бетонные укрепления.

Об успехе мероприятий по борьбе с оползнями можно судить по резкому сокращению числа подвижек в течение нынешнего века. Катастрофа 1915 г. послужила примером того, что может произойти, если не обращать внимания на неблагоприятные геологические условия. Более же поздние события в районе Фолкстон-Уоррен показали, как детальное изучение и знание геологии помогают успешно решать эту проблему.

Будущее

Аберфан, Вайонт, Франк, Николё — вот названия тех мест, где произошли четыре печально известных оползня, унесших 2340 человеческих жизней. Каждый оползень детально изучался, причины этих катастроф выяснены. Но послужило ли это должным уроком?

Возможно, самым известным и в некотором смысле самым ужасающим был оползень в Аберфане. Сообщение об этой катастрофе распространилось по всему миру с быстротой молнии. Последовал ряд официальных отчетов, были внесены изменения в методику изучения оползней, проведены повторные исследования. Отвалы всех шахт в Соединенных Штатах были проверены на потенциальную неустойчивость. В связи с тем что причиной катастрофы в Аберфане была насыщенность обломочного материала водой, в конце 1966 г. с особой детальностью был изучен отвал в Буффало-Крик (Западная Виргиния). Этот отвал служил плотиной, запруживающей небольшой водоем; выяснилось, что отвал относительно безопасен.

Но память человеческая, по-видимому, коротка. Три года спустя в Буффало-Крик стали сгружать пустую породу на новом участке, покрытом сырым шламом. Этот террикон достиг такой высоты, что за ним образовалось небольшое озеро. Каким бы невероятным это ни казалось, но сток из озера осуществлялся путем просачивания воды через породу отвала. 26 февраля 1972 г. на фронтальной стенке этой запруды развился крупный оползень. Вода перелилась через сохранившуюся часть отвала, быстро размывла его, и огромная волна устремилась вниз по долине. В ее водах утонуло 118 человек. Основная причина обрушения

этого отвала-запруды заключалась в том, что он состоял из нецементированной, насыщенной водой породы, в связи с чем внутри отвала образовалось довольно высокое давление. Несмотря на то что характер разрушений при наводнении в Буффало-Крик был несколько иным, чем при оползне в Аберфане, причины катастрофы были практически одинаковыми. А ведь в Буффало-Крик она произошла на 6 лет позже, чем в Аберфане.

Весьма печально, что, даже зная о прошлых бедствиях, человек из-за своего безрассудства ставит под угрозу жизни своих собратьев. Уже через месяц после оползня в городке Франк, случившегося в апреле 1903 г., жители вернулись в свои дома и горные работы, послужившие причиной катастрофы, были возобновлены. Лишь 8 лет спустя, после многочисленных предупреждений об опасности шахта была окончательно закрыта. Абсолютно такой же оползень течения, как в Николё, произошел 16 лет спустя в районе Сен-Жан-Вьянней; жертвами его стало более 30 человек.

Многие склоны гор имеют сейчас такую же геологическую структуру, какая была у гор, в прошлом катастрофически обрушившихся. Уровень развития техники позволяет человеку контролировать по крайней мере некоторые потенциально опасные оползни, как это показали нам события в зоне Фолкстон-Уоррен.

Сколько же людей еще погибнут при оползнях в будущем — сотни, тысячи? Проблема отчасти заключается в следующем: хотя специальные геологические исследования помогают обнаружить многочисленные потенциальные оползни, механизм возникновения которых нам теперь уже известен, эти работы требуют значительных затрат материальных средств и времени. Но неужели человеческая жизнь не стоит этого? Сотни тысяч людей живут и трудятся под крутыми склонами гор, ничего не зная о том, что им грозит. Порой они даже убеждены, что «их» склон горы — устойчивый, и потому не предпринимают никаких мер безопасности. К сожалению, некоторые из них ошибаются. А ведь оползни нередко бывают роковыми.

Наводнения

* * *

Ночь 31 мая 1889 г. в городе Джонстаун в штате Пенсильвания была тревожной: уже трое суток, не переставая, шел проливной дождь, вода в реке Литл-Коунмаф резко поднялась и грозила затопить низкие районы города. Однако еще большую тревогу вызывала плотина Саут-Форк, находившаяся в 16 км вверх по течению и сдерживавшая воды в заполненном до краев водохранилище. Эта старая каменная набросная плотина была в плохом состоянии: слишком маленькие водосбросы частично забились растительностью и обломочным материалом и не могли поэтому играть существенной роли в регулировании уровня воды. Подъем воды происходил гораздо быстрее стока и в течение ночи все водосбросы были затоплены. Вода перелилась через край водохранилища и размывла главную насыпь плотины, образовав широкий пролом во всю ее 23-метровую высоту. В одно мгновение вся вода водохранилища превратилась в гигантскую волну и ринулась вниз... Она пронеслась по долине, затопила пойму реки и практически в мгновение ока смыла город Джонстаун с лица Земли. В массе воды, несшей обломки камней и разрушенных зданий, утонуло 2209 человек.

Вода — совершенно уникальный материал; ее объемы огромны, она необходима для жизни, но, выйдя из-под контроля, может вызвать ужасные разрушения. Наводнение в Джонстауне служит прекрасным примером огромной разрушительной силы воды. Совершенно очевидно, что любое водохранилище, воды которого удерживаются плотиной, является для жителей расположенной внизу долины своего рода бомбой замедленного действия, точное время взрыва которой неизвестно.

Плотины могут разрушаться по трем причинам.

Во-первых, это происходит, если конструкция плотины не отвечает ее назначению (в чем обычно виноват проектировщик). Простое обрушение бетонной или каменной плотины наблюдается редко, однако внутренняя эрозия земляных плотин была и до сих пор остается вполне обычным явлением.

Во-вторых, вода может перелиться через плотину, и тогда (особенно, если плотина — земляная) эрозия происходит настолько быстро, что обрушение совершается почти мгновенно. Именно это случилось с плотиной Саут-Форк в Джонстауне. Причиной катастрофы были гидрологические и метеорологические условия, а также конструкция водосбросов.

Третья причина обрушения плотин — разрушение фундамента. Этот тип катастроф происходит крайне редко, но основы его — чисто геологические. Технология гражданского строительства в наши дни достигла столь высокого уровня, что сооружения можно возводить практически на любом грунте, однако при строительстве плотин геологические факторы все еще оказывают большое влияние на выбор конструкции, о чем наглядно свидетельствуют обрушения плотин.

Еще одной характерной особенностью катастрофы в Джонстауне было расположение города в пойме реки вниз по течению от плотины: поймы по своей природе весьма подвержены затоплению во время наводнений независимо от того, вызвано ли наводнение антропогенным воздействием или же является следствием естественных причин. Поскольку речное наводнение в основном обусловлено особенностями рельефа, геологические и геоморфологические исследования играют

важную роль в выделении опасных участков, подверженных периодическому затоплению, которое может происходить через столь длительные интервалы времени, что не всегда есть исторические факты, на которые мы могли бы опираться.

Гибельным может быть и отсутствие воды, вызванное капризами климата или тем, что человек изменил русло природных источников. Загрязнение воды, особенно запасов грунтовых вод, заиливание водохранилищ могут повлечь за собой ряд гидрологических проблем, природа и масштаб которых также в значительной мере контролируются геологическими причинами. Однако и обрушения плотин, и любые другие бедствия, вызванные вмешательством человека и его неспособностью управлять водными ресурсами, — все это меркнет в сравнении с масштабом естественных наводнений, где человек является лишь простым участником или свидетелем.

Пойменные наводнения

Пойма реки представляет собой почти плоский участок долины, который граничит с рекой и выполнен пластами осадков, отложившихся в те периоды, когда река выходила из берегов. В узких долинах с крутыми склонами, в горных районах поймы вообще отсутствуют, тогда как ширина поймы большой и сложной системы рек низменности может превышать 100 км. Река обычно отлагает осадки в своем русле в сезон минимального стока. В периоды максимального стока река заливает пойму, которая как бы предназначена для наводнений.

К сожалению, берега рек всегда были привлекательным местом для заселения. Города обычно вырастали на крутых берегах и террасах неподалеку от рек, поскольку земля в поймах очень плодородна и ее легко обрабатывать и орошать. Лондон, Париж и Вашингтон располагаются на нескольких речных террасах над современными долинами рек. В том случае, если город находится на безопасной террасе, периодическое затопление поймы может быть весьма полезным — всем хорошо известно плодородие ила, накопившегося за время ежегодных разливов Нила. Однако города строились, расширялись и занимали сами поймы, где зданиям и людям грозила непосредственная опасность. Установлено, что в настоящее время в одних лишь Соединенных Штатах Америки 10 миллионов человек живут на участках, подверженных затоплению.

Масштабы опасности при наводнениях могут быть весьма разными; наиболее яркими примерами тому служат некоторые реки в Азии. Разливы великой реки Янцзы в Китае происходят редко, однако подъемы уровня воды бывают весьма значительными. Так, в 1871 г. ниже города Чунцин высота воды в реке, протекающей здесь в ущельях, превысила нормальный средний уровень на 80 м. После такого феноменального подъема последовал резкий спад уровня воды, что едва не стало причиной катастрофы: во время быстрого понижения уровня воды плывший по реке пароход оказался как раз над затопленной скалой и очень плавно на нее опустился. После того как уровень воды в реке вернулся к обычной средней норме, пароход очутился в плену на скале, возвы-

шаясь на 35 м над рекой. Утверждают, что во время разлива реки Янцзы в 1954 г. из нижней долины было эвакуировано 10 миллионов человек (хотя эта цифра, возможно, и завышена из политических соображений).

На севере Индии река Ганг образует обширную пойму, где мощность осадков превышает 10,5 км. Ежегодно во время муссонных дождей Ганг разливается. Для значительной части территории, геоморфологические особенности которой обеспечивают некоторый наклон местности, эти разливы не представляют явной опасности. Однако этого нельзя сказать о районе, где к дельте Ганга присоединяется и дельта реки Брахмапутра, что занимает большую часть равнинной территории Бангладеш. В ноябре 1970 г. произошел разлив этих рек, обусловленный сочетанием резкого подъема уровня воды, высокого прилива и сильного берегового циклона. Был затоплен участок дельты площадью более 10 000 км² с многими населенными пунктами, погибло более миллиона человек.

Река Ганг разливается каждый год, но сильные паводки бывают довольно редко. Длительные наблюдения за уровнем воды в реке показали, что существует определенная взаимосвязь между силой наводнений и интервалами их повторения, а именно: повышения уровня почти пропорциональны логарифму интервала. Поэтому маловероятно, чтобы наводнение 50-летнего цикла повторилось в годовом интервале. Эта идея может оказать неоценимую помощь при планировании застройки речных долин. Хотя хозяйственное значение района, затапливаемого во время ежегодных разливов Ганга, не подлежит сомнению, совершенно ясно, что экономически невыгодно, например, строить дом, рассчитанный на существование 100 лет, в той части равнины, которая затапливается каждые 20 лет. Следовательно, при планировании застройки пойменных районов или использования их земель необходимо учитывать интервал повторения наводнений. Но в Великобритании границу опасной зоны обычно проводят на уровне наводнений 1947 г., вызванных таянием снегов; этот уровень отвечает высоте паводков, которые могут быть один раз в 100—200 лет.

Частота и сила наводнений, несомненно, зависят от местных и региональных погодных и климатических условий. Значительное влияние оказывают и такие факторы, как поглощающий воду растительный покров, способствующая стоку крутизна склонов, профиль русла, который может либо сглаживать последствия паводков, либо, напротив, усугублять их. Сильный дождь в начале зимы может иметь страшные последствия, если дождевая вода попадает на глинистые почвы, покрывшиеся за время жаркого и сухого лета жесткой спекшейся коркой. В 1973 г. при наводнении такого типа в южной Испании погибло 150 человек; река разлилась, вышла из берегов и разрушила дома, простоявшие уже больше века,

Катастрофические наводнения возникают и во время редких бурь в семиаридных районах. В 1972 г. на город Рапид-Сити в Южной Дакоте обрушилось наводнение 2000-летнего цикла; вода пронеслась вниз по каньону и вызвала ужасные разрушения, погибло 237 человек. С тех пор строительство на участке, затапливаемом при разливе реки, практически не велось; там был разбит парк.

Огромное влияние на характер затопления оказывают коренные породы. Водопроницаемые породы, например песчаники или известняки, могут свести к минимуму последствия слабых и даже средних наводнений. Но очень сильное наводнение может причинить значительный ущерб в районах, сложенных известняком, поскольку обычно сухие здесь долины мгновенно заполняются таким огромным количеством воды, что система подземного дренажа ее не вмещает и затопление, естественно, распространяется на большие площади, в том числе и на заселенные.

Наводнения 1968 г. в городе Сомерсет (горы Мендип-Хиллс) продемонстрировали эрозионную силу рек в долинах, пересеченных сплошными полезащитными и дорожными насыпями.

Необычная геологическая обстановка наблюдается над городом Карас в Перуанских Андах, где озеро перегорожено естественным барьером из полупроницаемой ледниковой морены, через которую постоянно фильтруется вода, вытекающая из озера. Все здесь пока спокойно и хорошо, но такая кажущаяся устойчивость обманчива: если объем воды, поступающей в озеро, превысит проницаемость морены, вода мгновенно перельется через барьер, эродирует его и тогда вниз по течению — туда, где в пойме расположен город Карас, — устремится огромная волна. . .

В связи с тем что во всем мире поймы рек густо заселены, борьба с наводнениями стала важным аспектом гражданского строительства. Вести ее можно различными путями. Осуществляется, например, строительство противопаводковых водохранилищ. Обычно их не заполняют водой до краев, чтобы сделать это в паводковый поток. Затем вся вода сбрасывается с меньшей скоростью и в течение более длительного времени. Конечно, не с каждым наводнением можно бороться таким образом, но сейчас почти каждое третье водохранилище в Соединенных Штатах служит этой цели. В 1974 г. разлив реки Брисбейн в Австралии наглядно продемонстрировал несовершенство противопаводковых плотин. Еще хуже обстояло дело во время наводнения 1966 г. во Флоренции, когда после двух суток проливных дождей слишком рано был начат сброс воды из-под двух противопаводковых плотин, и вода достигла города в самый разгар наводнения.

Самый действенный способ регулирования уровня воды в реках — это строительство искусственных дамб или наращивание высоты естественных берегов. За исключением некоторых плотин в черте города, эти сооружения обычно представляют собой земляные насыпи, достаточно высокие, расположенные через относи-

тельно большие (15 км и реже) интервалы; такие плотины должны остановить любое наводнение и защитить остальные участки поймы.

В нижнем течении реки Миссисипи общая протяженность подобных защитных сооружений составляет к настоящему времени 3500 км. Кроме того, дамбы окружают здесь многие города и селения. К сожалению, и плотины не гарантируют полной защиты от наводнений. Иногда они даже приводят к более серьезным последствиям, чем сам паводок, поскольку вода может перелиться через край плотины или образовать в ней пролом и устремиться вниз со значительной скоростью. Тогда наводнение в пойме может стать более разрушительным, чем оно было бы при отсутствии дамбы.

Наводнение в долине Миссисипи в 1973 г. было самым сильным из всех здесь известных, ущерб составил 420 млн. долл., однако, не будь защитных плотин, он возрос бы почти вдвое. На Миссисипи применялись и многие другие способы защиты от наводнений. Сокращение меандр может уменьшить длину реки, сделав уклон более крутым, что будет способствовать затоплению резервных площадей. В 1933—1936 гг. протяженность нижнего течения реки Миссисипи была укорочена подобным образом на 13 %. Размер аварийных водоотводов можно значительно варьировать. Характерной чертой тропических городов являются выложенные бетоном дождевые водостоки, сухие большую часть года. Таковы, например, отводные каналы на Миссисипи, направленные в сторону распределительного канала Атчафалай и озера Понтчартрейн.

Если водосборная площадь реки меньше чем у Миссисипи, то значительно сократить распространение наводнения можно путем правильного планирования землепользования и размещения растительности.

Недостаток мер по борьбе с наводнениями заключается в том, что эти меры сами в какой-то степени явятся источником опасности. Мы уже говорили о возможности проломов в дамбах, но, кроме того, иногда переоценивают и защитную роль самих дамб. Так, в районе Лос-Анджелеса, где существует угроза землетрясений, противопаводковые плотины в каньонах, окружающих город, при сейсмических толчках могут обрушаться. Это едва не произошло в водохранилище Ван-Норман во время землетрясения 1971 г. в Сан-Фернандо; последствия такой катастрофы могли быть ужасными.

Кроме мероприятий по противопаводковой защите, ведется также районирование пойм по вероятности возникновения крупных наводнений. Для большинства рек исторические сведения достаточно точны, чтобы определить масштабы наводнений 40-летнего цикла, однако о силе наводнений других циклов, особенно в долинах с более крутыми склонами, можно лишь догадываться. Детальное геоморфологическое картирование, а также изучение аэрофотоснимков позволяют обнаруживать такие структурные

особенности, как террасы, прирусловые отмели, зоны распространения различных речных осадков. Это помогает подразделить поймы на зоны по степени опасности возникновения крупных наводнений, планировать перенос старых городов на другое место, размещать новые застройки на потенциально менее опасных участках.

Город Шрусбери в графстве Шропшир находится на реке Северн; более 500 зданий расположено здесь в пойме реки, несмотря на то что строительство города осуществлялось в основном после 1947 г., когда правила планирования строительства стали более жесткими в связи с тем, что в течение 1947 г. в Англии произошло несколько сильных наводнений. Однако наводнение 1946 г. в Шрусбери, относящееся к 120-летнему циклу, было еще сильнее, и в настоящее время именно по нему определяют опасную зону, не подлежащую застройке. На участке, который в 1946 г. был покрыт водой, разбиты лишь парки и спортивные площадки, а новые здания заложены гораздо выше уровня этого наводнения.

Важно также сводить к минимуму масштабы строительства там, где застройка разрешена, но опасность наводнения не исключается. В ряде городов идут по иному пути; в Нью-Джерси, например, при строительстве зданий предусматривают возможность свободного течения под ними вод в случае наводнений 125-летнего цикла. В ряде других городов Америки в высотных зданиях, расположенных в поймах, нижние этажи отводят под стоянки автомашин, стен при этом не сооружают.

Некоторые промышленные предприятия приходится размещать в активных поймах, но жилые дома и такие постройки, как больницы, никогда не следует возводить в столь опасных зонах. Однако на практике картина бывает несколько иной, о чем свидетельствуют два примера катастроф, несоизмеримых по своим масштабам.

Линмут — привлекательная деревушка, завоевавшая популярность среди туристов. Расположена она на побережье северного Девона, в узкой Y-образной долине у слияния рек Ист-Лин и Уэст-Лин. Площади водосбора обеих рек состоят из крутых, узких ущелий в почти водонепроницаемых сланцах и крупнозернистых песчаниках Эксмур, и паводковая вода всегда настолько быстро несется вниз по течению, что предупредить об опасности заблаговременно бывает невозможно.

В августе 1952 г. две недели, не переставая, лил дождь, и земля насквозь промокла; в довершение 15 августа над Эксмуром разразилась сильнейшая буря. Среднее количество осадков на всей площади водосбора реки Лин, превышающей 100 000 км², составило 142 мм, причем больше всего их выпало в бассейне реки Уэст-Лин. Началось наводнение. Потоки бушующей воды обрушились на деревушку. В самый разгар наводнения сток в Линмуте достигал 510 м³ в секунду, это можно сравнить с сильнейшим наводнением на Темзе. Деревня была залита водой,

постройкам нанесен значительный ущерб, 34 человека серьезно ранены.

Разрушительные последствия наводнения были обусловлены главным образом наличием множества узких старых русел, пересекающих деревню. В такой узкой долине, как у реки Уэст-Лин, едва ли можно говорить о пойме, однако здесь есть четко выраженная зона, которая затопливается при любой скорости течения, как только вода выходит из нормального русла. При планировании поселка было разрешено строить у реки дома и отели, что в значительной степени разрушило берега. Однако худшим было другое — высота арки моста через реку Уэст-Лин оказалась вдвое меньше необходимой, чтобы беспрепятственно пропустить воды наводнения. При возведении построек в поселке и сооружении моста совершенно не учитывались имевшиеся данные о сильных наводнениях 1607 и 1769 г., последнее, судя по описаниям, было гораздо сильнее наводнения 1952 г.

Последствия застройки в такой опасной зоне можно было заранее предсказать. Вода затопила деревню, и река Уэст-Лин проложила новое русло там, где ее движению не мешал мост. За те несколько часов, что продолжалось наводнение, были смыты здания, мосты и дороги и пострадало 34 человека. Но это был еще счастливый исход. Валуны до 10 т и больше сносились водой вниз по крутым руслам рек и обрушивались на дома, круша их; после отступления воды вся деревня была завалена огромными каменными глыбами. Ущерб усугубился тем, что сильные волны, возникшие в результате обрушения временных плотин, образовали из деревьев и оползневых масс огромные завалы.

После катастрофы деревня Линмут была отстроена заново на том же самом привлекательном месте, поскольку выбора практически не было — вдоль всего побережья протягиваются только узкие долины. Однако теперь деревня выглядит по-иному: в самом ее центре прорыты глубокие, большие, правильной формы каналы. Сейчас реки почти теряются на дне каналов, но эти долгосрочные меры предосторожности сделали Линмут гораздо более безопасным местом.

Хуанхэ в переводе с китайского означает «Желтая река», но она известна и под другим названием — «Скорбь Китая». Эта удивительная река пользуется недоброй славой; она послужила причиной гибели гораздо большего числа людей, чем любой другой объект земной поверхности. Причиной тому — ее совершенно уникальная морфология: почти 4000 км река протекает среди гор и по плато в северном Китае и, размывая на своем пути рыхлые лёссовые породы, захватывает огромные количества ила. Когда вода достигает города Кайфын, она почти на 40 % состоит из желтого ила (отсюда и название реки). От Кайфына река течет еще 800 км к морю через огромную Желтую равнину, представляющую собой, по существу, огромный аллювиальный конус выноса, падающий более круто, чем истинная дельта, ширина

которой также 800 км. Дельта располагается по обеим сторонам от гор Шаньдун, которые когда-то, вероятно, были островом.

От Кайфына по равнине в разные стороны расходятся 15 русел. Каждый раз, когда воды Хуанхэ выступают из берегов, происходят сильные наводнения, а по окончании разлива река продолжает течь по одному из этих русел.

Равнина по берегам реки густо населена, и число жертв наводнений здесь достигает астрономической цифры; кроме того, гибнет урожай, что вызывает голод и сеет смерть.

Хронология основных событий в истории этой реки говорит сама за себя.

2356 г. до н. э. — после сильного наводнения река впадала в залив Джили у города Тяньцзинь.

602 г. до н. э. — усиление наводнений навело на мысль о строительстве первых дамб; в этом году Хуанхэ вместе с рекой Хуайхэ стала впадать непосредственно в Желтое море.

69 г. н. э. — на равнине уже была создана единая серия дамб, но река продолжала менять русла в интервале между современным ее ложем и самым северным руслом, впадающим в тот же залив Джили у Тяньцзиня.

1324 г. — река возвратилась в свое южное русло и вместе с рекой Хуайхэ стала опять впадать в Желтое море.

1851 г. — река повернула на север и потекла по своему современному руслу.

1887 г. — в результате сильного наводнения 2 000 000 людей утонуло и умерло от голода.

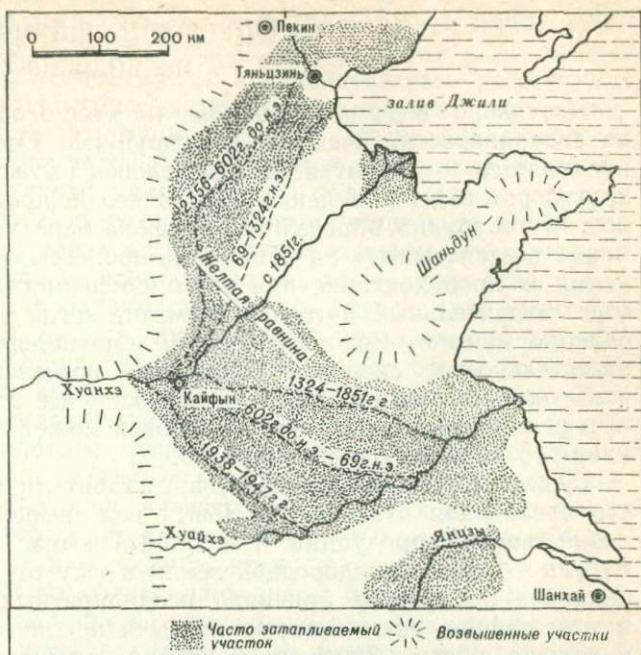
1931 г. — самое сильное наводнение из когда-либо происходивших, погибло 3 700 000 человек.

1938 г. — в дамбах были устроены шлюзы, чтобы, спустив через них воду, остановить наступление японской армии; воды Хуанхэ, потекшие по новым руслам, действительно задержали захватчиков, но при этом погибло около полу-миллиона местных жителей.

1947 г. — после ремонта дамб река была возвращена в свое современное русло.

Масштабы этих наводнений определить трудно. При каждом значительном изменении русла реки ее устье перемещалось примерно на 435 км. Это то же самое, как если бы Темза вдруг стала впадать в Северное море у Ньюкасла, а Колумбия потекла бы в Тихий океан через северную Калифорнию. Наводнение 1933 г. не было самым сильным, но тем не менее сток превысил 23 000 м³ в секунду и в пойме реки отложилось около 17 млрд. м³ ила.

Плотины, сооружение которых было начато более 2500 лет назад, необходимо постоянно перестраивать; эти работы ведутся трудоемкими ручными методами, которыми так славятся китайцы, поскольку надстраивать дамбы можно только илом. В связи с постоянным наращиванием высоты плотин река Хуанхэ теперь пересекает равнину, протекая примерно на 75 м выше уровня окружающей местности между внутренними и внешними дамбами, образующими пояс шириной 20 км. Причиной всему этому — ил, поскольку он постоянно осаждается в русле, и уровень воды в реке поднимается еще выше, поэтому перед китайцами стоит буквально бесконечная задача постоянной достройки дамб. В связи с этим у Хуанхэ на протяжении более чем 650 км теперь нет при-



Нижнее течение реки Хуанхэ; показаны главнейшие русла этой реки на Желтой равнине в разные исторические периоды.

токов, и многие люди живут ниже уровня реки под постоянной угрозой наводнения. На равнине нет холмов, и в случае наводнения спастись негде.

Средняя площадь ежегодно затопляемого участка составляет около 8300 км². Так как окружающая равнина расположена ниже уровня реки, она не осушается и остается затопленной до самого горизонта в течение всего года. Поэтому совершенно необходимо постоянно наблюдать за течением реки, поскольку даже и мелкие промоины в дамбах на реке Хуанхэ и на других реках Желтой равнины починить трудно из-за отсутствия поблизости каменного материала, который надо привозить за сотни километров. Несомненно, очень опасно жить в этом районе, где единственной возвышенностью является искусственно созданная насыпь, по которой течет часто разливающаяся капризная река.

Примерно до 2000 г. до н. э. река Хуанхэ находилась на уровне равнины, но, как было отмечено выше, из-за частых наводнений пришлось построить дамбы, а потом выйти из этого порочного круга уже было невозможно. Теперь угроза наводнения и затопления окрестной равнины стала постоянной. Река Хуанхэ не только создала Желтую равнину, но и до сих пор продолжает господствовать над ней, не обращая внимания на усилия и суету человека.

Опасности при мероприятиях по водоснабжению

Круговорот воды — постоянный процесс огромных масштабов, но его равновесие очень легко нарушить. Особенно четко это проявляется в том случае, когда человек пытается видоизменить круговорот воды или непродуманно его использовать. В конечном итоге трудно определить, в какой мере человек без вреда может воздействовать на природные процессы, поскольку информация о происходящих при этом изменениях поступает лишь через значительный интервал времени, когда часто бывает уже слишком поздно. Водопотребление, землепользование, характер растительности, скорость испарения, воздействия на климат в местном или региональном масштабе — все это связано в единую цепную реакцию, которую человек может вызвать, нарушив каким-то образом одно из звеньев.

Существует научная школа, представители которой считают, что чрезмерная откачка грунтовых вод, выращивание сельскохозяйственной продукции и активный выпас скота в области Сахель — полосе плодородной земли к югу от великой пустыни Сахара — послужили причиной неоднократных ужасных засух в этом районе, из-за которых пустыня продвигается все дальше и дальше к югу. Требуют изучения планы изменить течение рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, и направить их к югу, чтобы использовать воду для ирригации в районе Каспийского моря. Неизвестно, какое воздействие это может оказать на климат. Весьма вероятно, что перемещение воды в таком масштабе может вызвать изменения климата.

При более мелкомасштабных мероприятиях по эксплуатации водных ресурсов воздействие на климат выявить гораздо легче и гораздо большее значение приобретают геологические условия. Одна из наиболее знаменитых схем использования водных ресурсов рек — это схема, применяемая на реке Колорадо на юго-западе Соединенных Штатов. Благодаря ей южная Калифорния и Аризона превратились из пустыни в экономически важные районы, но при этом возникли различные проблемы, особенно в районах, расположенных в нижнем течении реки.

Вскоре после того как вода от плотины Импириал-Дам была отведена на запад по каналам, она вышла из искусственного русла и с января 1905 г. по февраль 1907 г. текла в ранее сухой бассейн пустыни. В результате образовалось соленое озеро Солтон-Си. Однако самые серьезные проблемы возникли в главном русле реки, где вследствие забора большого количества высококачественных вод сток на территорию Мексики настолько понизился, что вода в реке стала слишком соленой даже для использования ее в сельском хозяйстве.

Из-за высокой скорости испарения соленые грунтовые воды необходимо постоянно откачивать из песчаных почв, прежде

чем они достигнут того уровня, где располагаются корни зерновых культур. Эти соленые воды, главным образом из долины реки Хила, в настоящее время на значительных расстояниях заключают в каналы и сбрасывают в реку Колорадо ниже последней ирригационной очистной плотины. Из-за этих действий постоянно возникают конфликты и ведутся политические дебаты, поскольку мексиканцы, живущие на более бедных участках земли в дельте реки Колорадо, практически лишены пресной воды.

Проблема загрязнения касается также и некоторых грунтовых вод. Принято считать, что вода из земли должна быть чище, чем из реки. Это справедливо лишь в том случае, если грунтовые воды хорошо фильтруются, просачиваясь через породы водоносного горизонта. Однако если вода проходит очень небольшое расстояние и через породы с крупными открытыми порами, обладающие низкой фильтрующей способностью, такие как гравий или известняк, очищение отнюдь не достигается. Движение воды и примесей в гравии зависит от местных гидравлических градиентов, в трещиноватых либо ячеистых известняках и даже в меле влияние местных геологических условий сказывается еще сильнее.

В 1969 г. источники водоснабжения в поселке Ашуик-Гроув (Мендип-Хиллс) были сильно загрязнены фенолами. Оказалось, что фенолы поступали из силосных жидкостей, стекавших с фермы в водосточный колодец в километре от поселка и проходивших через пористый известняк карбонового возраста. Такие же известняки были причиной ужасного случая в районе Баллимаселлиготт близ города Трали в южной Ирландии. Проведенная здесь в 1962 г. проверка нескольких сточных колодцев и соединяющих их протоков показала, что к реке в поселке Те-Райзинг «ходит на водопой скот, но ею пользуются и как источником водоснабжения жители фермы и нескольких коттеджей, а также работники маслобойни, после того как эта вода уже дважды служила для водопойных и других целей и один раз (когда текла под землей) играла роль канализации».

На известняковых равнинах в южной и центральной частях Соединенных Штатов в течение длительного времени наблюдалось загрязнение грунтовых вод из подземной канализации, трубы которой заканчиваются под землей как раз в таких сериях пород. Воронки обрушения с крутыми склонами представляют собой очень удобные отвалы для мусора в том случае, если они окружены безлюдной равнинной местностью; однако в штате Миссури было установлено, что очень часто нефильТРованная вода прямо из этих отвалов попадает в источники, используемые для водоснабжения.

Жители города Хорс-Кейв на известняковой равнине в штате Кентукки обычно берут воду из многочисленных колодцев, но во время засухи 1930 г. многие колодцы пересохли и воду стали доставать из подземной реки Хидден-Ривер-Кейв. В то время еще не знали, что эта река в пещере фактически захватывала почти

Все воды из местной канализационной системы, стекавшие в известняк. В результате в городе вспыхнула эпидемия брюшного тифа. После этого воду из подземной реки уже не извлекали, но в нее продолжало поступать все больше и больше сточных вод. В 1944 г. пещера Хидден-Ривер-Кейв была закрыта для туристов из-за возникшего здесь зловония.

Установлено, что случайное или «незапланированное» загрязнение карстовых воронок приводит к загрязнению воды на расстоянии 8 км и более. Как в гравии, так и в песчанике системы дренирования сточных вод и системы извлечения питьевой воды нельзя располагать рядом; в трещиноватых известняках безопасный интервал между этими системами можно определить лишь после многочисленных опытов по трассированию воды с применением красителей, что позволяет выявить направления движения грунтовых вод.

Вмешательство человека в естественное движение воды также может вызвать нежелательные осложнения и создать проблемы, особенно в том случае, когда водохранилища запружены плотинами. Чтобы водохранилище сохранилось на известняках, необходима обработка грунта жидким цементным раствором, который делает породу водонепроницаемой. Об успехе подобной цементации можно судить по некоторым водохранилищам, расположенным на известняке в таких странах, как Югославия и Франция, но совершенно необходимо, чтобы при возведении конструкций учитывались геологические условия. На реке Миссури есть несколько небольших старых плотин, не оправдавших своего назначения из-за того, что под покровом слабопроницаемых поверхностных осадков залегали известняки. Последовательность событий, произошедших в водохранилище Дин-У-Дэвис близ южной границы штата, можно установить по тому факту, что высохший бассейн этого водохранилища был переименован в заказник Дин-У-Дэвис.

Для водохранилищ характерна еще одна проблема: они заполняются илом до тех пор, пока воды в них уже совсем не останется. Этого, к сожалению, нельзя избежать. В водохранилищах могут отлагаться осадки рек, несущих ил либо текущих в районах с легкоэродируемыми породами, такими как лёсс, глина, рыхлый песчаник. В связи с этим время существования водохранилища ограничено. Рассчитано, что даже огромное озеро Мид, перегороженное плотиной Хувер на западе США, будет заполнено илом примерно через 400 лет, так как река Колорадо приносит в него колоссальные количества ила и песка. Огромные новые водохранилища, созданные в рыхлых отложениях бассейна реки Инд в Пакистане, быстро заполняются илом, и, возможно, через 100 лет гигантская плотина Тарбелла будет сдерживать уже ил, а не воду. Расположенная недалеко от нее плотина Мангла сконструирована таким образом, чтобы в будущем ее высоту можно было нарастить.

Многие старые водохранилища на Ближнем Востоке теперь заполнены осадками. Подобное явление наблюдается и на новых сооружениях; например, водохранилище у плотины Остин в Техасе было на 95 % забито илом через 15 лет после завершения строительства плотины. Несмотря на то что в массовом масштабе бороться с заиливанием трудно, история водохранилища Макмиллан на реке Пекос (запад Соединенных Штатов) обнадеживает. Водоохранилище было быстро заполнено илом почти наполовину; затем в верхней части водосбора реки Пекос был высажен тамариск, после чего заиливание фактически прекратилось и водохранилище удалось спасти. В том случае, когда подобный биологический контроль отсутствует, единственный способ избежать полного заполнения водохранилищ осадками — это периодическое дренирование и очистка от ила. Очистные шлюзы во многих современных плотинах расположены глубоко, и ил легко удаляется при помощи воды, движущейся с большой скоростью.

Заиливание водохранилищ или фильтрация из них воды может нанести значительный экономический ущерб, однако гораздо опаснее обрушение плотин. Наводнения при обрушении возникают довольно редко, но при их ужасающих масштабах и отсутствии системы оповещения это может обернуться катастрофой для расположенных ниже по течению деревень и городов.

Геологические проблемы при закладке плотин

Алюминиевый завод Долгаррог в долине реки Конуэй в северном Уэльсе снабжается энергией от расположенной неподалеку гидроэлектростанции, которая использует воду реки Эфон-Порт-Ллвид — притока реки Конуэй. Постоянное течение Эфон-Порт-Ллвид обеспечивалось двумя маленькими озерами, находящимися выше по долине. Верхнее озеро сдерживала плотина Эйджайо. Длина этой бетонной плотины, построенной в 1911 г., составляла 1075 м, максимальная высота 10 м. Породы фундамента представлены крепкими водонепроницаемыми сланцами и вулканическими образованиями, но плотина была заложена над ними в мощной голубой ледниковой глине, покрывающей склоны холмов. Маломощные пласты торфа и выветрелой глины были удалены, и основание плотины располагалось в голубой глине на глубине, местами не превышающей одного метра. В 4 км вниз по течению в другом водохранилище — Коудти, меньшем по размеру, воду удерживала плотина иного типа. Это была земляная плотина, построенная в 1924 г. из местной ледниковой морены с тонкой бетонной диафрагмой, высота ее составляла 11 м, а общая длина 240 м.

Плотина Эйджайо стояла почти 15 лет. Внезапно 2 ноября 1925 г. в 9 ч 15 мин вечера на одном небольшом участке из-под плотины стала просачиваться, а затем и вырваться вода, она

быстро промыла канал шириной 20 м и глубиной 3 м под сплошной бетонной стеной плотины. Полагают, что скорость вытекания воды из озера Эйджайо составила около 400 м³ в секунду. Вода устремилась вниз по долине, быстро наполнила расположенное ниже водохранилище Коудти и вскоре перелилась через его плотину, водосброс которой был сконструирован с учетом нормальных средних паводков и оказался практически бесполезным. Как только вода перелилась через плотину водохранилища Коудти, она быстро размыва земляную насыпь, и неукрепленная средняя часть плотины обрушилась. В результате все 30 000 м³ воды почти мгновенно излились из водохранилища Коудти и на деревню Долгаррог внезапно обрушилась огромнейшая волна. К счастью, в этот вечер здесь показывали кинофильм и почти все население собралось в кинотеатре, расположенном на возвышенности. Хотя деревне был нанесен огромный материальный ущерб, погибло всего 16 человек.

Хотя деревня Долгаррог и была разрушена паводковой волной, возникшей при обрушении плотины Коудти, тем не менее плотина эта по своей конструкции удовлетворяла всем требованиям; позднее она была возведена заново на том же самом месте. Основной причиной катастрофы и гибели деревни была плотина Эйджайо, подмыв и обрушение которой произошли из-за того, что ее фундамент был недостаточно прочным. Не предпринималось никаких попыток скрепить эту плотину с коренной породой, залегающей под ледниковыми отложениями. Фундамент плотины был заглублен лишь примерно на один метр в ледниковую глину; при этом совершенно не учитывался тот факт, что верхние слои ее были выветрелыми и встречались отдельные валуны, причем некоторые из них оказались как раз под точкой размыва. Кроме того, лето 1925 г. было очень сухим, и глина под плотиной стала еще более рыхлой, поскольку при обнажении ложа озера образовались трещины усыхания. Сочетание выветривания, наличия валунов и усадочных трещин позволило воде проникнуть через глину под плотиной и легко размывать ее.

В свете современных знаний о глинах обрушение плотины Эйджайо вполне можно было предсказать, однако ее строители не имели такого опыта, и их сбивала с толку кажущаяся водонепроницаемость ледниковой глины.

В мире известны сотни случаев обрушений плотин, причем каждое из них сопровождалось наводнением. Иногда наводнение было просто развлекательным зрелищем, но подчас оно оборачивалось катастрофой. Большинство обрушений, в том числе и плотин Саут-Форк и Коудти, были вызваны тем, что вода перелилась через край плотины из-за отсутствия достаточно хорошего водосброса. Второй основной причиной служит внутреннее обрушение земляных плотин. Обе эти причины связаны с конструкцией плотин, а геологические особенности занимают в этом ряду лишь третье место.

До некоторой степени очередность причин при обрушении плотин отражает исторический ход их строительства: сначала инженерам стала ясна роль хорошего фундамента, а затем они поняли механику глинистых грунтов внутри тела плотины. Тем не менее знание геологии фундаментов плотин тоже очень важно, поскольку силы, удерживающие воду в крупном водохранилище, значительно выше сил, возникающих при любом другом виде гражданского строительства. Во многих районах геология исключает возможность постройки определенных типов плотин, в других же местах их можно возводить лишь после очень длительного и дорогостоящего изучения и специальной обработки породы на огромных площадях.

Массивный, невыветрелый, слаботрешиноватый гранит является идеальным фундаментом для плотин самой смелой конструкции. Известно также, что мощная однородная глина не может выдерживать напряжения, возникающие в бетонной плотине, но на такой глине способна устоять земляная плотина при условии, что будут приняты меры по контролю порового давления и консолидации. Эти две ситуации сходны: и в том, и в другом случае проводится механический анализ однородной породы, полученные при этом показатели можно применять в ходе конструирования плотин. Различные проблемы возникают в том случае, если изменения геологических условий настолько непредсказуемы, что выполнить количественный анализ становится крайне трудно. Жилы каолиновой глины в граните, а также разломы и выветрелые зоны в любой породе представляют собой основные зоны ослабления структур, обычно крайне плохо поддающиеся расчету. Осадочная слоистость и прослойки сланца, метаморфизм, кливаж и сланцеватость, трещины, образовавшиеся в результате снятия нагрузки или тектонических поднятий, могут иметь четкую структуру. Тем не менее их также необходимо детально исследовать, поскольку они могут сыграть важную роль при выборе конструкции плотины.

Со всеми этими проблемами люди сталкивались при сооружении различных плотин, и если возможность опасных ситуаций была предсказана своевременно, плотину в данном месте не возводили. Если же опасность выявлялась, когда плотина была уже построена, то нередко требовались большие дополнительные расходы на ремонтные работы.

Плотина Бузей близ города Эпиналь на востоке Франции была построена в 1881 г., но фундамент ее был плохим, так как она возводилась на трещиноватом водопроницаемом песчанике. В 1895 г. плотина обрушилась и в паводковой волне утонуло 80 человек. Хотя основной причиной катастрофы было обрушение конструкции, фундамент из рыхлого песчаника, быстро размытый, также сыграл свою пагубную роль.

Плотина Остин в Техасе была возведена в 1894 г., а шесть лет спустя обрушилась. Плотина была заложена на почти гори-

зонтально напластованных известняках, глинах и сланцах, причем все они были трещиноватыми. Высота этой каменной плотины составляла всего 20 м, но она располагалась на дне долины и не имела отсекающего рва. Иногда во время сильных дождей вода просачивалась через известняк под плотиной, частично растворяя породу и значительно насыщая переслаивающиеся пласты глины. Так, во время ливня в апреле 1900 г. вода перехлестнула через плотину, размывла коренную породу; плотина обрушилась, и ее средняя часть целиком сползла вниз примерно на 10 м.

Впоследствии было установлено, что частичное избирательное растворение некоторых пластов известняка способствовало образованию подруслового потока и выветриванию глины. Участок, где располагалась плотина, стал безопасным лишь после того, как эти явления были приостановлены благодаря созданию отсекающего рва и «цементного занавеса» под плотиной (этот «занавес» представляет собой цементную перемычку, сооруженную путем нагнетания раствора через расположенные в линию буровые скважины).

Особенно опасным фундаментом для земляных плотин является водопроницаемая порода, которая может эродироваться изнутри в результате сильного просачивания воды. Самой ужасной катастрофой в Великобритании было обрушение плотины Дейл-Дайк над городом Шеффилд в 1854 г., когда погибло 250 человек. Эта земляная плотина подверглась сильной подпочвенной и поверхностной эрозии; кроме того, сыграла свою роль и водопроницаемость коренной породы — жернового (грубозернистого) песчаника, пропускаявшего воду в тело плотины.

Известно, что неуплотненный аллювий настолько ненадежен с точки зрения прочности и проницаемости, что его обычно полностью удаляют, чтобы основание плотины легло на коренную породу. Последствия строительства на аллювии наглядно продемонстрировала плотина Пуэнтес на реке Гвадалентин (юго-восток Испании). Высота этой каменной плотины, построенной в 1791 г., была около 50 м, но когда водохранилище в 1802 г. впервые наполнили, плотина обрушилась. Образовалась огромная волна; в городе Лорка, расположенном в 20 км вниз по течению, в этой волне утонуло 608 человек.

Фундаментом плотины служила в основном крепкая порода, но во время строительства обнаружили погребенное русло, выкопанное аллювием. Вместо того чтобы удалить аллювий и заменить его кирпичной или каменной кладкой, строители просто вогнали в него деревянные сваи, которые поддерживали плотину. После того как водохранилище было заполнено, давление воды в аллювии стало настолько высоким, что каменная кладка была размыва и вода стала вытекать под плотиной. Через 100 лет та же ситуация практически повторилась на плотине Эйджайо в Уэльсе, и только после этой катастрофы наконец-то поняли, какую опасность таят в себе подобные неуплотненные осадки.

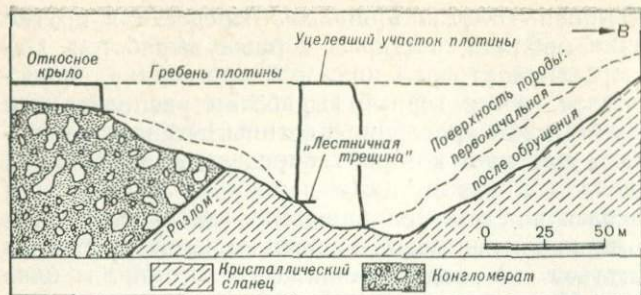
Несколько небольших плотин пришлось перенести в другие места из-за наличия поблизости старых горных выработок. Однако еще более серьезной угрозой является проседание, происходящее в том случае, когда горные выработки располагаются под плотиной. Обычно для укрепления плотины оставляют опорный целик породы, размеры которого определяются глубиной выработки; это делалось всегда, даже в южном Уэльсе, хотя проходка здесь велась под водохранилищами, где просачивания вод через глину не наблюдалось. С несколько иной проблемой пришлось столкнуться на водохранилище Кингс-Милл близ города Мэнсфилд в Ноттингемшире, где вследствие проседания пород над угольными шахтами одна из рек, питающих водохранилище, повернула вспять.

Земляные плотины могут выдержать значительную деформацию; например, две плотины, расположенные на разломе Сан-Андреас в Калифорнии, не были разрушены при подвижках во время землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско. Ни одна из плотин не обрушилась, потому что, будучи заполненными глиной, они оказались достаточно пластичными, и хотя были дважды изогнуты и смещены на 35 м вдоль линии сброса под прямым углом к своей оси, не получили даже трещин. Бетонная плотина не выдержала бы такого смещения и в подобной ситуации, конечно, обрушилась. Во время землетрясения 1954 г. в городе Орлеанвиль (Алжир) в плотине Понтеба образовались трещины. Плотина наклонилась, но, к счастью, не рухнула.

Плотины могут быть даже причиной землетрясений, так как порода деформируется под воздействием веса воды в водохранилище и, кроме того, становится гораздо более рыхлой вследствие повышения давления поровых вод. До сих пор еще ни одна плотина при этом не разрушилась, поскольку возникающие сейсмические толчки бывают очень слабыми. Однако в верхней бетонной части плотины Синфэндзян на юге Китая, фундаментом которой является нарушенный гранит, образовалась огромная трещина, когда в мае 1962 г. произошло вызванное воздействием веса воды землетрясение магнитудой 6,1.

Аллювий, землетрясения, водопроницаемость пород, структуры скальвания — все это может стать ловушкой для строителей плотин. Прежде чем строить плотину, необходимо детально изучить геологические условия, которые везде различны. Часто мы можем получить для них лишь качественную или, в лучшем случае, полуколичественную оценку. Несколько классических примеров обрушений плотин показывают, насколько велика опасность недоучета природных факторов при строительстве.

Плотина Сент-Франсис в Калифорнии навсегда вошла в анналы инженерной геологии, поскольку уже с того момента, как ее построили, стало совершенно ясно, что рано или поздно она непременно обрушится. Участок, на котором располагалась плотина, по своей геологии абсолютно не годился для подобного



Поперечный разрез плотины Сент-Франсис после ее катастрофического обрушения в 1928 г.

сооружения. Но при проектировании, осуществленном Бюро водоснабжения города Лос-Анджелес, геологические данные во внимание не принимались и за советом к геологам проектировщики вообще не обращались. Плотина была построена в суженной части каньона Сан-Францискито, в 70 км к северу от Лос-Анджелеса и в 15 км вверх по течению от того места, где каньон открывается в долину Санта-Клара, ведущую на запад к морю. Назначением водохранилища было накопление вод, поступавших по акведукам с востока, для последующего распределения их по водопроводу города Лос-Анджелес.

Сооружение водохранилища было завершено в 1926 г.; основной его структурой была простая гравитационная плотина длиной 210 м и высотой в средней части 61 м. На западном берегу протягивалось низкое откосное крыло такой же длины, как и основная плотина. Фундаментом служили кристаллические сланцы и конгломераты, и располагалась плотина как раз на нарушенном контакте этих двух типов пород.

Слюдяной сланец с хорошо развитой чешуйчатой сланцеватостью и многочисленными плоскостями сдвига подстилал левое крыло плотины. В воде порода не подвергалась выветриванию и разрушению, но она содержала небольшие включения минерального талька, и на тех плоскостях сдвига, где они концентрировались, сила сцепления была очень низкой. Несмотря на то что сланец был устойчивым к сжатию, он обрушился, как колода карт, под нагрузкой, не перпендикулярной к поверхностям скольжения. Худшее направление для сланцеватости придумать было бы трудно: она падала на запад под углом около 50° и, следовательно, была почти параллельна восточному склону каньона и очень неустойчива. Оползни в кристаллических сланцах происходили и до и после сооружения плотины, несмотря на то что на дне каньона залегала достаточно прочная порода.

На противоположном склоне каньона западный край плотины располагался на красноцветных конгломератах олигоценного возраста с прослоями песчаников и алевролитов. Эти слаболитифицированные конгломераты с основной массой из глины и гипса,

содержащие гальку размером до 20 см, имели сопротивление дроблению в 4 раза меньше, чем чрезвычайно высокое расчетное сопротивление бетона, из которого была построена плотина. Однако и этот показатель был характерен только для сухой породы. Намокнув, глинистый цемент расширился и разрушился, а гипс быстро растворился, и несцементированный конгломерат превратился просто-напросто в илистый песок. Штуф конгломерата, помещенный в лабораторный стакан с водой, полностью разрушался менее чем за 15 мин. К сожалению, этот простой опыт был проделан лишь после того, как плотина перестала существовать.

Граница конгломерата и кристаллического сланца проходила под плотиной. Она представляла собой надвиг, падавший в западном направлении почти параллельно как сланцеватости метаморфической породы, так и напластованию конгломерата. Разлом считали неактивным, и; действительно, движения по нему зарегистрированы не были. И даже несмотря на это строительство бетонной плотины на любом разломе в таком сейсмически активном районе, как Калифорния, следует считать безрассудством. В 1971 г. неподалеку от этого района — в Сан-Фернандо — произошло землетрясение, и возникло оно как раз на разломе, который ранее считали неактивным. Более непосредственное отношение к происшедшей катастрофе имели полутораметровый прослой пластичной жильной глинки и зона перемятого и брекчированного материала, приуроченные к разлому.

Заполнение водохранилища Сент-Франсис началось в 1927 г., но впервые вода достигла максимального уровня лишь 5 марта 1928 г. К тому времени просачивание воды через конгломерат под плотиной уже вызывало беспокойство, и инженеры из Управления водоснабжения и энергии города Лос-Анджелес занялись изучением этого вопроса. Они обнаружили, что просачивающаяся вода абсолютно прозрачна, т. е. не размывает породу, поэтому предупреждения об опасности не последовало. Однако вода содержала большое количество сульфата из-за растворения гипсового цемента в породе. Течение усиливалось, и утром 12 марта вода прорвалась через толщу конгломератов. В тот же день за две минуты до полуночи плотина рухнула.

К сожалению, свидетелей этой катастрофы в живых не осталось, и они не могут рассказать нам о ней; должно быть, это было страшное зрелище. Сток почти мгновенно превысил 22 700 м³ в секунду, вода промчалась вниз по каньону, как стена высотой около 40 м. Через 5 мин она снесла электростанцию, находившуюся в 2,5 км вниз по течению. Все живое и все творения рук человеческих в каньоне были уничтожены. Затем волна устремилась в долину Санта-Клара; здесь высота волны несколько уменьшилась, а разрушительная сила ослабла, однако она не потеряла способности убивать. Немногим в верхней части долины удалось остаться в живых, это были только случайно спасшиеся на деревьях или плывущих в потоке обломках.

К тому времени, когда наводнение достигло прибрежной равнины, оно представляло собой грязную волну шириной в 3 км, катившуюся со скоростью быстрого шага. Позади волны долина была затоплена на 80 км. На школьной спортивной площадке в Санта-Паула одновременно плавало 14 бревенчатых домов. Во время этого наводнения погибло более 600 человек.

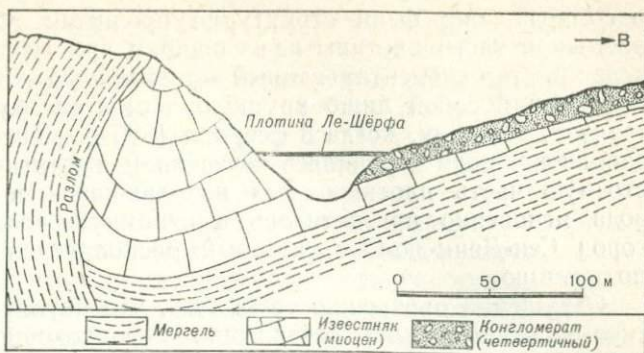
Водохранилища больше не существовало; оно было полностью осушено, и произошло это менее чем за час. Центральная часть плотины сохранилась, хотя несколько и сместилась. Восточный конец распался на десять или более крупных блоков, которые были разбросаны в разные стороны; большая часть западной стены была разрушена, хотя низкий бортовой выступ остался. По обеим сторонам плотины породы фундамента были размыты на глубину до 10 м.

Обрушение плотины Сент-Франсис могло быть вызвано не только сбросовым движением, но и еще тремя геологическими причинами. Конгломерат мог превратиться в порошок, жильная глина, выполнявшая разлом, могла быть размыта, а сланцы могли подвергнуться смятию. Но в конструкции плотины, где предусматривались лишь небольшие отсекающие рвы, не было цементации и глубоких креплений, т. е. все эти вероятные опасности не учитывались. После катастрофы геологи и исследовательские группы считали, что обрушение произошло вследствие сочетания всех трех названных факторов; по окончании официального расследования было заявлено, что катастрофа «целиком и полностью объясняется тем, что плотина была построена на неподходящем материале».

Истинную причину катастрофы следовало искать на восточном берегу, однако инженеры, исследовавшие здесь просачивания непосредственно перед обрушением, ничего о ней не подозревали. Обломочный материал, обнаруженный после наводнения выше уровня водохранилища, свидетельствовал о том, что в наполненное водохранилище сползла масса кристаллического сланца. Это, вероятно, сопровождалось значительным латеральным смещением, в результате которого из-под самой плотины было удалено огромное количество сланца. На другой стороне, где залегал уже ослабленный конгломерат, произошла слишком сильная деформация. Поэтому западная часть плотины должна была обрушиться сразу же вслед за восточной; это случилось так быстро, что возникла лишь одна огромная волна.

Таким образом, основной причиной обрушения было смещение легко поддающегося смятию кристаллического сланца. Истинные масштабы этого смещения определить невозможно, однако оно было достаточно сильным, чтобы деформировать плотину и превысить ее предел прочности еще до того момента, как волна смыла всю оползную коренную породу.

Было бы преуменьшением просто заявить, что обрушение плотины Сент-Франсис можно было предсказать. Совершенно оче-



Плотина Ле-Шёрфа (Алжир).

видно, что геология участка не подходила для строительства плотины, и трудно поверить, что при ее сооружении ничего не было известно о свойствах размокающих конгломератов. Но если рабочие или другие лица указывали на опасность, то люди, руководившие строительством плотины, казалось, были слепыми. Геологические условия совершенно не учитывались, несмотря на то что имеющийся разлом был обозначен на опубликованных картах, а все плоскости ослабления в кристаллическом сланце и конгломерате были хорошо обнажены. Обрушение плотины Сент-Франсис стало прекрасным примером того, как не следует строить плотины.

Подобно плотине Сент-Франсис, плотина Ле-Шёрфа является классической с геологической точки зрения, потому что она обрушилась из-за неустойчивого фундамента. Однако если на геологию в районе плотины Сент-Франсис просто не обращали внимания, то обрушение плотины Ле-Шёрфа было вызвано ошибкой в понимании геологических условий. Эта плотина находилась близ города Оран, недалеко от берега Средиземного моря в западной части Алжира; она была построена в 1885 г., глубина воды в образовавшемся водохранилище составляла 22 м.

На участке сооружения плотины коренной породой был мощный миоценовый известняк с прослоями брекчий, падающий на запад в ядро опрокинутой синклинали. Известняк перекрывал толщу мергелей с маломощными прослоями известняков и песчаников, выходящую на поверхность высоко на западном берегу. Заканчивался разрез четвертичными глинами и конгломератами, мощность которых местами достигала 30 м. Четвертичные отложения в основном были неуплотненными, однако на отдельных участках некоторые конгломераты были сцементированы, как это часто наблюдается в поверхностных обломках известняков, особенно в жарких районах, где скорость испарения очень высока.

Фундаментом западного конца плотины служили мощные миоценовые известняки. Хотя через эти известняки и просачива-

лась вода, они были структурно прочными. Фундаментом же восточной части плотины из-за ошибки при геологическом определении стал сцементированный четвертичный конгломерат, представлявший собой лишь хрупкую корку на неуплотненном материале. Поэтому, когда 8 февраля 1885 г. водохранилище было заполнено, вода перелилась через край и фактически смыла восточную часть плотины. Вся находившаяся в водохранилище вода мгновенно превратилась в огромную волну, накрывшую город Сен-Дени-дю-Сюг, который располагался в 20 км вниз по течению.

Обрушение произошло из-за того, что неуплотненные четвертичные осадки были совершенно неподходящим фундаментом для плотины. Западная половина плотины, фундаментом которой служил мощный миоценовый известняк, повреждена не была; впоследствии она стала частью новой плотины, построенной в 1892 г. Эта плотина стоит и сейчас; чтобы предотвратить просачивание воды через известняк, пришлось сделать глубокий цементный заслон, доходящий до самого мергеля.

Как показало расследование, основная причина катастрофы 1885 г. заключалась в том, что четвертичный сцементированный конгломерат был принят за слой брекчии в миоценовом известняке. Хотя между этими материалами наблюдается значительное сходство (оба они в основном состоят из обломков известняка), но при тщательном анализе их, безусловно, можно было различить: в четвертичных отложениях встречаются гальки из неизвесткового материала. В выветрелом состоянии обе породы очень похожи, однако каждый специалист в области инженерной геологии должен знать об этом и обязан провести детальное и тщательное исследование. Обрушение плотины Ле-Шёрфа наглядно показало, что может произойти, если принять погребенный слой неуплотненного осадка за массивную породу.

С геологической точки зрения обрушение плотины на водохранилище в горах Болдуин в Калифорнии было необычным и труднообъяснимым, поскольку первоначально причина этой катастрофы была совершенно непонятна. Однако с тех пор механизм этого явления был изучен более детально и картина прояснилась. Обрушение можно отнести к необычным в том плане, что все признаки грядущей катастрофы были налицо, и поэтому удалось своевременно эвакуировать население из опасного района. Это было огромной удачей, особенно потому, что водохранилище располагалось на 100 м выше густонаселенных пригородов Лос-Анджелеса. Город раскинулся вокруг гор, и водохранилище было создано для подачи воды в его постоянно растущий юго-западный район.

Водоохранилище сооружалось с 1947 по 1951 г. Из узкого неглубокого ущелья была проведена выемка породы, из которой в устье ущелья соорудили основную плотину высотой 40 м, а также создали серию низких дамб на окружающих возвышенно-

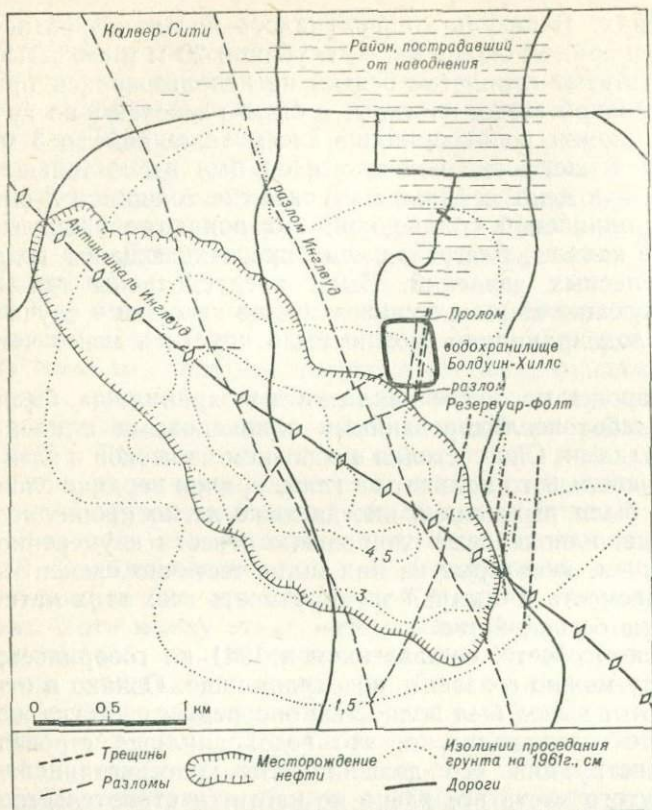
стях и седловинах. В результате получилось почти квадратное водохранилище шириной около 300 м, глубиной 20 м и емкостью 1140 млн. л. Вынутые глинистые осадки не использовались при строительстве главной стены плотины, а были раскатаны по дну и внутренним склонам водохранилища слоем толщиной до 3 м, причем в верхней части склонов этот слой был вдвое тоньше. На глину было положено асфальтовое покрытие толщиной 8 см, служившее непроницаемой облицовкой; это покрытие пронизывали дренажные каналы, благодаря чему просачивающаяся вода не достигала опасных давлений. Были предусмотрены также крупные дренирующие каналы со шлюзами, по которым в случае аварии воду из водохранилища можно было спустить менее чем за 24 ч.

Коренные породы на месте закладки водохранилища были представлены слабоконсолидованными плиоценовыми и плейстоценовыми осадками. Они состояли в основном из песков и алевритов, а также небольшого количества глин, причем верхние слои осадков обычно были рыхлыми и иногда даже легко крошились в руках. Нижние, плиоценовые слои можно отнести к умеренно консолидированным, некоторые из них были частично сцементированы. Проницаемость и быстрая эродируемость всех этих материалов вызывали беспокойство.

В геологическом отчете, составленном в 1941 г., говорилось, что на этом месте можно создавать водохранилище. Однако в отчете за 1943 г. этот вывод был полностью опровергнут. Когда же в третьем отчете было заявлено, что водохранилище строить можно, но «конструкция его должна быть консервативной», решили, что другого места все равно не найти, и строительство началось.

Геология этого участка осложняется еще и геологическими особенностями. Гора Болдуин представляет собой антиклинальный купол в толще нефтеносных третичных отложений мощностью 3600 м, залегающих на мезозойских кристаллических сланцах. Ось антиклинали проходит к западу от водохранилища; с той же самой стороны, но ближе к водохранилищу разлом Инглвуд смещен на 450 м по латерали, в этом месте наблюдалось несколько толчков. Во время строительства на участке, отведенном под водохранилище, было обнаружено два незначительных разлома; больший из них, расположенный восточнее, известен теперь под названием Резервуар-Фолт («разлом водохранилища»). По этому разлому наблюдался глинистый пропласток мощностью до 10 см с поверхностями скольжения; разлом был достаточно заметным, вследствие чего водосброс перенесли в другое место.

Куполообразная антиклиналь Инглвуд представляет собой крупное промышленное месторождение нефти; еще с 1924 г. сотни скважин были пробурены в залегающих здесь песках третичного возраста. При разведке нефти было обнаружено множество разломов, в том числе крупный глубоко залегающий разлом Инглвуд;



Болдуин-Хиллс близ Лос-Анджелеса, где в 1963 г. произошло обрушение водохранилища вследствие подвижек грунта, связанных с разработкой нефтяных месторождений в антиклинали Инглвуд.

предполагалось, что один из выявленных разломов является продолжением нарушения Резервуар-Фолт. Извлечение нефти из осадков сделало антиклиналь Инглвуд центром активно проседающей впадины. За период с 1917 по 1963 г. центральная часть этой впадины опустилась на глубину до 3 м; за то же время участок, где находилось водохранилище, осел почти на метр. Кроме того, этот участок входил в кольцевую зону, где за 29 лет максимальное латеральное перемещение грунта составило более метра в сторону центра проседающей впадины.

Все время, пока существовало водохранилище, постоянно наблюдались признаки подвижек грунта. В бетоне, покрывающем разведочные штреки, были обнаружены мелкие трещины, а в стенах водохранилища — сетка еще более мелких трещин; исследования показывали, что проседание и горизонтальное смещение продолжают. Самым интересным результатом повторных съемок был следующий: с 1947 по 1962 г. участок, на котором рас-

полагались водохранилище и плотина, увеличился на 12 см вдоль диагонали северо-восток — юго-запад. В мае 1957 г. на площади к юго-востоку от водохранилища стали образовываться крупные трещины, а затем они появились уже вблизи водохранилища. Это были открытые трещины до 750 м в длину, не перемещавшиеся по латерали; они круто падали на запад, протягиваясь параллельно небольшим разломам, имевшимся на этом участке.

Однако никаких признаков повреждений водохранилища не наблюдалось. Все было спокойно. . . Но в 11 ч 15 мин утра 14 декабря 1963 г. сторож, следивший за режимом водохранилища, обнаружил, что дренажные каналы сбрасывают воду под высоким давлением. Это означало, что вода из водохранилища прорвалась через асфальтовую облицовку в слой глины. Была поднята тревога. К 12 ч 20 мин начали спуск воды из водохранилища, а в 13 ч вода стала просачиваться из-под основания восточного конца плотины. Поскольку к этому времени плотина была уже эродирована изнутри, стало совершенно ясно, что водохранилище обречено. Были приняты экстренные меры к спасению населения: объявления по радио, телевидению и с вертолетов, снабженных громкоговорятелями, помогли быстро эвакуировать 1600 человек из домов, расположенных под плотинной.

К 14 ч просачивание воды стало настолько сильным, что у края водохранилища возник водоворот, а девятью минутами позже в основании плотины появилось огромное отверстие. В 15 ч 38 мин в это отверстие обрушилась верхняя часть плотины, в которой образовалась огромная трещина высотой 27 м и шириной 22 м. Первоначально скорость течения воды через эту трещину составляла более 120 м³ в секунду, и через час водохранилище было уже пустым. Волна обрушилась вниз по ущелью, и расположенная внизу равнина скрылась под 2,5-метровым слоем воды, однако благодаря своевременной эвакуации жертв было немного: утонуло пять человек. Сорок один дом был разрушен, почти тысяча строений повреждены, улицы покрылись толстым слоем грязи. Общий ущерб составил почти 15 млн. долл.

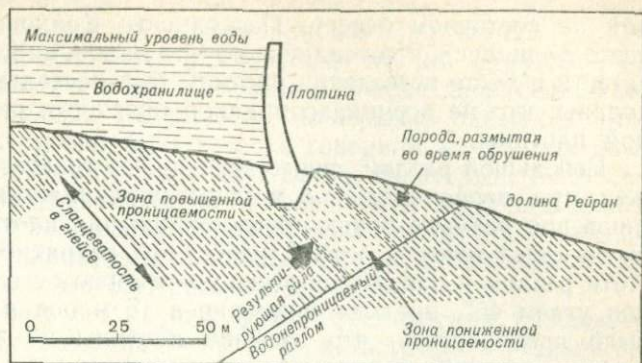
Как только вся вода из водохранилища вытекла, сразу же стала ясна причина катастрофы: вдоль обнажения Резервуар-Фолт через асфальтовое покрытие протягивалась трещина, уходившая в пролом в плотине. По разлому произошло такое же движение, как и по ранее образовавшимся трещинам в земной поверхности на юго-востоке участка: разлом открылся на 10 см и сместился к западу почти на 20 см. Вода проникла через разрушенный асфальт, залила систему закрытого внутреннего дренажа и продолжала течь вниз в разлом, размывая рыхлые пески и алевроиты под слоем накатанной глины. В конце концов вода прорвалась и под плотину и начала быстро подмывать породу под ней. Однако при движении разлома плотина не разрушилась и даже некоторое время сохраняла перемычку над отверстием, из которого вытекала вода.

Причиной движения по разлому явилось, несомненно, развитие деформаций, сопровождавших проседание антиклинали Инглвуд, но именно при таком заключении и началась путаница. Проседание произошло не вследствие удаления воды, поскольку такового не наблюдалось, и не вследствие оползней или землетрясений, так как в этот день они зарегистрированы не были. Предполагали, что движение грунта началось вследствие извлечения нефти из месторождения Инглвуд. Однако начиная с 1957 г. на месторождении перешли к вторичному извлечению полезного ископаемого путем нагнетания в породу рассола, вытесняющего нефть. При этом было зарегистрировано заметное ослабление движения грунтов вокруг месторождения. Возник вопрос, почему же в 1963 г. движение внезапно возобновилось. Полагали, что это произошло вследствие какого-то глубинного тектонического процесса, но никаких подвижек на разломе Инглвуд зарегистрировано не было. При местных же тектонических условиях в антиклинальной области скорее могло начаться поднятие, чем опускание, и, следовательно, на участке водохранилища должно было происходить сжатие, а не растяжение.

Нефтяные компании заплатили городу и его страховым обществам без какого-либо судебного разбирательства почти 3,9 млн. долл., что составляло около 25 % от общего материального ущерба. В результате официального расследования было сделано следующее обобщенное заключение: «Слишком много хотели от этого водохранилища, расположенного в краевой части чувствительной системы разломов Ньюпорт-Инглвуд с неустойчивой тектоникой, на краю быстро проседающей впадины, на фундаменте, подвергающемся активному воздействию воды».

Лишь позже стало понятно, какую роковую роль в обрушении плотины на водохранилище в горах Болдуин сыграло вторичное извлечение нефти. Этот вид добычи предполагает выкачивание нефти из одних скважин при нагнетании воды или рассола в другие скважины, благодаря чему повышается давление жидкости в породах на глубине. В настоящее время хорошо известно, что подобное увеличение давления поровых вод может привести к снижению сил сцепления по плоскостям сброса; в ряде случаев это послужило причиной слабых землетрясений. В данном случае увеличением порового давления стимулировалось движение вдоль разлома Резервуар-Фолт, который был вполне устойчивым до того момента, пока в породах не возросло давление воды. Это предположение подтвердилось при сопоставлении скорости нагнетания рассола в породы месторождения Инглвуд с образованием трещин в его краевых частях, а также с потерей флюидов в плоскости сброса.

Хотя проектировщики водохранилища учли сопротивление толчкам и проседанию, они, к сожалению, допустили две ошибки. Предполагалось, что разлом Резервуар-Фолт — небольшой и неглубокий, тогда как в действительности он достигал значитель-



Поперечный разрез плотины Мальпассе.

ной глубины и пересекал крупные поля напряжений в погружающейся антиклинали. Кроме того, не было учтено неизбежное изменение физических свойств пород, которое сопровождает операции по извлечению нефти. Вопрос о том, кто виноват в катастрофе: нефтедобывающие компании или Министерство водных ресурсов — до сих пор остается открытым. Но нельзя отрицать, что в такой ситуации, которая сложилась в горах Болдуин, нефтяное месторождение и водохранилище были абсолютно несовместимыми.

Обрушения плотин Сент-Франсис, Ле-Шёрфа и Болдуин-Хиллс можно было предсказать при правильной оценке местных геологических условий, на плотине же Мальпассе дело обстояло иначе. Обрушение плотины Мальпассе было обусловлено геологической обстановкой, но ни до катастрофы, ни во время ее механизм обрушения известен не был; лишь впоследствии удалось его установить, отчасти благодаря самой катастрофе.

Плотина, построенная в 1953 г., запрудила реку Рейран в 8 км к северо-востоку от города Фрежюс на западном конце Французской Ривьеры. Это было бетонное сооружение с тонкой аркой высотой 65 м, длина искривленной сводовой части составляла 220 м; плотина удерживала воду в водохранилище длиной 6,5 км и емкостью 25 млн. м³.

Геологическое строение этого места казалось почти идеальным. Коренной породой был каменноугольный гнейс и маломощный аллювий, который полностью удалили во время строительства водохранилища. Гнейс включал пегматитовые жилы, в которых не было ослабленных зон, а также имел густую сеть микротрещин, не отличавшихся каким-либо определенным характером. Никакой тревоги эти трещины не вызывали, поскольку было установлено, что породы фундамента способны вместить при нагнетании лишь минимальное количество цемента. Полосчатость гнейса обуславливалась главным образом слюдой, а также большим количеством кальцита и серицита, особенно в зоне, расположен-

ной на восточном берегу. Поверхности шелковистого серицита часто смещались, что усиливалось при намокании, но угол сланцеватости в месте возведения плотины был настолько круче склона долины, что не возникало никакой опасности оползания насыпной плотины.

Небольшой разлом, существовавший в гнейсе, не был обнаружен при первоначальном исследовании участка; он выявился лишь при размыве породы после обрушения плотины. Даже если бы он и был замечен, особой тревоги это, вероятно, не вызвало бы. Хотя разлом и обнажался выше по течению от плотины, и падал под углом 45° , проходя примерно в 15 м под плотинной, можно было предполагать, что засыпка плотины не должна вызвать здесь каких-либо новых опасных подвижек.

После того как в 1953 г. строительство плотины завершилось, водохранилище стало постепенно заполняться, однако из-за больших расходов воды максимальный уровень в нем был достигнут лишь в конце ноября 1959 г. До тех пор замеченные деформации и движение плотины не выходили за пределы допустимых. Пятнадцатого ноября 1959 г. сторож обнаружил, что из-под западного берега примерно в 20 м вниз по течению от плотины просачивается вода; это продолжалось и во время сильного дождя, начавшегося 27 ноября. В 9 ч вечера 2 декабря плотина обрушилась, но свидетелей этой катастрофы не было. По рассказам сторожа, находившегося в то время в своем доме, расположенном в 1,5 км от водохранилища, катастрофа разразилась молниеносно: привычную тишину вдруг нарушил сильный треск, двери и окна дома были вырваны резким порывом ветра, и началось невероятное. . .

Плотина обрушилась мгновенно, и образовавшаяся волна была поистине гигантской. Она устремилась вниз по узкой долине реки Рейран, затем разлилась по расположенной внизу равнине, все разрушая на своем пути. В городе Фрежюс погибло более 400 человек, для Франции это было настоящим национальным бедствием. От плотины не осталось камня на камне. На западном берегу сохранился лишь небольшой блок, а на восточном — лишь край плотины, смещенный на 2 м по горизонтали от исходного положения.

При расследовании причин катастрофы выяснилось, что среди обломочного материала, принесенного в долину, бетонные плиты и их обломки, как и при постройке, были по-прежнему сцеплены с гнейсом. Это свидетельствовало о том, что причиной обрушения плотины не могла быть потеря контакта между плотинной и коренной породой. Комиссия не обнаружила никаких ошибок и в конструкции плотины; бетон тоже был хорошим, а в почти водонепроницаемый гнейс нагнетался к тому же цементирующий раствор. Поэтому было решено, что плотина обрушилась вследствие изгибания тонкой бетонной арки, которое было вызвано движением фундамента плотины. Поскольку порода, послужившая причиной

обрушения, была вымыта волной, велись споры, как произошло обрушение — в результате деформации или оползания.

Хотя впоследствии было установлено, что ни один из этих процессов не был причиной обрушения, в ходе дискуссий было получено два важных результата. Во-первых, оказалось, что инженеры-проектировщики и геологи говорили на разных языках, а потому не могли понять друг друга. Во-вторых, было сделано официальное заявление о необходимости проводить более детальное исследование всех пород фундамента *in situ*, особенно в поверхностных слоях, а не полагаться на результаты лабораторных проверок, как это обычно было принято.

Лишь несколько лет спустя группе французских инженеров удалось установить истинную причину катастрофы в Мальпассе. При выполнении серии лабораторных опытов с целью выяснения связи между водопроницаемостью и преобладающим напряжением в серии пород обнаружилось, что водопроницаемость некоторых пород резко снижалась при сжатии, причем наиболее сильный эффект наблюдался в микротрещиноватых породах, таких как гнейс. Растягивающее напряжение вызывало увеличение проницаемости. Оказалось, что из всех изученных пород именно в гнейсе изменение проницаемости наиболее сильно зависит от напряжений. Если рассматривать это открытие применительно к данной плотине, то его значение становится совершенно очевидным, так же как и роль небольшого разлома, находившегося ниже по течению. Под воздействием давления насыпной плотины произошло сжатие гнейса, и его проницаемость уменьшилась примерно до одной сотой от ее обычного значения. Сам разлом содержал непроницаемую жильную глинку, и таким образом под плотиной создавался почти непроницаемый для воды барьер.

Для зоны растяжения в гнейсе под краевой частью водохранилища была характерна повышенная водопроницаемость, через эту зону и передавалось поровое давление воды. В результате в почти водонепроницаемом гнейсе под плотиной возникла огромная сила, направленная вверх параллельно ослабленному разлому, которая совместно с воздействием порового давления подняла плотину. Несомненно, причиной обрушения было окончательное заполнение водохранилища, вызвавшее несколько более сильную деформацию плотины и подстилающих пород и приведшее к образованию трещин в дне водохранилища, что способствовало более быстрой передаче давления воды.

Обеспечить безопасность на плотине Мальпассе можно было лишь путем сооружения системы дренажа под плотиной, что препятствовало бы росту давления поровых вод. В настоящее время подобные сооружения предусматриваются во всех плотинах такого рода. Несмотря на то что в ретроспективе механизм обрушения плотины Мальпассе стал совершенно очевидным, несправедливо было бы обвинять в непредусмотрительности инженеров-проектировщиков, которые в то время ничего не знали о прин-

циях такого механизма. В данном случае инженерам можно простить некоторые геологические ошибки, поскольку еще не были изучены все проблемы, возникающие в условиях, когда огромные силы оказывают воздействие на такие природные материалы, как вода и горная порода.

Будущее

Почему происходит обрушение плотины? Неужели каждый раз, когда обрушение носит иной характер, чем предшествующие катастрофы, человек неизменно будет понимать это уже слишком поздно?

Трагедии в Мальпасе и горах Болдуин произошли потому, что причины, их вызвавшие, не были своевременно выявлены. Несомненно, предсказать катастрофу гораздо труднее, чем говорить о случившемся *post factum*. Нелепые ошибки в конструкциях плотин Сент-Франсис и Ле-Шёрфа уже стали достоянием истории. Однако в июне 1976 г. обрушилась плотина на реке Титон в Соединенных Штатах. Что же это было: сказалась еще одна досадная ошибка или проявилась какая-то новая, ранее не известная причина? В результате обрушения плотины на реке Титон погибло 11 человек, 25 000 осталось без крова, а общий ущерб составил около 400 млн. долл. Однако надо отдать должное Управлению мелиорации США, под руководством которого кроме плотины на реке Титон было сконструировано более 300 других плотин: оно стало инициатором досконального расследования причин катастрофы.

Земляная плотина была размыта, когда водохранилище впервые заполнили. Истинная причина катастрофы до сих пор неизвестна, вероятно, обрушение было обусловлено слабостью фундамента. В основании плотины залегал сильно трещиноватый риолитовый туф, который местами являлся водоносным горизонтом. В нем было пробурено несколько скважин, таким образом в плотине был создан цементный экран и огромная, невиданных ранее масштабов траншея для отвода воды. Дно траншеи покрывалось цементом вручную, в этом-то и заключалась роковая ошибка. Проектировщики полагали, что подобной цементирование сделает поверхность породы водонепроницаемой. Однако строители выполнили цементирование лишь с целью укрепления фундамента плотины: густой цементный раствор был залит во все крупные трещины в риолите, а на трещины около 1 см в поперечнике не обратили внимания.

Затем на этой поверхности была заложена плотина из алеврита и глины; когда водохранилище было заполнено, вода проникла в эти мелкие трещины и достигла основания плотины. Смесь алеврита и глины была размыта; этот материал меньше подходит для строительства плотины, чем самоуплотняющаяся глина, но в других местах он с успехом применялся. В результате

вода начала вытекать из-под плотины над цементной перегородкой в породе фундамента, после этого обрушение стало уже неизбежным. Плотина на реке Титон обрушилась потому, что ее конструкция, правильная по своей сути, не учитывала местных геологических условий. Ужасно, что чаще всего именно этот промах приводит к катастрофе. Но послужило ли обрушение плотины на реке Титон должным уроком?

Геологические причины обрушения плотин обычно выявляются быстро, и если плотина выдерживает первое заполнение водохранилища, это означает, что она устоит и в дальнейшем. Однако это нельзя сказать о других сооружениях, где мы имеем дело с водой.

До 1818 г. Рейн в своем верхнем течении между городами Базель и Карлсруэ меандрировал по широкой пойме. В том году начали проводить мероприятия, направленные на регулирование течения этой реки; эти работы продолжаются и сейчас. Длина реки была сокращена, построили плотины, каналы, дамбы, благодаря чему Рейн превратился в транспортную артерию, каковой является и в настоящее время. Печальный результат всех этих работ, выполнявшихся различными организациями без взаимного согласования, заключается в том, что теперь у реки нет поймы и все паводковые волны, возникающие во время весеннего таяния снегов в альпийских водосборах, мгновенно проносятся вниз по течению.

Расположению города Карлсруэ в настоящее время не позавидуешь. В 1955 г. он сильно пострадал во время весенних паводков, но если бы то же самое произошло в Альпах в 1978 г., уровень наводнения из-за проведенных за эти годы на реке работ повысился бы на 35 %. Лучший способ избежать такой катастрофы — это воссоздать ту пойму, которая была у реки в 1818 г. В этих условиях паводковая вода будет растекаться по местности, а не устремляться единым потоком к городу Карлсруэ. Подобная схема уже существует на бумаге. Но будет ли она внедрена в практику? Или придется ждать того момента, когда в городе Карлсруэ произойдет еще одна катастрофа, — на этот раз уже не из-за реки, а по вине человека?

Проседание грунта

* * *

Это было в 1965 г. в городе Лексингтон, штат Кентукки. Около строительной площадки остановился грузовик и стал спускать цемент в форму для фундамента дома. Внезапно раздался глухой грохот, земля под цементовозом разверзлась, и он тут же провалился в зияющую дыру глубиной около 4 м. В Лексингтоне коренной породой является известняк, содержащий многочисленные полости. Обрушение кровли одной из них могло послужить причиной возникновения провала.

Проседание грунта может происходить многими разнообразными путями. Внезапному проседанию может подвергнуться очень небольшой участок, но и этого бывает достаточно для падения одной опоры здания. Иногда проседание грунта вызывает медленное опускание целых городов. Наиболее известным примером такого рода является Венеция. Хотя проседание грунта бывает и естественным процессом, оно также может быть и следствием человеческой деятельности; наиболее очевидный пример этого — обвалы в старых шахтах. Важно помнить, что большинство случаев проседания земли связано, хотя бы косвенно, с влиянием человека на естественную стабильность грунтов. Искусство строительства на сегодняшний день достигло таких успехов, что почти любая проблема может быть разрешена, если известна ее природа, но вопрос о проседании грунта представляет непреодолимую трудность.

Во многих случаях проседание затрагивает небольшие и вполне доступные для исследования площади. Однако предсказание такого процесса является трудной задачей. Естественные полости в грунте, например в известняках, чрезвычайно трудно обнаружить. Для этого необходимо проведение дорогостоящих работ, предусматривающих бурение скважин на очень малых расстояниях друг от друга. Региональное проседание, затрагивающее большие площади, предвидеть в общем легче. Сейчас технически возможно остановить опускание области, измеримой по площади с Венецией, но стоимость подобных работ необычайно высока.

Вероятно, единственный тип проседания, который не подчиняется контролю человека, — это образование изгибов геологических слоев, затрагивающих всю толщу земной коры. Это явление становится катастрофическим, если оно сопровождается землетрясениями. Обычно же подобные движения совершаются очень медленно, так что их результаты становятся заметными через сотни лет. Таким образом, проседание земли, за исключением последнего случая, — процесс, теоретически предсказуемый и контролируемый, однако добиться этого на практике значительно сложнее.

Проседание при растворении пород

Известняк, гипс и каменная соль в естественных условиях хорошо растворяются в воде. Из этих пород наибольшее распространение и наименьшую растворимость имеет известняк. Он

отличается от гипса и каменной соли еще и тем, что в результате его подземного растворения образуются полости, которые обычно обладают очень устойчивой кровлей. Проседание и обрушение — для известняков явления распространенные и всегда связанные с полостями. Каменная соль, напротив, — порода гораздо более хрупкая и к тому же лучше растворимая; она часто подвергается проседанию, но это редко бывает связано с наличием полостей. Гипс по этим свойствам занимает промежуточное положение между известняком и каменной солью.

Легко растворимый в воде сульфат кальция образует два минерала, которые формируют мощные толщи пород, — гипс и ангидрит. Наиболее распространенной — гидратной — формой является гипс, а ангидрит представляет собой менее представительную — безводную — форму. Эти минеральные вещества входят в состав толщ, занимающих большие территории в Соединенных Штатах Америки, Западной Европе, Советском Союзе. Проседание в этих толщах нередко бывает связано с растворением. Кроме того, ангидрит в контакте с грунтовой водой образует гипс, что влечет за собой большое увеличение объема материала; в свою очередь это вызывает сильное поднятие поверхности земли.

В течение многих лет в северо-западном Техасе раздавались взрывы, причиной которых было сильнейшее поднятие, связанное с расширением ангидрита. Затем, в сентябре 1955 г., около города Новика взрыв возвестил о вертикальном поднятии на 5,5 м блока грунта с поперечными размерами в несколько сотен метров; обломки почвы и породы взлетели в воздух, осколком ударило человека, находившегося на расстоянии около километра от места взрыва.

Однако более распространенным типом движения земли, связанного с растворением гипса, является проседание. Знаменитые Бездонные Озера Розуэлл на краю долины Пекос в штате Нью-Мексико представляют собой серию обрывистых, заполненных водой структур обрушения, образовавшихся в доисторическое время вследствие растворения гипсовой коренной породы. Самая крупная из этих структур достигает сейчас в поперечнике 90 м и в глубину 40 м. Сходное, но более позднее происхождение имеют разнообразные карстовые воронки в гипсовых отложениях гор Кутеней в Британской Колумбии. В 1967 г. на дне гипсового карьера в Уиндермире за одну ночь образовалась шахта с вертикальными стенками диаметром 20 м; к счастью, никакого вреда она не нанесла.

В Европе гипсовые отложения наиболее широко распространены в северной части ФРГ. Городок Бад-Франкенхаузен — один из пострадавших от проседания: многие постройки, стоящие над теми местами, где подстилающий гипс был растворен, наклонены или повернуты. Париж является, вероятно, одним из самых больших городов, затронутых проседанием; на окраинах Парижа в ко-

ренной породе постоянно образуются полости, что создает проблемы для инженеров.

Хотя хлорид натрия (каменная соль) не так широко распространен, как гипс, он гораздо более известен в связи с проседанием, поскольку его растворимость гораздо выше и опускание происходит в больших масштабах. В феврале 1954 г. в Виндзоре (Канада) неожиданно в результате обрушения образовалась пропасть; она имела в поперечнике 90 м, глубину 8 м и быстро наполнилась водой. Был нанесен большой ущерб, полностью разрушено два здания. Причиной обрушения послужило растворение подстилающей толщи соли, хотя, возможно, этому способствовали также проводившаяся неподалеку откачка соляного раствора и обрушение старых глубоких выработок.

Неожиданное обрушение в селе Рундж (северная Индия) в 1970 г. совершенно не связано с деятельностью человека. 21 ноября в начале ночи жители этого села были разбужены оглушительным грохотом, их дома вибрировали. Выбежав на улицу, люди обнаружили, что в середине поля, которое еще накануне вечером было покрыто бамбуком, образовалась глубокая зияющая яма шириной около 18 м и глубиной 12 м. Дно ямы было заполнено слоем обломков, толщина которого оказалась достаточной, чтобы завалить по самые верхушки бамбуковые посадки высотой 15 м. Село было построено на вулканических лавах, под которыми на глубине около 100 м залегал соляной пласт. Грунтовые воды, просачиваясь через соль в течение многих лет, растворяли ее, что привело к образованию большой полости, кровлей которой служили перекрывающие лавы. Постепенно пласт за пластом слои вулканических образований падали в пустоту, в конце концов обрушение достигло земной поверхности и поглотило бамбуковые посадки.

Возможно, обрушение в Рундже является предвестником более крупных опасностей в будущем. Во всяком случае, в Канаде есть данные о гораздо более грандиозных обрушениях в геологическом прошлом. Прерии в провинции Саскачеван подстилаются обширными отложениями соли. Основная толща мощностью 120—200 м залегает на глубине больше 1,5 км. Растворение соли естественно циркулирующей грунтовой водой вызвало локальное обрушение перекрывающих пластов. Озеро Кратер в 160 км к северо-востоку от города Реджайна лежит во впадине, образовавшейся в результате такого обрушения. Оно имеет форму почти правильного круга диаметром более 200 м, глубина его в связи с накоплением осадков сейчас составляет всего 150 м. Вокруг озера прослеживаются цилиндрические разломы с вертикальным сдвигом примерно на 60 м. Распределение поверхностных осадков показывает, что это движение осуществлялось в течение различных ледниковых периодов примерно миллион лет назад.

Еще более древним является проседание в Розтауне, в 160 км к юго-западу от города Саскатун; этот процесс, очевидно, доледниковый. Депрессия Розтаун заполнена ледниковыми отложе-

ниями, и в настоящее время никаких следов бывшего обрушения на земной поверхности усмотреть невозможно, однако масштабы его были гигантскими. Поверхность земли просела здесь на глубину свыше 900 м на участке с поперечными размерами более 19 км. При помощи глубоких скважин было показано, что соляные пласты, залегающие на глубине 1,5 км, как раз под территорией Розтауна отсутствуют, а в тех местах, где они должны были бы находиться, скважины вскрыли только массы обрушенной породы.

26 марта 1879 г. в Мид-Каунти (штат Канзас) в результате обрушения образовалась пропасть с крутыми стенками диаметром около 60 м. Следы телег, оставленные три недели назад, были отчетливо видны по обе стороны пропасти. Это еще один пример последствий подземного растворения соли. Той же причиной объясняется и ночное исчезновение железнодорожной станции Розел. Здесь яма, образовавшаяся в результате обрушения, имела глубину 20 м и площадь 4000 м². Она сразу же заполнилась водой, и от железнодорожной станции, а также от нескольких зданий не осталось никаких следов. Эти два случая обрушения представляют собой чисто природные процессы; они чрезвычайно трудно поддаются предсказанию на основании каких-либо геологических данных. Гораздо более определенно можно ожидать обрушения, вызванного вмешательством человека, особенно откачиванием соленых грунтовых вод из пластов соли, однако и в этих случаях точное место возможного проседания указать трудно. Откачивание грунтовых вод при добыче нефти в районе озера Сауэр (штат Техас), несомненно, ускорило подземное растворение соли. Утром 9 октября 1929 г. произошло крупное обрушение. Оно началось с образования небольшого углубления, стенки которого затем стали проседать, и за 5 ч глуб на ямы достигла почти 30 м.

Наиболее знаменитые случаи проседания связаны с добычей соли в графстве Чешир (Англия); они поистине катастрофичны. Чеширская равнина — это однообразная плоская территория, которая простирается примерно на 30 км между холмами северного Уэльса на западе и Пеннинскими горами на востоке. Отметки рельефа редко превышают 150 м. На равнине расположено множество небольших озер. Считают, что они представляют собой заполненные водой впадины, которые образовались вследствие проседания, вызванного растворением соли на глубине. Эти мелкие прогибы имеют ширину до 200 м и глубину до 10 м. Проседание и обрушение в этом районе регулярно отмечались начиная с 1533 г., когда произошло проседание в Комбермире. Соляные пласты впервые были открыты здесь в 1670 г. (в ходе поисков угля), и с тех пор стала развиваться соледобывающая промышленность, причем основные предприятия концентрировались вокруг городов Нортуйч и Уинсфорд.

Поверхностные слои в районе города Нортуйч представлены песками и плейстоценовыми валунными глинами ледникового или

межледникового происхождения. Этот слой неконсолидированных осадков по мощности составляет в среднем около 15 м и полностью скрывает подстилающие кейперские мергели триасового возраста. Кейперский ярус мощностью около 1200 м сложен главным образом рыхлыми алевролитами, глинами, сланцами, песчаниками. Соль в этих породах приурочена к двум горизонтам, известным как Соленосные слои. Мощность верхних Соленосных слоев составляет более 300 м, а нижних — в среднем 200 м. Вся толща триасовых пород образует пологую синклиналию складку, погруженную к югу. Поскольку соль легко растворяется, Соленосные слои не обнаружены в зоне грунтовых вод непосредственно под плейстоценовым покрытием, здесь соль вымыта вплоть до глубины 75—140 м. Последующее обрушение этих отложений вызывает образование просадочных озер.

Все случаи проседания на Чеширской равнине непосредственно связаны с растворением пластов соли. Начиная с последнего отступления ледника, которое произошло примерно 10 000 лет назад, грунтовые воды текли по соляным пластам и выходили на поверхность в виде мощных соляных источников. Эти источники использовались для добычи соли еще со времен, предшествовавших Римской империи, однако в XVII веке с внедрением откачки рассолов они пересохли. Добыча соли из недр началась в 1682 г. Были вырыты, главным образом в XVIII и XIX столетиях, сотни небольших шахт. Эти шахты имели такую конструкцию, что их надо было бросать после совсем короткого периода эксплуатации. При этом для поддержки кровли нередко оставляли не более 10 % соли, что было явно недостаточно и делало обрушение неизбежным. В XVII веке добычу вели и так называемым «диким способом», т. е. выкачиванием рассола — грунтовых вод, насыщенных солью. Вскоре было выяснено, что наиболее продуктивными оказались те скважины, которые вошли в природные потоки рассола, в кровлю соляных пластов вдоль линии проседания. Еще более богатой оказалась так называемая «вторичная добыча», которую стали практиковать с середины XIX века. Она заключается в откачке рассола из затопленных заброшенных выработок. Но, будучи очень выгодным для промышленников, этот метод вызывает быстрое разрушение тех немногих соляных целиков, которые были оставлены в шахте для поддержки кровли, что приводит к обрушению шахт.

Эти дешевые, но опасные методы добычи соли в настоящее время вытеснены более современными. Начиная с 1930 г. проводится контролируемая откачка рассола. Пресную воду нагнетают в сухую (и потому водонепроницаемую) каменную соль и затем откачивают образовавшийся рассол. Размер полости тщательно контролируется, утечка воды минимизируется продуманной системой расположения скважин. Когда полость достигает максимального допустимого размера, ее заполняют твердой пустой породой, например известковыми отходами близлежащих хими-

ческих предприятий. Максимальное количество извлекаемой соли составляет всего 25 %, поэтому опасности проседания нет. Обрушений не бывает и в том случае, если при забойной добыче оставляют в качестве целиков по крайней мере 30 % соли, как это делается, например, с 1928 г. в коях Медоубэнк близ Уинсфорда.

Не удивительно, что бесконтрольная разработка, проводившаяся в основном с 1780 по 1930 г., привела к наиболее обширным проседаниям и обрушениям. Отдельные шахты почти всегда были небольшими, и каждая из них действовала до тех пор, пока кровля не начинала проваливаться. Затем шахту оставляли, вскоре она заполнялась водой, которая подтачивала соляные столбы, что приводило к обрушению пород кровли и к проседанию поверхности земли над шахтой. Воронка обрушения в свою очередь заполнялась водой, что создавало дополнительную опасность для соседних шахт.

Самое позднее крупное проседание соляной разработки произошло в 1928 г. и повлекло за собой обрушение шахты Аделаида-Майн — последней действовавшей шахты в Нортуиче. Озера, образовавшиеся во впадинах проседания, называются в этой местности «провалами». Они являются непосредственным результатом неконтролируемой добычи. Провал Уиттон, образовавшийся в 90-х годах XVIII века в Нортуиче, и провалы Верхний и Нижний, появившиеся в 20-х годах XIX века в Уинсфорде, были самыми большими; площадь каждого из них более 4000 м². Низкий рельеф местности способствовал их непрерывному расширению по мере откачки рассола. Особенные затруднения причинял провал Уиттон, поскольку он образовался в центре главного промышленного района того времени.

Подобные озера могут развиваться даже в нескольких километрах от места откачки. При этом максимальное растворение соли, очевидно, происходит там, где пресная вода впервые попадает в соляные пласты. Примером такого «отдаленного проседания» является процесс в районе Биллингс-Грин, где начиная с 1900 г. десятки гектаров сельскохозяйственных земель подверглись проседанию и затоплению; сильно пострадали и транспортные пути.

Проседание грунтов деформирует дренажные системы на соляных месторождениях и заставляет постоянно их ремонтировать. Проседанием было вызвано и обрушение набережной канала в Нортуиче 21 июля 1907 г.; при этом канал полностью пересох и многие баржи остались на мели. Железнодорожная линия между городами Кру и Ливерпуль была проложена в Уинсфорде в 1866 г. на уровне грунта, однако непрерывные оседания и соответствующее регулирование положения рельсов привели к тому, что к 1882 г. линия оказалась на насыпи высотой 9,2 м.

Во второй половине XIX века был сильно разрушен Данкерк — пригород Нортуича. Данкерк в то время являлся центром разработки соляных месторождений и откачки рассола.

К 1830 г. провал Уиттон уже вполне оформился и в него впадал ручей Уинчем. Дома, дороги, каналы и соляные выработки продолжали непрестанно разрушаться, и в 1880 г. эту местность описывали так: «Одни дома нависают над улицей на два фута, другие наклонены в сторону соседних домов и опрокидывают их. Участок длиной 1000 футов и такой же ширины быстро опустился на глубину 40 или 50 футов в средней своей части. Почти 400 домов и прочих сооружений общей стоимостью свыше 100 000 фунтов стерлингов более или менее серьезно повреждены в результате проседания грунта. Район катастроф с каждым годом разрастается».

Типичным примером проседания является пропасть Плэттс-Хилл на северной стороне Данкерка. Первый признак приближающейся катастрофы появился здесь 9 декабря 1892 г., когда уровень рассола в шахте Уиннингтон за ночь поднялся на 9 м и в течение следующих двух суток продолжал быстро возрастать. Очевидно, под землей происходили какие-то большие изменения. Было зарегистрировано дальнейшее повышение уровня рассола, а затем 26 мая 1893 г. вблизи местечка Уинчем-Роуд произошло проседание участка $27,5 \times 4,6$ м. Через 17 дней пропасть, развившаяся в результате проседания и известная теперь под названием Плэттс-Хилл, имела глубину 40,3 м и была затоплена. К осени 1894 г. пропасть еще больше увеличилась, по ее крутым стенкам сползал грунт, в провал продолжала поступать вода. Земля вокруг провала растрескалась, что вызвало повреждение близлежащих зданий. 28 июля 1896 г. пропасть Плэттс-Хилл была измерена; оказалось, что ее диаметр составляет 87 м, а максимальная глубина 50,3 м; пропасть все еще росла. Повреждения дорог, зданий и соляных выработок в окрестности продолжались до осени 1897 г., когда провал постепенно перестал расширяться и стабилизировался.

Не таким типичным, но имеющим в основном то же происхождение и гораздо более ярким было Великое проседание, случившееся в Данкерке 6 декабря 1880 г. В 6 ч утра местные жители были разбужены сильным грохотом. Участок земли около 0,5 км в поперечнике начал трястись, то поднимаясь, то опускаясь. Из трещин в земле вырывался воздух. Наиболее впечатляющим это зрелище было у озера Эштонс-Олд-Рок, где струи грязевых фонтанов били вверх почти на 4 м. Очевидно, все эти явления были следствием массовых обрушений старых шахт и прорыва воды. Источник ее был впоследствии обнаружен: поперек течения ручья Уинчем образовалась громадная трещина, через которую вся вода ручья ушла под землю. В 9 ч на дне ручья возникла еще одна трещина, которая повредила часть близлежащих соляных выработок. В низовьях же ручья Уинчем направление течения сменилось на обратное, это привело к частичному осушению довольно большого озера.

Кроме того, значительная часть вод реки Уивер устремилась в пропасть в земле. Народ собрался посмотреть, как от берега

отваливаются куски и исчезают в пучине. В 4 ч дня в соседнем водоеме раздался сильный взрыв, и толпа бросилась врассыпную, ибо из-под земли забила струя грязи и воды на 9 м вверх. Очевидно, произошло еще одно обрушение, которое замедлило развитие первого, блокировав какой-то подземный канал. Водоворот ослабел. Часом позже на месте соляных разработок рухнула высокая труба, так как площадь проседания расширялась. В 6 ч вечера около скважины неожиданно осел кусок грунта диаметром 150 м, глубокие ямы проглотили две печи для обжига кирпича и несколько строений. На следующий день все уже было спокойно.

Можно заключить, что естественное растворение соли и последующее проседание в Чeshire всегда будут создавать трудности, пусть даже относительно небольшие. Кое-что можно предусмотреть, например, где будет происходить естественное проседание, поскольку многие водные потоки в соляных пластах уже установились, а максимальное растворение наблюдается там, где пресная вода впервые проникает в соляной пласт. Многие соляные потоки текут вдоль простирания пластов к местам выхода на поверхность источников, и их движение может направляться структурой пластов каменной соли и существующими разломами. Там, где растворенные соляные пласты перекрываются плейстоценовыми песками, проседание грунта однородное и слабое; в местах же, где перекрывающими породами являются более твердые мергели, обрушения происходят довольно редко, однако они бывают более значительными, поскольку мергелевые пласты имеют ограниченную несущую способность.

Старые методы добычи, имевшие губительные последствия в районе Нортвич, сейчас не применяются, поскольку нет возможности сделать их безопасными. Естественным растворением сейчас добывается в Чeshire менее 10 % соли, и в будущем эта доля будет сокращаться. Комиссия по ликвидации проседания эффективно борется с порчей земли и повреждением строений, связанными с добычей соли. Образованная в 1891 г., эта комиссия получила достаточные полномочия только в 1952 г. В ее функции входят также консультации строительных предприятий по вопросам обвалов грунта и мерам предосторожности против этой опасности. Приятно отметить, что деятельность комиссии сокращается, поскольку человеческих жертв нет уже с 1939 г., а способы добычи не вызывают опасного проседания. Сейчас соль разрабатывается безопасным путем. Уроки бесконтрольной добычи были усвоены.

Проседание в неконсолидированных осадках

Уплотнение — это естественный процесс, при котором осадки уменьшаются по объему, что чаще всего происходит вследствие давления перекрывающих осадочных слоев. Большинство оса-

дочных пород отлагается в воде, и уплотнение — это часть процесса превращения их в твердую породу. Следует отметить, что геологи называют это уменьшение первоначального объема уплотнением, тогда как инженеры-строители называют его консолидацией. Отсюда и происходит термин «неконсолидированные осадки», обозначающий рыхлые, крошащиеся и еще не уплотненные породы. Для инженеров термин «уплотнение» относится к искусственным методам, таким как трамбовка или вибрация, вызывающим сокращение объема, называемое ими консолидацией. В последующих разделах термин «уплотнение» будет использоваться в геологическом смысле этого слова.

Экстремальный случай уплотнения касается породы растительного происхождения — торфа. Определить уплотнение торфа сложно, так как этот процесс может продолжаться миллионы лет, до тех пор пока торф в конце концов не превратится в уголь. Можно считать, что торф уплотняется более чем в 10 раз относительно своего первоначального объема. Большая часть этого сокращения связана с удалением воды, что лежит в основе уплотнения большинства осадков. Следовательно, уплотнение торфа может сильно зависеть от деятельности человека. Район Фенланд к югу от залива Уош в восточной Англии являет собой классический пример уплотнения торфа и проседания, связанного с осушением (поскольку торфяники создают очень плодородную землю). В 1848 г. в лежащий ниже торфа слой была поставлена железная труба, по положению которой можно судить о погружении поверхностных слоев. К 1932 г. земля осела более чем на 2,5 м, а мощность торфяного слоя сократилась почти на 4,5 м. Уплотнение на 56 % произошло менее чем за 100 лет. В 1848 г. нижние слои торфа уже были значительно уплотнены под влиянием веса перекрывающих пород, уплотнение продолжается и в настоящее время.

Если из торфа удалена вода, то идет дальнейшее сокращение объема, связанное с потерей материала при окислении. В маломощных слоях торфа это может в конце концов привести к непригодности их для сельскохозяйственного использования из-за недостаточной мощности. В США есть примеры проседания торфа, особенно на Флоридской низменности. Здесь уровень грунта при культивации падает примерно на 30 см за 10 лет. При этом участки максимального проседания примыкают к осушительным каналам. Дельта реки Сакраменто в Калифорнии представляет собой обширный торфяной район, который осушался в сельскохозяйственных целях. Вследствие этого местность опустилась ниже уровня моря, и при возникновении проломов в искусственных речных дамбах происходят грандиозные наводнения.

Торф является не единственным материалом, который так сильно уплотняется. Голландские инженеры при осушении земель, ранее покрытых морем, обнаружили, что глины уплотнились на 25—50 % в зависимости от размера зерен и содержания

алеврита. Глины по сравнению с торфом сокращаются в объеме в меньшей степени, кроме того, это не связано с химическими изменениями. Поэтому последствия процесса легче предсказать. Собор Темпл в городе Бристоль (Англия) был построен в XIV—XV веках, когда геологические условия установки фундамента еще были неизвестны. Возведенный на влажном грунте аллювия реки Эйвон, он имел шансы устоять. Сейчас башня собора отклонена на 1 м 22 см от первоначального положения, но все еще стоит. В более просвещенные времена, т. е. недавно, в городе Ноттингем (Англия) было построено промышленное предприятие на пологом с геологической точки зрения месте — на аллювии реки Трент. Были приняты во внимание и учтены уплотнение и просадка, и сооруженные заводские корпуса осели с очень небольшими деформациями. Зато возникла дополнительная проблема — наклон флигелей, расположенных в сфере оседания, вызванного большими зданиями.

Можно рассмотреть еще случай со строительством зернового элеватора в центральной Канаде между 1911 и 1913 г. Он был возведен на тонкозернистых алевритистых глинах озерно-ледникового происхождения. Бетонный фундамент на ростверке размещался в котловине глубиной 3,5 м. Испытания показали, что глина на этой глубине может выдержать необходимую нагрузку. Но когда в октябре 1913 г. впервые был засыпан зерновой силос, элеватор сразу осел на 30 см и в течение 24 ч отклонился на 26° от вертикали. К счастью, бетонная конструкция не была сильно повреждена. Впоследствии обнаружилось, что под верхними достаточно прочными слоями глины на глубине около 10 м залежали более сырые и гораздо менее надежные породы. Именно эти породы не были проверены заранее и осели под нагрузкой. Потом элеватор был выпрямлен, а его фундамент помещен на глубину 16 м, где подстилающей породой служил твердый песчаник. Элеватор функционирует до сих пор.

Дельты являются районами активного осадконакопления, где проседание происходит не только в результате уплотнения самих осадков, но и вследствие других причин. Дельта реки Миссисипи в Соединенных Штатах активно изучалась, было рассчитано, что уплотнение осадков обуславливает проседание в среднем на 9 см за 100 лет. Кроме уплотнения имеет место опускание пород земной коры, связанное с нагрузкой дельтовыми осадками, оно составляет 2 см за 100 лет. Одновременно происходит повсеместное повышение уровня моря на 9,8 см за 100 лет, которое затрагивает и дельту. Амплитуды проседания приведены усредненные, и если учитывать местные вариации, зависящие от типа осадков, то перспективы положения уровня дельтовой области кажутся весьма неясными. Город Бэйлайз на Луизианской стороне дельты был оставлен жителями в 1888 г. во время эпидемии лихорадки, а через 50 лет улицы города оказались на 1 м 22 см покрытыми водой.

Тогда как удаление воды является главной причиной уплотнения одних осадков, привнос воды может вызвать сходные результаты в некоторых других осадках. Лёсс представляет собой золотые алевритовые отложения, которые встречаются в разных концах света. Когда лёсс впервые намокает, он подвергается гидроуплотнению, сопровождающемуся значительным сокращением объема. Если при ирригационных работах в аридных или полуаридных зонах встречается лёсс, возникают сложности. Район, расположенный к западу от города Фресно, в Центральной Калифорнийской долине, испытал обширное проседание вследствие гидроуплотнения. Ирригационные каналы поставляли в этот район воду, земля намокала, и результатом этого стала просадка на 5 м с повреждением зданий, дорог, трубопроводов, скважин и, наконец, самих каналов. В последнее время найдено решение этой проблемы: земля затопляется водой заранее, чтобы гидроуплотнение произошло до того, как канал будет построен.

Справедливо было бы отметить, что слабые просадки не являются помехой для строительства, особенно в тех случаях, когда оно ведется не в прибрежных, а во внутриконтинентальных районах. Однако проседание таит в себе серьезную опасность, если оно неоднородно для одного и того же строения, что может быть обусловлено разной степенью уплотнения грунтовых материалов. Ряд домов, построенных вдоль одной улицы в Ноттингеме (Англия) в начале XX века, — яркий пример этого явления. Через много лет после того как эти дома были возведены, одна из стен последнего дома так сильно осела, что жителям пришлось покинуть его. В поисках причины проседания исследователи обнаружили старинную карту, которая была составлена задолго до строительства осевших домов. На ней был показан небольшой карьер, край которого лежал как раз под поврежденным домом. Позднее карьер, вероятно, был засыпан бытовыми отбросами, и на поверхности от него не осталось никаких следов. Проектировщики домов не сделали ни малейшей попытки исследовать место застройки и даже не проверили имеющиеся документы и карты. Поэтому дом, одна сторона которого стояла на твердой породе, другая — на уплотненном мусоре, был обречен.

Наклонение и повреждение строений может быть обусловлено не только разной степенью уплотненности их основания, как это было в Ноттингеме, но и другими причинами. Любое здание, построенное на мягкой и пластичной глине, находится в неустойчивом равновесии, и даже самое слабое нарушение этого равновесия повлечет за собой осадку здания. Падающая Пизанская башня, привлекающая множество туристов, фигурирует во всех работах по оседанию грунта. Древний город Пиза был построен на широкой плоской равнине, лежащей почти на уровне моря; над городом возвышаются хребты Апеннин. Хотя плоский рельеф и был благоприятен для строительства, однако рыхлые осадки, из которых сложена равнина, а также инженерно-геологические

условия закладки фундамента надо считать крайне неподходящими для любой крупной постройки.

Падающая Пизанская башня представляет собой колокольню, пристроенную к собору. Главное здание собора, сооруженное в XI веке, пострадало от проседания, которое произошло вскоре после того как строительство его было закончено. Однако собор наклонился незначительно, поскольку высота и ширина его различались ненамного. Возведение колокольни началось веком позже, в 1173 г. Через несколько лет, когда были готовы три этажа, башня уже наклонилась так сильно, что архитектор остановил строительство и покинул Пизу. Поскольку вес башни теперь не возрастал, она стабилизировалась и движение прекратилось, так что в 1275 г. другой архитектор решил продолжить строительство, ликвидировав наклон добавлением лишних слоев каменной кладки по осевшей стороне, другими словами, башне был искусственно придан изгиб. Однако башня продолжала наклоняться. Ее постройка закончилась только в 1350 г., после того как за работу взялся третий архитектор и на оседающую стену было добавлено еще несколько слоев кладки. С тех пор башня непрерывно продолжает наклоняться, и на сегодняшний день она отстоит от вертикали более чем на 5 м.

Движение, которому подверглась Пизанская башня, определяется техническим термином «неравномерная осадка». Общая осадка башни составляет около 2 м; чтобы попасть в ее входную дверь, надо спуститься по ступенькам, ведущим вниз. Но 2 м — это средняя цифра. В связи с наклоном южная сторона башни осела примерно на 3 м, а северная — на 1 м. Неодинаковая осадка первоначально была связана с небольшими изменениями в подстилающих отложениях. Когда появился наклон, сдвиг центра тяжести башни создал вращающий здание момент, который возрастает с увеличением наклона. Непосредственно под поверхностью земли залегают слои алевроитов и глини плиоценового возраста. Этот слой мощностью 4,6 м очень пластичен и легко поддается сжатию. Простое лабораторное испытание этих осадков на физическую прочность сразу же позволило бы предсказать их уплотнение и осадку под действием веса башни. Фундамент башни состоял всего-навсего из кольцеобразной каменной кладки диаметром около 18 м, заложенной на 1,5 м ниже уровня земной поверхности. Башня поднимается на 55 м, т. е. ее высота в 3 раза превышает ширину основания. Если такую конструкцию установить на очень мягких алевроите и глине, то наклон неизбежен.

Поверхностный слой под башней постепенно переходит в слой песка, залегающий в интервале между 4,6 и 9,2 м. Песок, в сущности, не поддается сжатию, и он гораздо менее подвижен, чем глино-алевритовые пласты. Хотя песок и не является идеальным фундаментом, он почти наверняка играет положительную роль в сдерживании скорости осадки и сохранении относительно небольшого угла наклона башни. Можно даже предполагать, что 3-метровый

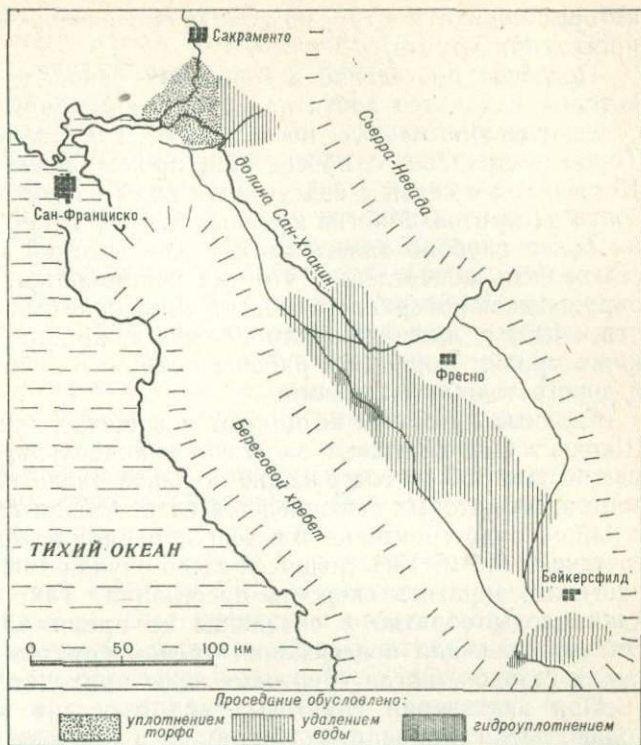
слой глин и алевроитов, залегающий между фундаментом башни и песком, к настоящему времени стал прочнее в связи с осушением при медленном уплотнении под нагрузкой. Этим и объясняется, почему башня все еще стоит вот уже в течение 700 лет. Однако слой песка, залегающий на глубине примерно 5—10 м, содержит тонкие глинистые и алевроитовые зоны, которые становятся мощнее по направлению к югу. Их сильная подверженность сжатию объясняет первоначальный наклон башни. К тому же под слоем песка залегают более мягкая пластичная глина, прослеживающаяся до глубины 40 м, где она подстилается горизонтом плотных песков. Движения в глино-алевритовом, песчаном и глинистом слоях могут начаться в любой момент, и тогда наклон башни должен увеличиться.

Что же ждет знаменитую Пизанскую башню? Она вполне может быть зафиксирована в ее теперешнем положении путем подведения фундаментов и закрепления их на слое песка, лежащем на глубине 39,7 м. Уже было испробовано впрыскивание жидкого цементного раствора в подстилающие осадки, однако это не дало заметных результатов. Надо искать какое-то другое смелое решение, причем необходимо учитывать тот факт, что работать придется под такой слабуравновешенной постройкой. Предложен ряд проектов укрепления башни. При благоприятном стечении обстоятельств они будут успешно проведены в жизнь, в противном случае Пизанская башня сможет продержаться еще примерно столетие.

Проседание при удалении грунтовых жидкостей

Уплотнение рыхлых осадков, ведущее к проседанию грунта, почти невозможно предотвратить, если нагрузка, оказываемая на материал, обуславливается крупным строением. В большинстве случаев такое уплотнение сопровождается удалением воды из пор под давлением. Песок фактически не поддается сжатию, и вода из него вытесняется с трудом. Однако если межзерновая вода откачивается из песка и соседствующих с ним глинисто-алевритовых отложений, то падение гидростатического давления может повлечь за собой значительное уплотнение и последующие сдвиги грунта. Поскольку пески, особенно их несцементированные или слабо консолидированные разновидности, представляют собой высокопродуктивные водоносные горизонты, то грунтовые воды всегда активно откачивались из них. Во многих случаях это сильно влияло на состояние земной поверхности.

В долине Сан-Хоакин в центральной Калифорнии выпадает очень мало осадков. Интенсивное сельское хозяйство в этом районе обязано своим существованием ирригационным водам, большая часть которых откачивалась из осадков, подстилающих долину. Это были пески и грубозернистые алевроиты, мощность которых



Центральная Калифорнийская долина, испытавшая сильное проседание грунта.

местами превышала 600 м. Из этих пород в течение XX века активно извлекались воды, и в результате произошло проседание грунта, затронувшее площадь в несколько сотен квадратных километров, максимальная глубина просадки составила более 8 м. При понижении артезианского напора на 6—9 м грунт оседал на 30 см. Поскольку долина Сан-Хоакин — это район сельскохозяйственных земель, такое опускание, хотя оно и сопровождалось даже образованием трещин в грунте, не повлекло за собой катастрофических последствий. Забавно, что основное повреждение в долине Сан-Хоакин было нанесено ирригационным системам, которые сами явились его причиной. Движение грунта разрушило многие скважины (ремонт скважины обходится до 1 млн. долл. в год), и ирригационные каналы с их очень низкими перепадами постоянно надо было восстанавливать. Чтобы прокладывать каналы через осевшие районы, не затопляя их, необходимо создавать длинные насыпи. Очевидно, единственным способом борьбы с проседанием в долине Сан-Хоакин является прекращение откачки грунтовых вод. Частичная их замена водами,

которые подаются с гор, позволила значительно снизить скорость проседания грунта.

Подобное проседание в городских районах, особенно в тех, которые находятся почти на уровне моря, может иметь гораздо более разрушительные последствия. Так, значительная часть Токио пострадала от проседания, происходившего со скоростью 15 см в год в связи с извлечением воды из подстилающего горизонта алевритов. Многие крупные здания Токио были построены на более глубоко залегающих слоях плотной породы, поэтому создавалось впечатление, что они поднимаются, в то время как окружающая поверхность оседает. Движение было таким сильным, что к 1961 г. площадь около 40 км² на окраине Токио оказалась ниже уровня моря. Эти районы пришлось защищать большими и дорогостоящими дамбами.

Сходные проблемы возникают и в Китае, например в городе Шанхай. Под Шанхаем залегают неконсолидированные осадки мощностью 300 м, содержащие большое число водоносных горизонтов, из которых выкачивается вода. Общая глубина просадки в районе судостроительной верфи за период между 1921 и 1973 г. составила 2,5 м. Участвовавшие здесь случаи затопления вызвали попытки сократить скорость проседания. Так, проводилась закачка воды обратно в скважины во время влажных сезонов. Это делалось для поддержания уровня грунтовых вод в период сухих сезонов, когда грунтовые воды приходится откачивать.

При извлечении грунтовых вод просадке подвергаются не только пески и алевриты. Например, в Лондоне вода интенсивно откачивалась из мела, на котором стоит город, и в результате артезианский напор упал на десятки и даже сотни метров. Падение давления поровых вод в перекрывающих мел глинах Лондон-Клей вызвало проседание около 30 см. К счастью, этого недостаточно, чтобы повлечь за собой значительные последствия.

Проседание района вокруг города Саванна (штат Джорджия) происходит вследствие откачки вод из толщ известняка. Большинство известняков, даже если они трещиноватые и содержат водоносные горизонты, достаточно прочны, чтобы выдержать любую нагрузку. Однако третичные известняки Окала под Саванной являются исключением: они очень пористые, слабо консолидированные и при уменьшении давления поровых вод уплотняются. Очень серьезному проседанию подвергся также район между городами Хьюстон и Галвестон (штат Техас), расположенный западнее Саванны. Начавшись в 1943 г., проседание к 1961 г. местами достигало полутора метров; этот процесс продолжается в настоящее время со скоростью 7,5 см в год.

Проседание чаще всего бывает связано с извлечением воды из песчаных водоносных горизонтов, но иногда оно может быть вызвано откачкой из толщ проницаемых осадков другой жидкости — нефти или каких-либо растворов. Например, город Ниигата в Японии подвергся катастрофическому проседанию и местами

опустился ниже уровня моря вследствие извлечения соляных растворов, содержащих метан. Нефть является второй по значению после воды причиной проседания. Яркий тому пример — опускание в Лос-Анджелесе.

Портовый район Лонг-Бич на юге Лос-Анджелеса расположен непосредственно над месторождениями нефти Уилмингтон, находящимися в частном владении. Из небольшого купола в толще осадков мощностью около 180 м в значительных количествах откачивались как нефть, так и вода. Результатом этого явилось образование чаши проседания эллиптической формы, имевшей в поперечнике почти 10 км и повторявшей очертания лежащей под ней геологической структуры. В центре этой чаши вертикальное опускание за период с 1928 по 1971 г. достигло 9 м. Горизонтальное движение по краям чаши местами составило 3 м. Возмещение убытков, нанесенных городу, превысило 100 млн. долл. Наиболее пострадавшей оказалась морская судовой верфь, большая часть которой сейчас находится ниже уровня моря и окружена высокими бетонными стенами. Эти стены приходится постоянно надстраивать, иначе море зальет верфь.

К 1957 г. ситуация в районе Лонг-Бич стала настолько опасной, что Министерство юстиции США запретило эксплуатацию здесь нефтяных скважин. Был предложен проект, согласно которому следовало закачать миллионы литров воды обратно в грунт по 200 скважинам. Эта процедура должна была не только восстановить давление воды в осадках и тем самым прекратить проседание, но и увеличить напор нефти в других, еще используемых скважинах. Действительно, нагнетание воды является стандартным методом повышения продуктивности нефтяного месторождения, хотя в данном случае оно рассматривалось лишь в качестве побочного эффекта. Работы прошли настолько успешно, что к 1963 г. проседание было в значительной степени остановлено, а в некоторых местах даже скомпенсировано. Надо отметить, что положительный эффект был достигнут в относительно простой ситуации, вообще же возможность полного восстановления уровня, существовавшего до проседания, ничтожна и требует предусмотрения многих факторов.

К сожалению, закачка воды не разрешает проблемы проседания того типа, который существует и по сей день в городах Венеция и Мехико.

Венеции — всемирно известному городу, представляющему собой настоящее произведение искусства, — угрожает реальная опасность разрушения, поскольку она постоянно опускается ниже уровня моря. Венеция была заложена более 1300 лет назад. Город находится почти в центре большой лагуны, длина которой 56 км, ширина 10 км. Лагуна отделена от Адриатического моря длинным рядом песчаных валов, которые еще в XVIII веке были укреплены дамбами. При этом были оставлены три пролива, открывающиеся в лагуну.

Венеция давно страдает от проседания. В 1902 г. обрушилась, превратившись в груды камней, колокольня собора Святого Марка. Столь полному разрушению подверглись немногие здания, но постепенно опускается большинство строений, поскольку весь город оседает. Примерно 70 % площади города в настоящее время находится на высоте чуть больше метра над средним уровнем моря, и эта территория часто подвергается затоплению. Наводнения, называемые здесь «аква альта» («высокая вода»), обусловлены совместными действиями ветра, прилива, резких колебаний уровня Адриатического моря, осадков и пониженного атмосферного давления. Самая ужасная «аква альта» отмечалась в 1966 г., когда ущерб, нанесенный городу, был оценен в 30 млн. фунтов стерлингов. Наводнения становятся все более частыми. Если на рубеже XIX и XX веков они происходили в среднем каждые пять лет, то к 1930 г. стали повторяться ежегодно, а начиная с 1960 г. — даже трижды в год. Затопление площади Святого Марка сейчас уже надо считать событием предпрешенным.

Здания Венеции были построены на деревянных сваях, погруженных в дно мелководных частей лагуны. Отложения, подстилающие лагуну, представляют собой неконсолидированные материалы четвертичного возраста мощностью около 800 м, под которыми залегают еще менее плотные осадки, датированные плиоценом. Четвертичные отложения примерно на 50 % состоят из песков, на 35 % — из алевроитов и на 15 % — из алевроитовых глин. При таком фундаменте в морских дельтовых условиях следует ожидать проседания. В Венеции же есть множество предпосылок для этого.

Археологические исследования показали, что проседание лагунной зоны в доисторические времена местами достигало 6 м, а с древнеримских времен составило 2—3 м. Таким образом, среднее проседание в древности равнялось примерно 1 см в год — такова скорость, ожидаемая в любом дельтовом районе, где идет аккумуляция осадков. Главная дельта реки По расположена несколько южнее Венеции, и осадконакопление в этом районе вызывает изгибание слоев коренных пород под нагрузкой аккумулярованных осадков. Поскольку четвертичные отложения мощностью около 800 м имеют мелководное происхождение, опускание фундамента за этот период составило, по-видимому, также около 800 м. В то же время должно было осуществляться уплотнение осадков, однако лабораторные исследования керн скважин, пробуренных под Венецией, показали, что такое первичное уплотнение существенной роли в проседании города не играет.

В XX веке скорость проседания катастрофически возросла, как показывают следующие данные о среднем опускании в год: 1926—1942 гг. — 0,23 см; 1943—1952 гг. — 0,35 см; 1953—1961 гг. — 0,50 см. Очевидно, появились какие-то новые факторы, и самым главным из них надо считать откачку грунтовых вод. Венеция всегда снабжалась водой, извлекаемой через неглубокие сква-

жины из многочисленных водоносных горизонтов в четвертичных отложениях. Однако с начала нашего века потребность в воде существенно возросла. Начиная с 1930 г. промышленным предприятием в городе Маргера (западнее Венеции) в подстилающих лагуну осадках было пробурено более 7000 скважин. Активная откачка понизила гидростатический напор под Маргерой более чем на 18 м, а под Венецией — более чем на 7,5 м. Наибольшее уплотнение осадков произошло в интервале между глубинами 100 и 300 м, а большинство скважин в Маргере откачивали воду из водоносных горизонтов, залегающих на глубине от 200 до 300 м. К счастью для Венеции, удаление грунтовых вод не привело к слишком сильному уплотнению осадков и проседание составляет в среднем около 1,5 см на каждый метр падения артезианского напора. Для сравнения можно отметить, что в Центральной Калифорнийской долине отмечена скорость опускания в 6 раз больше, а оседание в Мехико составляет 15 см на каждый метр падения артезианского напора.

Имеются и другие факторы, обуславливающие постоянное опускание Венеции. Большую нагрузку на осадки вызвала интенсивная застройка лагунного района, развернувшаяся в XX веке. Кроме того, начиная с 1935 г. из четвертичных отложений, залегающих под дельтой реки По, добывался природный газ, пока в 1955 г. добыча его не была запрещена из-за проседания. Однако недавно было высказано предположение, что извлечение газа вызывало проседание только в районе, расположенном гораздо южнее самой Венеции.

Ко всем известным разнообразным типам проседания суши надо добавить еще повышение уровня моря. Этот процесс, происходящий во всем мире, связан с постепенным таянием полярных льдов вследствие постоянного повышения средней температуры на Земле. Подъем уровня моря эквивалентен опусканию суши на 1,5 см в столетие.

Таким образом, опускание Венеции происходит как в результате естественных процессов, так и вследствие действия гораздо более сильного фактора — извлечения воды. Последнее влияние, безусловно, может быть предотвращено. Однако только гигантское разрушительное наводнение 1966 г. подвигнуло правительство к действиям. В 1973 г. было отпущено более 200 млн. фунтов стерлингов на защитные сооружения. Другим важным результатом действий правительства было запрещение откачивать воды из горизонтов под Маргерой. Был построен акведук, подающий воду из реки Силь, протекающей к северу от города. Благодаря этому гидростатическое давление в осадках, залегающих под Венецией, стало повышаться, а проседание за последние несколько лет значительно сократилось, но оно не остановилось, поскольку природные процессы продолжают развиваться.

Из многих выдвинутых предложений по спасению Венеции выделяются два проекта.

Один из них заключается в том, чтобы установить огромные плавучие плотины в каналах между лагуной и Адриатическим морем. При наводнении эти плотины можно закрепить и тем самым отсрочить повышение уровня воды в городе. Единственным недостатком этого проекта является резкое сокращение приливно-отливной очистки каналов Венеции, что до настоящего времени спасало город от засорения отбросами, которые просто спускаются в каналы. Поэтому в стоимость этого проекта должны входить расходы на сооружение современной очистной системы для всего города. Надо отметить, что этот план направлен на защиту от воды, а не на предотвращение проседания, которое в будущем потребует все более частого закрытия плотин, т. е. возможной изоляции лагуны.

Другой, более смелый, проект предусматривает фактическое приподнятие всего города. В дно лагуны предлагается врыть стену глубиной около 100 м и длиной 13 км, которая полностью окружала бы город. Она должна изолировать водоносные горизонты в песчаных осадках, залегающих непосредственно под городом, от их продолжений под остальной частью лагуны, поскольку песчаные пласты, по существу, горизонтальны и подстилаются водонепроницаемыми глинами. Затем воду следует накачивать обратно в водоносные горизонты, что повысит давление поровых вод. В результате город приподнимется, поскольку осадки снова расширятся, по крайней мере до своего прежнего объема. Правда, могут возникнуть определенные трудности; например, замедление движения грунта при трении о стену может обусловить куполообразное выгибание территории города. Однако этот план все же дает лучшее решение проблемы, чем первый, и опыт Лос-Анджелеса по закачке воды показывает, что такой проект может работать. Если же этого не произойдет, Венеция будет медленно опускаться до тех пор, пока совсем не исчезнет под водами своей знаменитой лагуны.

Город Мехико расположен весьма живописно: он раскинулся в широкой котловине с плоским дном на 2257 м выше уровня моря и окружен горами. Котловина имеет длину более 80 км и среднюю ширину 24 км. Она пересекается множеством небольших речек. Плоская форма дна котловины обусловлена мощным слоем подстилающих осадков, представленных грубозернистыми песками, перекрытыми тонкозернистыми глинами. Геологический разрез этого района имеет следующее строение.

Породы	Глубина от земной поверхности, м
Верхнеплейстоценовые озерные отложения:	
алевриты, пески	0—6
мягкие глины (верхний слой)	6—33,6
грубозернистые цементированные пески	33,6—38,1
мягкие глины (нижний слой) с несколькими прослоями песка	38,1—51,9
Нижнеплейстоценовые отложения:	
пески и галечники	Глубже 51,9

Нижняя пачка песков и галечников прослеживается до глубины 500 м; ее обломочный материал представлен главным образом вулканическими андезитами. Эти отложения являются высокопродуктивным водоносным горизонтом. Залегающие выше две мощные пачки верхнеплейстоценовых глин сходны между собой; они представлены бентонитами, т. е. состоят главным образом из монтмориллонита с небольшой примесью других глинистых минералов, а также глинистых алевритов. Хотя все глинистые минералы имеют некоторую способность удерживать воду благодаря слабым электрическим связям, монтмориллонит проявляет это свойство сильнее всех. При увеличении в тысячи раз под электронным микроскопом можно видеть, что кристаллическая структура монтмориллонита состоит из полых трубочек, похожих на макароны, которые и придают монтмориллониту способность абсорбировать воду.

Верхний слой глины имеет среднюю пористость 88 %, а нижний — около 82 %. Другими словами, 88 % (или 7/8) верхнего слоя мягкой глины — это вода, и только 12 % — твердый минеральный материал. Тот факт, что вода в глинистых минералах связана (хотя и очень слабо), означает, что этот материал представляет собой не просто жидкую грязь, а является очень мягким, пластичным веществом. На такой породе не следовало бы строить большой город. К сожалению, все это стало известно через много лет после того, как город Мехико был построен.

Проседание Мехико впервые было отмечено в XIX веке; в это время как раз была усилена откачка воды из скважин, пройденных в высокопродуктивных песчаных водоносных горизонтах, залегающих ниже 50-метровой отметки. К 1959 г. часть города осела на 4 м, максимальное проседание составило 7,6 м. Скорость опускания в настоящее время заметно увеличилась, поскольку город растет, а следовательно, растет и откачка воды. С 1898 по 1938 г. ежегодное проседание в среднем составляло 4 см, за следующие 10 лет оно увеличилось до 15 см, в период 1948—1952 гг. достигло 30,5 см, а местами даже превысило 60 см. К 1948 г. стало ясно, что причиной проседания Мехико является добыча воды, но еще многие годы после этого существовало более 3000 скважин, поивших растущий город и одновременно подтачивавших его фундамент.

Артезианский напор в главных водоносных горизонтах до выкачивания воды располагался примерно на уровне поверхности грунта, в конце 50-х годов XX века он понизился на 20—30 м. Очевидно, падение гидростатического давления в песках и галечниках произошло очень быстро, но при крайне низкой проницаемости перекрывающих слоев глины вода через них просачивалась очень медленно. Это связывание воды глиной в данном случае имело благоприятные последствия, поскольку оно замедлило общее падение давления и, следовательно, проседание грунта. В результате проседания многие обсадные трубы скважин вышли

на поверхность. Так, одна из скважин, пробуренная до глубины 90 м, была остановлена, причем ее обсадная труба находилась на уровне поверхности земли. К 1954 г. этот район опустился на 6 м, а обсадная труба выступила из грунта на 5,5 м. Это ясно показывает, что почти все проседание было обусловлено уплотнением верхних 90 метров осадков.

К сожалению, выход обсадных труб на земную поверхность — не единственное последствие проседания Мехико. Были повреждены здания, сильно пострадали водопровод и осушительные каналы, особенно в тех местах, где шло неоднородное проседание, вызванное разной нагрузкой. Пожалуй, самым печальным последствием проседания было повреждение великолепного Дворца изящных искусств, находящегося в самом центре города. Строительство дворца началось в 1904 г. и было закончено только в 1934 г. Если фундаментом служила бетонная площадка толщиной 3 м, верхняя часть которой находилась на уровне поверхности земли. Еще до того момента, когда началось строительство, бетонный настил заметно прогнулся посередине и во время возведения здания он все больше проседал, погружаясь в землю. К 1908 г. частично построенное здание опустилось более чем на 1,5 м, а через два года в фундаменте появилась трещина. В 1910 г. была сделана попытка стабилизировать дворец, и в подстилающий слой глины было залито в виде жидкого раствора 70 000 мешков цемента. Однако мелкозернистая структура глины не позволяла раствору распределиться однородно, и вместо цементирования и стабилизации произошло следующее: цементный раствор осел в виде сгустков и сообщил дополнительную нагрузку на глину, что, вероятно, ускорило дальнейшее проседание.

Через 5 лет вокруг дворца были забиты стальные сваи, так как предполагали, что опускание обусловлено боковым смещением глины под влиянием нагрузки. Однако эти меры тоже оказались бесплодными, ведь глина не съехала, а просто уплотнилась вследствие просачивания воды вниз. Несмотря на это строительство продолжалось, и уже возведенный дворец все больше погружался в землю. Сейчас он опустился более чем на 3 м ниже уровня окружающих улиц. Неоднородность проседания обусловлена гигантским весом дворца. Чтобы попасть на его первый этаж, надо спуститься по ступеням, ведущим вниз. Более легкие дверные арки погрузились меньше и поэтому оторвались от главного здания. Проезжие части окружающих дворец улиц растрескались и приобрели наклон по направлению к дворцу.

Подведение соответствующих несущих конструкций, опирающихся на песчаные породы, залегающие на глубине 33,6 м, быстро остановило бы проседание Дворца изящных искусств. Этот инженерный проект вполне осуществим. Забивка глубоких свай применялась при постройке многих современных зданий в городе. Но эти сваи, как и обсадные трубы скважин, со временем начинают выступать над поверхностью земли — по мере того

как продолжается проседание окружающих улиц. Поэтому такой способ не дает в Мехико полного решения проблемы. Необходимо остановить проседание, ликвидировав его причину, а для этого надо сократить откачку вод. В 1952 г. начали подводить воду к городу, извлечение грунтовых вод было остановлено, а на следующий год стали закачивать воду обратно в обезвоженные, ранее водоносные горизонты. В результате к 1974 г. проседание города уменьшилось до 2,5 см в год, что уже вполне приемлемо.

Прекрасным образцом инженерного решения проблемы борьбы с проседанием грунтов является Латиноамериканская башня. Это 43-этажное административное здание, построенное в 1951 г., было установлено на сваях, которые на 34 м погружены в грунт и достигают толщи песчаника. В окружающем здании районе вода из глин не откачивается, и породы поэтому не испытывают дополнительного уплотнения. Латиноамериканская башня расположена всего в одном квартале от Дворца изящных искусств, однако вход в нее соответствует уровню земли.

Проседание и обрушение в кавернозных известняках

Известняк известен тем, что эта порода часто содержит полости. Такие совершенно открытые пустоты представляют реальную опасность для стабильности земной поверхности. Когда слои породы, лежащие над полостью, обрушиваются, это вызывает проседание, обычно резкое — в противоположность медленной осадке, обусловленной проседанием пластичных отложений. С другой стороны, известняк обычно бывает очень прочным (его часто используют как строительный материал), и поэтому он способен образовывать своды даже над довольно большими пустотами (естественные полости могут иметь диаметр до 250 м). Кровля полости характеризуется тенденцией к частичному обрушению, пока не достигнет стабильной куполообразной формы. Большие камеры имеют ответвления и коридоры гораздо меньшего размера. Подземное обрушение даже в непрочных, сильнотрещиноватых известняках обычно происходит локализованно и в небольших масштабах.

Сочетание таких свойств, как прочность известняка, замедленность процессов растворения породы и ограниченный размер большинства полостей, делает обрушение их кровли сравнительно редким событием. В центральной части штата Флорида, где имеются обширные залежи известняка, несколько лет назад произошло обрушение полости. Внезапно, за одну ночь в открытой местности образовалась пропасть с отвесными стенами глубиной 30 м и диаметром около 34 м. Ее появление, вероятно, было обусловлено обрушением малоомощной кровли над полостью довольно значительных размеров. Мел — тонкозернистая разновидность извест-

няковых пород, обладающая малой прочностью. Мел подстилает обширные площади в южной Англии и северной Франции. Во Франции, недалеко от города Труа, в конце 60-х годов в результате обрушения меловых отложений образовался провал глубиной 15 м и диаметром 9 м.

Хотя большинство случаев обрушения известняков имело гораздо меньший масштаб, кавернозные породы представляют потенциальную опасность для построек. В 1956 г. в Пен-Парке города Бристоль (Англия) было предложено построить школу. В местных исторических документах упоминалось о большой пещере с вертикальным входом, который был закрыт веком раньше, после того как в нее свалился и разбился человек. Утверждалось, что кровля пещеры находится на глубине 6 м от поверхности земли. Вход был вскрыт, пещера тщательно осмотрена, и в результате этого обследования решено было выбрать другое место постройки.

Известняк — не единственная порода, содержащая полости. Гипс и каменная соль, как уже отмечалось, тоже могут быть кавернозными, однако они менее прочны и быстрее растворяются, поэтому процесс проседания идет здесь по-иному. Обрушение же в базальтовых лавах сравнимо с проседанием известняка. Лавовые потоки, извергаемые вулканом, состоят из расплавленной породы, которая охлаждается и затвердевает, причем быстрее в своей поверхностной части. В базальтовых лавах еще горячие нижние слои могут вытекать из-под затвердевшей корки, в результате чего образуются полости.

Отличительной чертой лавовых каверн является то, что они почти всегда расположены близко от поверхности, а их маломощная кровля имеет тенденцию к обрушению. Это представляет очевидную опасность в местностях, где дороги и дома построены на вулканогенных отложениях, как, например, в районе Маунт-Худ в Вашингтоне (округ Колумбия) или во многих местах Исландии. В 1970 г. было обнаружено, что главная магистраль, проходящая южнее Рейкьявика, пересекает лавовую пещеру Рауфархолсхеллир. Непрочный базальтовый покров мощностью не более 4 м перекрывает одно из ответвлений пещеры и фактически поддерживает дорогу. Возможность обрушения очевидна, хотя неизвестно, случится ли оно на следующий год или же через 10 лет. Сейчас ведут наблюдения за скоростью обрушения кровли, регулярно проверяя количество обломков, скапливающихся на дне пещеры. Этот способ оценки состояния трещиноватых пород, образующих арку над пещерой, нельзя признать удачным. Дорога же остается пока на своем прежнем месте.

Если обрушение твердых пород, перекрывающих полости, — явление довольно редкое, то проседание и обрушение мягких осадков, залегающих над кавернозными и ячеистыми известняками, случаются часто. Широко распространенные в мире известняковые отложения перекрываются обычно молодыми неконсолидированными осадками, чаще всего аллювием речного проис-

хождения или ледниковой глиной. Оба эти типа осадков являются в основном полупроницаемыми, так что вода просачивается через них в залегающий ниже известняк. Там, где известняк трещиноватый, его растворение приводит к образованию в нем открытых щелей. Вода вымывает более мелкие частицы из перекрывающих осадков и уносит его вниз через эти щели; полости в известняке оказываются перекрытыми неустойчивым и несцементированным грубозернистым материалом. В конце концов этот материал обрушивается в полости в известняке и на земной поверхности образуется коническая впадина, называемая карстовой воронкой. Карстовые воронки могут появиться также в результате длительного растворения пород, в процессе которого поверхность известняка приобретает причудливую форму. Когда такая поверхность покрывается более поздними отложениями, под их гладким профилем могут скрываться ячейки и карманы, промытые в толще подстилающего известняка. Процесс выщелачивания способствует формированию депрессий проседания, которые часто сопровождаются обрушением карстовых воронок.

Долины проседания и карстовые воронки — обычное природное явление в местностях, где развиты известняки. Известняковые пещеры, лежащие ниже, зачастую имеют выход на земную поверхность. В 1944 г. на горе Айрбай-Фелл в Пенниннах обрушился 3-метровый слой валунной глины и в известняке открылась полость диаметром 7,5 м и глубиной 12 м с коридором. На плато Салем в штате Миссури при обрушении возникла пропасть, и хотя ее диаметр составлял 13 м, а глубина 20 м, вся она сформировалась в осадках, залегающих над известняком. В 1966 г. в толще Сикамор-Крик (тоже в Миссури), образовалась еще одна карстовая воронка. Ее глубина составляла 18 м, а диаметр 8 м. Двумя годами позже подобная пропасть, прорезавшая не только рыхлые приповерхностные отложения, но и сам известняк, разверзлась во время сильной бури в местечке Мэйноу-Фарм (Мендип-Хиллс). К счастью, ни один из этих четырех случаев непредсказуемого естественного обрушения не причинил никаких повреждений.

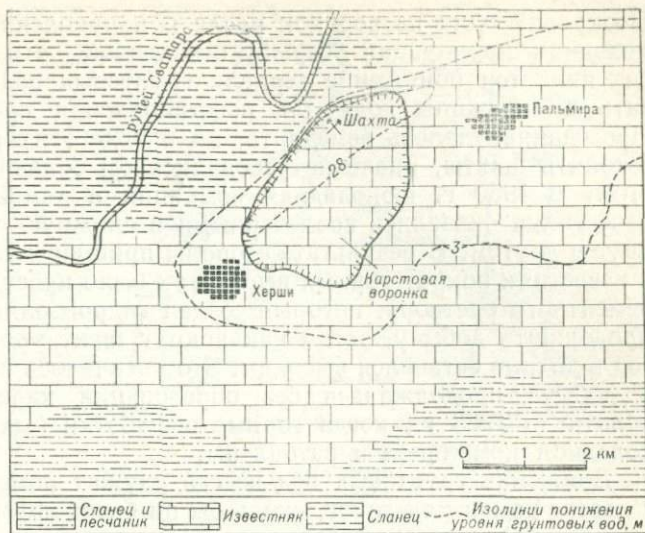
Для прогнозирования карстовых обрушений необходимо знать расположение соответствующих пещер. Там, где пещеры имеют открытые выходы, возможно их непосредственное исследование. Пещеры можно обнаружить также при помощи частой сети скважин, однако это чрезвычайно дорогостоящая операция. К сожалению, предсказать локализацию пещер, исходя из общих геологических соображений, обычно не удается. Были испробованы и дистанционные методы, но полученные результаты не дали однозначного ответа. Гравитационными методами можно обнаружить очень большие камеры либо погребенные карстовые воронки, однако уточнить детали при этом не удается. Сейсмические методы непригодны для четкого определения локализации пещеры, однако с их помощью можно проследить форму дна за-

полненных карстовых воронок. Электрическим зондированием можно успешно выявить зоны сильно трещиноватого известняка и даже точно указать положение отдельных коридоров пещеры, как это было сделано в Пен-Парке (Бристоль).

Обычная аэрофотосъемка имеет весьма ограниченное применение при установлении положения пещер и при поисках погребенных карстовых воронок, однако методами инфракрасной фотографии и микроволновой радиометрии (этот метод особенно эффективен) можно выявить колебания температуры грунта и изменения распределения воды, что в свою очередь бывает связано с конфигурацией пещеры. Итак, обнаружение пещер и предсказание обрушений — трудные задачи, и это вдвойне неприятно в наше время, когда обрушения участились вследствие нарушения природного равновесия деятельностью человека. Строительство дорог, земляные работы при возведении зданий, ирригация, откачка воды — все это вызывает изменения в характере движения природных вод, а толщи неконсолидированных осадков, перекрывающих кавернозные известняки, особенно чувствительны к такого рода изменениям.

В окрестностях города Бирмингем в штате Алабама залегает мощная толща доломитовых известняков, перекрытая глинами мощностью от 0,5 до 20 м, образовавшимися в результате эрозии верхней части известняковой толщи. Карстовые воронки в этом районе были почти неизвестны, пока в конце 50-х годов нашего века в результате дренажа двух карьеров не понизился местный уровень грунтовых вод. В 60-х годах произошли многочисленные обрушения. Были повреждены заводы, дороги, коммуникации. На одной из строек вскоре после закладки фундамента совершенно неожиданно образовалась карстовая воронка. Был также причинен ущерб железной дороге, а вдоль шоссе, соединяющего штат с соседними районами, появилось 150 карстовых воронок разного размера. Остановить бедствие можно было, только повысив уровень грунтовых вод (с последующим затоплением карьеров) или создав чрезвычайно дорогостоящую эффективную дренажную систему.

Еще более трагичный случай произошел с дорожным мостом у источников Тарпон-Спрингс в соседнем штате Флорида. Январской ночью 1969 г. под мостом образовалась карстовая воронка. Три опоры моста обрушились настолько быстро, что транспорт не успели остановить и один человек утонул. Невдалеке от источников Тарпон-Спрингс, на участке Вики-Вочи, в сентябре 1974 г. разверзлась карстовая воронка, поглотившая буровую вышку. И на этом участке глины покрывали трещиноватый известняк. Оказалось, что как только глубина бурения достигла 6 м, бур вошел в трещину, и неожиданный напор воды послужил началом обвала глины. Земля грохотала и трещала, и буровой бригаде пришлось спасаться бегством. Когда появилась воронка, вышка, смонтированная на грузовике, провалилась в нее; следом исчез



Район в окрестностях Херши (штат Пенсильвания), где дренаж известняков вызвал образование карстовой воронки.

и второй автомобиль, на котором были цистерна для воды, насосы и инструменты; в провал упало даже несколько сосен. За 10 мин оборудование стоимостью 100 000 долл. безвозвратно кануло в пропасть диаметром 45 м и глубиной 23 м, которая почти до краев заполнилась водой.

Долина Херши расположена в Аппалачах, в штате Пенсильвания. Она подстилается круто падающими ордовикскими известняками и ограничивается с боковых сторон сланцами и песчаниками. Большая часть известняка покрыта слоем неконсолидированных осадков и почвы мощностью около 18 м. Город Херши стоит на дне долины. Здесь же расположена большая фабрика по производству шоколада, местоположение которой частично обусловлено наличием мощных водных источников. В 3 км к северо-востоку велись подземные и вскрышные работы по добыче известняка. Когда в 1949 г. горные выработки углубились и было выкачано огромное количество воды, произошло сильное понижение уровня грунтовых вод, который до этого располагался на 9 м ниже дна долины. Результаты не замедлили сказаться. Колодцы пересохли, источники стали ослабевать и в конце концов тоже высохли. Реки иссыкли, и за 5 месяцев в дне долины образовалось 100 карстовых воронок.

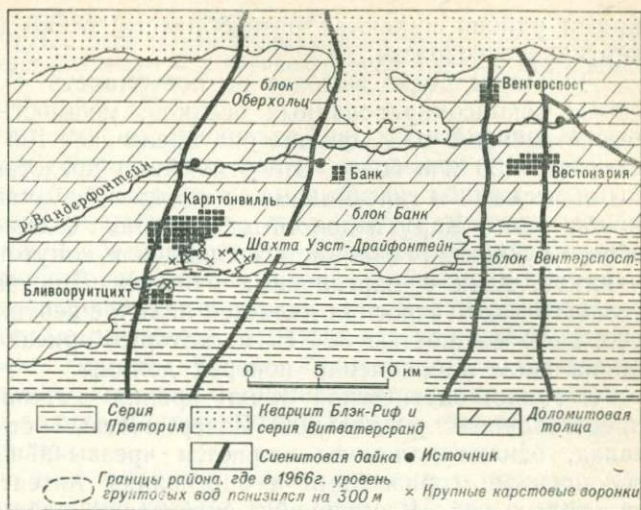
Большинство воронок представляло собой цилиндрические провалы диаметром от 1,5 до 6 м и глубиной около 8 м. Мосты, здания и дороги были разрушены или повреждены, хотя, к счастью, человеческих потерь не было. В основном карстовые воронки появились там, где уровень грунтовых вод упал на 15 м и более.

Поскольку одна из воронок росла в направлении фабрики, шоколадная корпорация Херши, осознавшая, что причиной всех бед является понижение зеркала грунтовых вод, начала нагнетать в скважины воду для восстановления прежнего уровня. Проседание удалось замедлить, но в ходе этих работ пришлось затопить шахты, иначе потребовались бы большие затраты. Поэтому в 1950 г. шоколадная компания и компания по добыче известняка оказались вовлеченными в сложную судебную тяжбу друг с другом. В результате стороны пришли к такому решению: в известняк вокруг горных выработок было проведено нагнетание цементного раствора, который создал гидроизоляцию и позволил продолжить добычу, тогда как вокруг шахт уровень грунтовых вод в долине оставался высоким. Это увенчалось полным успехом, и добыча продолжалась без образования карстовых воронок вплоть до 1953 г., когда горные выработки были куплены шоколадной компанией и затоплены.

Движение грунтовых вод всегда служит помехой при строительстве домов или дорог, сколь бы ни были эффективны дренажные сооружения. Подтверждение этого можно видеть на бесчисленных примерах. В августе 1910 г. три карстовые воронки диаметром более 15 м частично поглотили четыре здания в городе Стонтон (штат Виргиния). В течение 1950 г. на дорогах в центре города Бридженд в Уэльсе возникла серия провалов. В 1965 г. в городе Каслберри (штат Флорида) в результате образования карстовой воронки диаметром 24 м был разрушен один дом, а еще три повреждены. В январе 1964 г. после периода особо сильных дождей карстовая воронка глубиной 30 м разверзлась под домом в городе Фармингтон, штат Нью-Мексико; чтобы ее засыпать, понадобилось 300 грузовиков щебня. Все перечисленные случаи явились следствием обрушения осадков в трещины и полости, развитые в известняках; существование таких камер предсказать затруднительно.

Несколько отличается случай, происшедший в городе Акрон (штат Огайо) в 1969 г. Часть фундамента двухэтажного универсального магазина была установлена на мягкой глине и алевролитах, заполнявших погребенную карстовую воронку. Эта воронка не обрушилась, однако глина настолько уплотнилась и осела, что здание, остальная часть которого стояла на твердом известняке, искривилось и упало; при этом 10 человек было ранено и один убит. Очевидно, при инженерно-геологических изысканиях перед сооружением магазина скважины бурили на недостаточно малых расстояниях друг от друга, поэтому карстовая воронка была пропущена. Впоследствии это здание было восстановлено, но уже на бетонном ростверке.

Из всех известных случаев проседания, вызванных воздействием человека на природу, самое крупное и самое трагическое произошло на золотых приисках в Южной Африке. Широкая долина Вандерфонтейн лежит в низине на востоке района Ранд



Геологическая карта территории золотых приисков в районе Ранд (Южная Африка), где образование катастрофических карстовых воронок является результатом обезвоживания коренных доломитовых пород.

(в окрестностях Йоганнесбурга). Ее поперечные размеры составляют 8—16 км. Добыча золота — одна из главных отраслей промышленности в районе Ранд. В настоящее время эти месторождения дают примерно 4/5 мировой добычи самородного золота, и самые богатые золотые прииски находятся в долине Вандерфонтейн. В долине вокруг приисков живет около 150 000 человек. Хотя первая горная выработка была пройдена здесь только в 1938 г., сейчас на приисках в Карлтонвилле достигнута рекордная глубина — 3,8 км.

Залежи золота встречаются здесь в маломощных пропластках кварцита и концентрируются в нижнедокембрийской осадочной серии Витватерсранд, представленной главным образом кварцитами и сланцами. Основные золотоносные рудные тела залегают на глубине 900 м. Они несогласно перекрываются верхнедокембрийскими породами, которые начинаются маломощным горизонтом кварцитов Блэк-Риф; выше залегает доломитовая толща мощностью до 1200 м, сложенная массивными доломитовыми известняками с прослоями кремнистых сланцев. Затем следуют сланцы серии Претория, кварциты и лавы. Все эти отложения падают на юг под углом 6—12° и выходят на поверхность, ориентируясь параллельно долине. Доломиты подстилают большую часть долины, породы серии Претория обнажаются южнее (на холмах), а кварциты Блэк-Риф наблюдаются севернее. Поверх всех этих слоев залегают песчаники, сланцы и каменные угли серии Кару, которые большей частью эродированы и присутствуют в виде отдельных островков. Наиболее молодыми отложе-

ниями района являются разнообразные пески и галечники четвертичного возраста.

Доломиты редко выходят на поверхность, будучи перекрыты слоем неконсолидированных осадков, мощность которых редко бывает меньше 10 м, обычно она превышает 100 м, а местами составляет 150 м и более. Эти отложения представлены четвертичными песками и галечниками, а также продуктами выветривания пород серии Кару и доломитовой толщи, содержащими главным образом обломки кремнистых сланцев и сопутствующих им песчаников, глин и марганцевых окислов. Другой важной чертой геологического строения является наличие вертикальных сиенитовых даек мощностью 30—60 м, которые ориентированы в меридиональном направлении поперек долины.

С гидрогеологической точки зрения долина Вандерфонтейн представляется уникальной. Поверхностный сток направлен на запад, однако доломиты являются чрезвычайно проницаемыми водоносными горизонтами и определяют интенсивное движение грунтовых вод. Кососекущие сиенитовые дайки разбивают доломитовую толщу на независимые в гидрогеологическом отношении блоки. Грунтовые воды накапливаются внутри каждого из этих блоков и выходят на земную поверхность вдоль границ даек в виде источников, называемых в этой местности «глазками».

Огромные количества воды, скапливающиеся в доломитах, постоянно затрудняли добычу золота из подстилающих толщ. В течение многих лет в рудниках велись работы по откачке, чтобы поддерживать стабильный уровень поступающих вод. Но с 50-х годов перешли к полному обезвоживанию доломитов, т. е. к выкачиванию из них всей воды. Водонепроницаемость сиенитовых даек позволяет независимо обезвоживать каждый блок пород. За время этих работ произошли следующие события.

1955 г. — начато обезвоживание блока Вентерспост.

1957 г. — в блоке Вентерспост стали появляться карстовые воронки; за последующие 4 года их образовывалось все больше и больше.

1960 г. — начато обезвоживание блока Оберхольц; за короткое время родник Оберхольц пересох и начали появляться карстовые воронки.

1962 г. — образовалась воронка с вертикальными стенками диаметром 55 м и глубиной 30 м, поглотившая дробильную фабрику на прииске Уэст-Драйфонтейн, что повлекло за собой 29 смертных случаев.

1963 г. — медленное проседание грунта на протяжении года привело к опусканию на 6 м дна карстовой воронки в Карлтонвилле, известной под названием «депрессия Шутте», что повлекло за собой полное разрушение одного дома.

1964 г. — среди ночи в деревне Блювооруйтсхт разверзлась карстовая воронка диаметром 60 м и глубиной 30 м, в которую провалился жилой дом, при этом погибла семья из пяти человек; продолжающееся обрушение стенок провала уничтожило еще три дома.

1966 г. — самая большая карстовая воронка (диаметр 122 м, глубина 51,9 м) образовалась около города Карлтонвилле; жертв не было.

1967 г. — карстовая воронка появилась на школьной спортплощадке в городе Вестонария.

1968 г. — на прииск Уэст-Драйфонтейн внезапно хлынул поток воды, вырвавшийся из блока Банк.

1969 г. — начато обезвоживание блока Банк.

1972 г. — жители села Банк эвакуированы, а село брошено, поскольку возникло множество карстовых воронок и крупных трещин в грунте вдоль краев зон проседания.

В общей сложности за несколько лет образовались сотни карстовых воронок. Хотя в этом районе и отмечен ряд древних проявлений природных карстовых процессов, однако события последних лет ясно указывают на связь между формированием карстовых воронок и обезвоживанием приисков. В большинстве случаев обрушение непосредственно связано с понижением уровня грунтовых вод по мере откачки воды из шахт, а периодическое поступление в горные выработки илистых вод усиливало деформацию поверхности грунтов. Кроме образовавшихся естественным путем карстовых воронок, которые существовали до обезвоживания шахт, в долине Вандерфонтейн имеется еще четыре различных типа воронок.

Широкие и мелкие воронки, развивающиеся в течение нескольких лет, составляют первый тип. Примером этого типа является депрессия Шутте. Общее погружение грунта может достигать 6 м и более, но поскольку оно происходит медленно, повреждения строений почти не бывает (исключение составляют дома на краю впадины, где имеется тенденция к образованию трещин). Этот тип проседания не затрагивает доломитовую толщу; он обусловлен только уплотнением глины и перекрывающих ее неконсолидированных осадков. Поэтому такое проседание обычно происходит там, где широкие и глубокие депрессии размещаются на поверхности раздела между погребенными осадками и известняком. Само уплотнение осадков обусловлено падением давления воды в связи с дренированием. Очевидно, при этом имеется некоторая связь с образованием трещин в доломитовой толще. Нет сомнения в том, что громадная карстовая воронка, появившаяся в 1966 г. в Карлтонвилле, расположена у края четко выраженной линейной депрессии.

Случаи крупного проседания грунта с последующим обрушением также связаны с формой поверхности раздела между доломитом и осадками. Эти опускания обусловлены вымыванием осадков вниз сквозь трещины в доломите, поскольку направленный вниз сток усиливается благодаря понижению уровня грунтовых вод. Когда нижние слои осадков вымываются, то верхние остаются в виде сводов над образовавшимися пустотами. Однако эти своды недолговечны. Именно их обрушение и дает карстовые воронки с вертикальными стенками. Небольшие воронки связаны с отдельными трещинами в доломите, а восемь огромных карстовых воронок, развившихся на площади блока Оберхольц, вероятно, образовались над погребенной поверхностью доломита, которая в результате эрозии приобрела значительные неровности рельефа. Эти большие карстовые воронки наблюдаются там, где глубокие узкие долины врезаются в погребенную поверхность известня-

ковых пород. Они также могут образовываться вдоль склонов широких погребенных долин, как, например, это было в Карлтонвилле. Такие карстовые воронки тоже связаны с падением уровня грунтовых вод; так, восемь больших воронок возникли вслед за понижением зеркала грунтовых вод на 150 м. Небольшие воронки этого типа образуются там, где уровень воды упал на 15 м и более.

Образование третьего типа карстовых воронок начинается с формирования воронки естественного происхождения, которая затем заполняется обломками горных пород. Повторное обрушение вызывается понижением уровня грунтовых вод. Такое двухфазное проседание может происходить во многих случаях. Оно проявляется при обрушении карстовых воронок с четвертичным заполнением в осадках Кару, которые, как ранее считалось, не имеют тенденции к образованию карстовых воронок в настоящее время. К этому же типу принадлежат провалы, возникшие на спортплощадке в Вестонарии. К несколько иному типу относятся небольшие карстовые воронки, появляющиеся вокруг домов и дорог вследствие дренирования, не связанного с обезвоживанием шахт.

Причины проседания в долине Вандерфонтейн были достаточно ясны, но тем не менее работы по обезвоживанию все-таки продолжались, будучи предприняты по экономическим соображениям, которые диктуются характером золотодобывающей промышленности. Со свойственной им привычкой оценивать события после их свершения компании, может быть, и пришли бы к заключению, что обезвоживание — не лучший путь. Однако поскольку эти работы были уже начаты, решили их продолжать, обходя районы, которые имеют наибольшую тенденцию к проседанию.

В начале 60-х годов была поставлена обширная геофизическая программа, имевшая целью предсказать возможность будущих обрушений. Однако в процессе выполнения этой программы пришли к выводу, что прямое прогнозирование появления карстовых воронок находится за пределами возможностей современных методов. Можно только в общих чертах оценить потенциальную опасность и руководствоваться этими данными при решении вопроса, какие районы скорее всего подвергнутся проседанию. Эта оценка должна основываться на анализе состава и мощности осадков и на сведениях о степени понижения уровня грунтовых вод. Если по наблюдениям в скважинах отмечается очень сильное падение уровня грунтовых вод, это переводит район в разряд потенциально опасных. Мощность осадков может быть оценена по комплексу данных бурения и гравитационной съемки. Станции гравитационных измерений в городах следует располагать через 15—60 м, а в открытой местности — через 90 м. Для контроля геофизических данных используют результаты бурения скважин, располагаемых на расстоянии около 1,6 км друг от друга.

Исследования в рассматриваемом районе дали некоторые положительные результаты, поскольку с их помощью удалось выявить участки, имевшие тенденцию к сильному проседанию. Однако чувствительность гравитационных измерений оказалась недостаточной для обнаружения малых структур, которые могут подвергнуться более слабым просадкам. Большие размеры карстовых воронок в долине Вандерфонтейн несколько облегчают предсказание их появления. Так, по данным гравитационных наблюдений предполагалось образование карстовых воронок в Вестонарии в 1967 г. Спортивный комплекс был объявлен опасным местом и закрыт еще до того времени, когда произошло обрушение. Таким образом, этот метод стал шагом вперед в прогнозе потенциальных обвалов грунта.

Когда в 1962 г. на прииске Уэст-Драйфонтейн провалилась дробильная фабрика, то явная опасность угрожала и новому заводу, строящемуся рядом. Пробуренные скважины обнаружили полость, и строительство было приостановлено до тех пор, пока она не была заполнена. Операция эта оказалась весьма дорогостоящей, однако она предотвратила потерю новых сооружений.

Обрушение и проседание над горными выработками

Обрушение выработок может быть бедственным вдвойне: для шахтеров, работающих под землей, и для людей и материальных ценностей на территории непосредственно над местом обрушения. Хотя обрушения кровли случаются часто и представляют огромную опасность, они очень редко достигают масштаба, достаточного для проседания земной поверхности. Тем не менее заброшенные шахты могут таить угрозу для строений и людей, находящихся над ними.

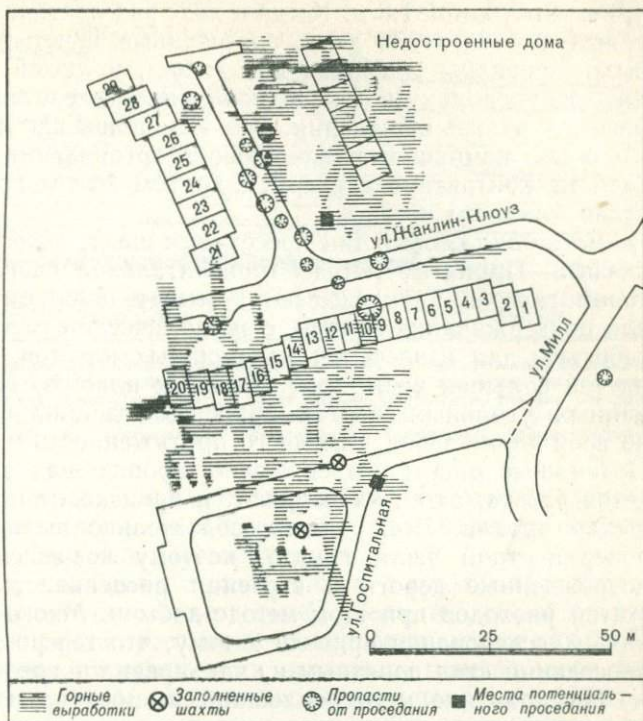
Обычно работу в шахтах ведут таким образом, чтобы некоторое количество породы оставалось в виде целиков для опоры кровли. Однако всегда существует искушение — перед тем как шахта будет оставлена, извлечь из нее как можно больше полезного ископаемого. Медленное течение процессов разрушения пород обеспечивает некоторый латентный период, до того как опора и кровля обрушатся.

Город Скрантон (штат Пенсильвания) в начале нашего века подвергся сильному повреждению, обусловленному добычей антрацита на глубине всего 20 м. Оставленных целиков оказалось недостаточно, и вскоре после консервации шахты кровля обвалилась, что затронуло большие площади. В городе сильно пострадали многие здания. Поскольку столбы породы подпирали кровлю через равные интервалы, главная улица города покрылась углублениями, располагающимися через 1,5 м и больше, что соответствовало расстоянию между целиками.

Слабо консолидированные породы являются плохим материалом для кровли, и это делает ее обрушение по истечении определенного времени почти неизбежным, даже если добыча велась осторожно и разумно. Кровля старых железорудных шахт в Неттлтоуне (восточная Англия), сложенная мягкими глинами и песчаниками, к настоящему времени обрушилась, и на окрестных полях появились депрессии конической формы.

Другая крупная опасность, грозящая со стороны старых шахт, связана со способом их консервации. До начала XX века шахты редко засыпались каким-либо материалом после того, как их эксплуатация прекращалась. Вместо этого поперек верхней части шахты укладывали конструкцию из бревен и досок, которую затем покрывали почвенным слоем толщиной 30—50 см. По прошествии времени бревна под слоем почвы начинали гнить, что создавало весьма серьезную опасность. В 1892 г. в железнодорожном депо Линдэйл вблизи станции Барроуин-Фернесс (Камберленд) под локомотивом разверзлась старая рудная выработка. Машинист успел выпрыгнуть за секунду до того, как локомотив провалился. В населенном пункте Абрам близ города Уиган (Ланкашир) старая угольная шахта была заполнена и опечатана перед тем, как над ней построили железнодорожное депо. Однако заполняющий материал был уложен неудачно и со временем уплотнился; в 1945 г. покрытие шахты обрушилось и погребло 13 вагонов с углем, паровоз и машиниста. Под городом Уилкс-Барре в штате Пенсильвания находится множество старых угольных шахт, и в 1968 г. покрытие одной из них, расположенной под крупной дорожной магистралью, обрушилось; медленное растрескивание асфальта дало шоферу время спастись бегством, но его автомобиль провалился в пропасть диаметром 9 м. В окрестностях Матлока в Пеннингах на лесистых холмах имеется множество старых свинцовых выработок, и случаи падения людей в них, если их путь пролегал по сгнившему деревянному покрытию, в этой местности довольно часты.

Встает задача обнаружения этих старых шахт. Если такая шахта найдена, ее можно легко заполнить или бронировать бетоном. Бурение скважин с целью поисков старых шахт является исключительно дорогостоящей операцией, даже если надо разведать лишь небольшую площадь для застройки, поскольку малые размеры этих шахт требуют очень близкого расположения скважин друг от друга. Ограниченные размеры шахт затрудняют также их обнаружение геофизическими методами, хотя Национальное управление угольной промышленности Великобритании добились некоторых успехов в этой области при помощи чувствительных протонных магнитометров. Эти приборы определяют различия в магнитных характеристиках между коренными породами и обломочным материалом, использованным для засыпки шахт. Однако хотя с их помощью и можно локализовать старые шахты, из-за недостаточной разрешающей способности приборов это



Улицы Жаклин-Клоуз в городе Бери-Сент-Эдмендс и схема расположения воронок, образовавшихся в результате обрушений.

делается не столь детально, чтобы обойтись без бурения скважин.

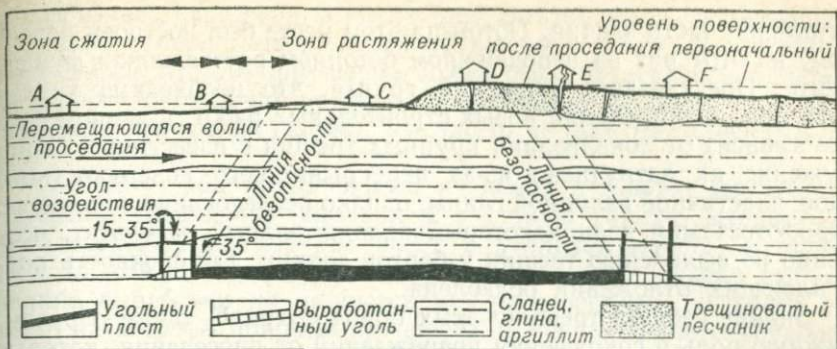
К сожалению, обследование и регистрация горных выработок стали в Англии обязательными только с 1872 г., поэтому сведения о более старых разработках отыскать не всегда возможно. В тех районах, где следы выработок на земной поверхности отсутствуют, лучшим источником информации о местонахождении старых шахт является опрос местного населения. В 1964 г. на улице Жаклин-Клоуз в городе Бери-Сент-Эдмендс (Суффолк) было построено несколько домов. В этом районе коренной породой является мел. Исследования местности проведено не было, хотя позже выяснилось, что двое местных жителей в юности работали в меловых шахтах, находившихся под данным участком. Однако карта шахт отсутствовала, а местных жителей никто не спрашивал. Сточные воды из домов сбрасывались в несколько поглощающих колодцев, расположенных на глубине 9—15 м. Жидкая грязь затем стекала в горные выработки, что приводило к образованию ориентированных вертикально к поверхности земли трубчатых полостей. В декабре 1968 г. подъездная дорога к дому 9 на улице Жаклин-Клоуз провалилась в одну из таких полостей диаметром

4,6 м и глубиной 1,8 м. Когда в ходе расследования выявили протяженность шахт, то дома, построенные за четыре года до этого, были признаны опасными для жизни, и людей заставили выселиться, поскольку под канализационными системами все чаще и чаще случались обрушения. Все это произошло потому, что строительная компания, планирующие организации и местные жители не контактировали друг с другом до тех пор, пока уже не стало слишком поздно.

Есть один особый тип проседания шахт, который можно предсказать. Принятые методы горизонтальной разработки, при которой галереи прокладываются между целиками, оставленными для поддержания кровли, с экономической точки зрения нерентабельны для извлечения маломощных пластов, а таковыми является большая часть всех угольных пластов. Поэтому в современных угольных шахтах врубовые машины вынимают уголь по всей длине забоя, имеющего протяженность в десятки метров. Подвижные опоры поддерживают кровлю над забоем, пока ведется работа, затем их убирают, и происходит постепенное обрушение кровли. Этот процесс обязательно вызывает проседание поверхностной части грунта, поэтому возмещение убытков за поврежденные дороги и строения расценивается как одна из статей расходов при этом методе добычи. Многолетние наблюдения и исследования привели к тому, что теперь характер такого проседания стал понятным и, как правило, предсказуемым.

На практике метод сплошной выемки приводит в действие следующие процессы: возникновение волны проседания, которая затрагивает поверхность земли, создавая первичное напряжение; затем наклон, сопровождающийся сжатием, и, наконец, оседание до нового, более низкого уровня. Если волна проседания чересчур сильна, то возникающее напряжение может привести к тому, что стены строений изогнутся или в них образуются трещины. Наклон представляет менее серьезную проблему, так как он обычно устраняется путем саморегуляции.

Повреждение строений в городских районах, расположенных над угольными шахтами, вполне предсказуемо, а стоимость возмещения убытков вполне приемлема для горнодобывающих компаний. В тех местах, где наземные здания и сооружения очень дорогостоящие, вести под ними сплошную добычу, учитывая возможные повреждения, с экономической точки зрения бессмысленно. В этом случае для поддержания кровли в шахте можно оставлять целики угля. Размеры этих естественных подпорок определяются тем, какая порода залегает между угольным пластом и земной поверхностью. Чем глубже шахта, тем более массивными должны быть оставляемые целики. Новое английское месторождение угля в Селби, восточная часть Йоркшира, пересекается железнодорожной линией, по которой ходят скоростные поезда Лондон—Эдинбург. Можно рассчитать, что ширина полосы целиков в данном случае должна быть не менее 1,6 км. Такое количество угля стоит



Проседание, обусловленное сплошной выработкой угля; дом А в прошлом пострадал меньше остальных; дом В наклонен, поскольку он расположен на волне проседания; дом С подвергнется слабой деформации; дом D будет сильно поврежден, так как он расположен над трещиной в песчанике; дом E разрушается по той же причине; дом F, стоящий на естественном фундаменте, поврежден незначительно.

слишком дорого, чтобы оставлять его в шахте, поэтому в данных условиях наиболее правильным выходом будет перенесение железной дороги за границы месторождения.

На месторождении Селби столкнулись и с другой проблемой: река Уз, которая его пересекает, имеет очень небольшой уклон русла. Общая амплитуда проседания обычно оценивается как 90 % мощности извлеченного пласта или несколько меньше, если некоторое количество пустой породы было возвращено в выработку. Согласно этим расчетам, извлечение пласта Барнсли мощностью около 3 м вызовет опускание района реки Уз ниже уровня моря, что приведет к сильным наводнениям. Поэтому горнодобывающее предприятие в Селби вынуждено идти на сооружение вдоль реки дренажных систем и больших рвов, хотя это и требует дополнительных затрат.

Волна проседания может развиваться только в виде слабых изгибов в достаточно пластичных породах, таких как глины или сланцы. Более хрупкие породы, например песчаники или известняки, а также трещиноватые разности не изгибаются, а растрескиваются, и проседание происходит в виде ряда последовательных сдвигов. Если дом построен на краю двух независимо проседающих блоков породы, пусть даже степень их проседания одинакова, он будет сильно поврежден. На каменноугольных копях Сигма в Южной Африке проседание мощного трещиноватого горизонта долеритов, залегающего над угольным пластом, вызвало сильные местные повреждения.

В районах Хакнолл и Мэнсфилд на угольном месторождении в Ноттингемшире столкнулись с иными проблемами. Если здание оказывается расположенным над трещиной в известняке, оно может подвергаться повторным повреждениям. Один дом в Хакнолле пришлось совсем разрушить, так как одна из его стен сильно осела в том месте, где ее фундамент отделился по разлому от

остальной части здания. Потом на этом месте был построен новый дом, на этот раз на неподвижном бетонном ростверковом фундаменте. Предсказание движений грунта, что необходимо учитывать при планировании новых строительных работ, в данном случае зависит от локализации крупных трещин в известняке. Обнаружение их затруднено из-за перекрывающего поверхностного слоя пластичной валунной глины, однако исследования с помощью аэрофотосъемки дали некоторый положительный результат, особенно по выявлению трещин у бортов долины, где прочность подстилающих отложений ослаблена.

Знание свойств трещиноватых пород сыграло, таким образом, важную роль в сокращении повреждений от проседания, которые на заре горнодобывающей промышленности случались очень часто.

Будущее

В разные времена и в разных концах света из-за неожиданного проседания грунта будут разрушаться дороги, дома и поля, гибнуть люди. Для отдельного человека вероятность такой гибели крайне незначительна, однако она все же существует. Судьба некоторых домов и дорог уже предрешена. Но будут случаи проседания и совершенно неожиданные, поскольку они действительно непредсказуемы и могут расцениваться как настоящее несчастье. Однако будут и такие ситуации, когда после проседания вдруг выяснится, что в распоряжении людей было вполне достаточно информации, чтобы избежать катастрофы или предотвратить ее. Но будет уже слишком поздно, и людские жизни, и материальные ценности будут потеряны без всякого оправдания.

Это мрачное пророчество изречено автором потому, что, хотя методы прогноза и существуют, но многие люди считают, что не стоит тратить время на предсказание таких маловероятных событий, как катастрофическое проседание. Еще серьезнее тот факт, что люди избегают брать на себя ответственность за такие исследования, и ни один орган власти нельзя назвать обязанным отвечать за планирование, которое позволило бы полностью избежать такого рода опасностей. Проводимый Национальным управлением угольной промышленности Великобритании прогноз проседаний в настоящее время используется инженерами и сокращает вероятность возникновения опасных ситуаций. Однако никто в Англии непосредственно не отвечает за брошенные шахты и подземные полости, возникшие в результате растворения горных пород. Поэтому никто не обращает на них внимания даже тогда, когда имеются факты, требующие рассмотрения и интерпретации.

В Венгерспосте (Южная Африка) в течение многих лет ведется наблюдение за движением грунтов, связанным с карстовыми явлениями. В некоторых случаях это позволяет выявить симптомы, предвещающие неожиданное обрушение. В 1973 г. за ночь

образовалась карстовая воронка; результатом были человеческие жертвы и потеря материальных ценностей. Только впоследствии выяснилось, что это обрушение можно было предсказать. Почему же данные наблюдений не были обработаны сразу после того, как они были получены? Потому, что никто не был ответственным за это?

В 1977 г. пол кухни одного из домов в городе Честерфилд (графство Дербшир) обрушился в старую горную выработку, пройденную около 100 лет назад в угольном пласте, который залегал всего в метре под поверхностью земли. Такие старые мелкие выработки не являются чем-то необычным, и когда на место катастрофы прибыли инженеры из Национального управления угольной промышленности для выполнения работ по укреплению дома, они заявили, что знали о существовании подобных выработок в данной местности и что это обрушение не было для них неожиданностью. Но тогда почему же здесь строили дома? Почему никто не проверил зарегистрированные выработки?

В 1959 г. муниципалитет города Бери-Сент-Эдмендс в графстве Суффолк отказался купить предложенный ему участок земли «из-за слухов о том, что этот район подвержен проседанию». Однако в 1964 г. тот же муниципалитет дал разрешение на строительство домов на этом участке, не сделав никаких указаний о возможной нестабильности грунта. В 1966 г. этот муниципалитет отказался выдать закладную покупателю одного из домов на улице Жаклин-Клоуз, «потому что в этом месте имеются подземные выработки». Строительная компания «Трикорд Девелопментс Лимитед» организовала здесь бурение скважин до глубины 6 м, хотя геологи указывали, что шахты расположены на глубине не менее 12 м. Вооружившись отчетом о результатах бурения, которое, как можно догадаться, не выявило никаких шахт, муниципалитет дал разрешение на дальнейшее строительство домов.

В 1967 г. на улице Жаклин-Клоуз образовалась первая карстовая воронка. Затем ход событий ускорился. Произошли многочисленные обрушения, названная строительная компания была ликвидирована, муниципалитет объявил дома непригодными для жилья, главный инженер города преждевременно ушел в отставку. Но при этом муниципалитет заявил, что не имеет права тратить общественные деньги на обеспечение жильем выселенных с улицы Жаклин-Клоуз. И несколько десятков семей продолжают платить по закладной за нежилые дома. Почему же ни муниципалитет, ни строительные компании не проверили слухов (которые оказались правдивыми) о наличии в районе старых шахт? Потому что никто серьезно не думал о проседании и никто не взял на себя ответственность за такую проверку.

Подземные аварии

* * *

В 1924 г. в высоком хребте к юго-западу от Токио велось строительство туннеля Танна. К 10 февраля 1924 г. он протянулся уже на 2100 м. Ничто не предвещало опасности, и вдруг порода кровли туннеля, располагавшегося в 150 м под землей, обрушилась, и в туннель устремился разрушительный поток из воды и грязи. Под этой волной погибло 16 рабочих, находившихся в тот момент в туннеле.

Туннель Танна стал печально забытым, поскольку сооружался в очень слабом грунте. Сложное переслаивание пород, представленных высокопроницаемым вулканическим пеплом и глинами, разбитыми множеством разломов, было настоящим кошмаром для строителей туннеля, ведь катастрофа 1924 г. не была единственной.

Насыщение неустойчивых пород водой обычно приводит к обрушению и затоплению; эти явления наиболее опасны для людей, ведущих подземные работы. Возможно, безопасность строителей туннелей и шахтеров в большей степени, чем от чего бы то ни было, зависит от природы и свойств пород, а также от умения людей предвидеть поведение этих пород. Здесь, как и вообще в строительстве, можно решить практически все проблемы, если мы знаем, в чем они заключаются. При сооружении туннелей или проведении горных работ это означает, что мы должны знать, какая порода обнажится после проходки очередного пласта. Но точный прогноз геологических структур, залегающих на большой глубине от поверхности земли, всегда труден, а иногда почти невозможен. Поэтому в настоящее время, прежде чем построить туннель или штрек в шахте, обычно пробуривают длинные разведочные скважины вдоль оси выработки.

Самой страшной, но далеко не единственной опасностью для шахтера или проходчика туннеля является обрушение кровли. Хотя большинство пород при наличии благоприятной геологической структуры проявляет устойчивость и может удерживаться над подземными пустотами почти без всяких крепей, но обычно они не выдерживают нагрузки и обрушиваются. Еще большую опасность таит вода. Вода — это постоянная угроза при проведении подземных работ: она может затапливать горные выработки или, смешиваясь при высоком давлении с неуплотненными осадками, образовывать жидкие грязевые потоки.

Опасное воздействие подземных вод

При проходке туннелей под рекой в рыхлых, насыщенных водой осадках речного русла, когда буквально над головой находится грозный водный поток, возникает множество проблем. Впервые сооружение туннеля, пересекающего реку, было начато известным инженером Марком Брунелем и его сыном знаменитым Исамбардом Брунелем в 1825 г. под Темзой в Лондоне. По совету гео-

логов, которые пробурили множество разведочных скважин, проходка была начата всего на глубине 4 м под руслом реки, где, как предполагали, залегала плотная глина. Однако распределение осадков в русле реки почти всегда бывает очень сложным, и истинный их состав и строение редко можно предсказать на основании данных, полученных по разбросанным буровым скважинам. По мере того как велась проходка, на пути туннеля встречались всевозможные неуплотненные, подвижные и насыщенные водой осадки, для борьбы с которыми пришлось изобрести специальную систему защиты.

Два года спустя, когда горизонтальная выработка протянулась под рекой на 30 м, вода под давлением прорвалась через рыхлые слои, слагавшие ложе реки, и через образовавшееся отверстие устремилась в туннель. Чтобы осушить затопленный туннель, надо было запечатать отверстие в дне реки снаружи. Невероятно, но это удалось сделать, сбросив с барж мешки с глиной (несколько сотен тонн). После того как из туннеля выкачали воду, было признано, что кровля его достаточно прочна, и работы возобновились. Вода прорывалась в туннель еще раз, но, несмотря на все трудности, строительство все-таки было завершено.

Впоследствии, чтобы предотвратить проникновение речной воды через проницаемый грунт в туннель, расположенный под рекой, в него стали нагнетать под давлением сжатый воздух, и вода туда уже не поступала. Так были вырыты первые туннели под рекой Гудзон в Нью-Йорке и под рекой Клайд в Глазго. Практика показала, что в этом случае важно создать равновесие давлений, поскольку, если давление воздуха в туннеле было слишком низким, река «врывалась» в туннель, если же оно оказывалось чрезвычайно высоким, то воздух «вырывался» в реку. В обоих случаях таилась потенциальная опасность. Несомненно, самый безопасный метод проходки туннелей под реками — это сооружение их на достаточной глубине, где залегают коренные породы. Так, знаменитый туннель под рекой Мерсей в Ливерпуле проходит в коренном песчанике, минуя несцементированные речные осадки. Даже в том случае, если порода консолидированная, следует опасаться, что туннель может войти в зону разломов, где породы обладают повышенной водопроницаемостью.

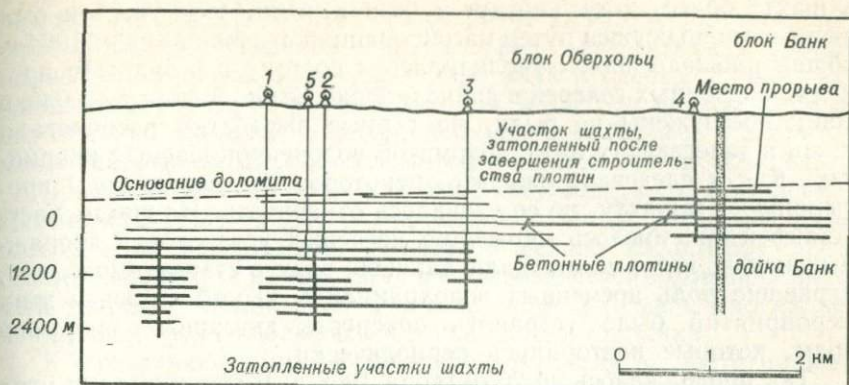
Туннель Сейкан, строительство которого в настоящее время ведется между островами Хонсю и Хоккайдо в Японии, является едва ли не самой дерзновенной из всех известных конструкций. Планируемая длина туннеля — 55 км; он пройдет в 135 м под морским дном в нарушенном комплексе изверженных и осадочных пород. В мае 1976 г. здесь произошла катастрофа: вода ворвалась в туннель на глубине 200 м ниже уровня моря. Первоначальный сток составил около $0,6 \text{ м}^3$ в секунду, и вода затопила участок туннеля длиной в 3 км, прежде чем системы дренажа справились с потоком; лишь несколько недель спустя туннель был окончательно осушен.

В зоне разломов вода грозит катастрофами двух типов. Трещиноватые породы, присутствующие в этих зонах, могут играть роль каналов, по которым пойдет водоток, а тектонические глины, образовавшиеся в результате истирания пород при их движении по разлому, могут стать гидрологическими барьерами. Оба эти явления наблюдались одновременно в туннеле Сан-Хасинто в Калифорнии, где, как было установлено, порода, залегающая над наклонными плоскостями разлома, была сильно нарушенной и высокопроницаемой, а по плоскостям разломов располагались слои водонепроницаемой жильной глины.

Для ряда пород характерна очень высокая проницаемость, и они могут служить проводниками огромных потоков воды. Если при проходке туннелей или проведении горных работ глубоко под землей встречаются подобные породы, то они обычно бывают насыщены водой под высоким давлением. Песчаники, известняки, вулканический пепел и лава — наиболее проницаемые породы. Они характеризуются наивысшими содержаниями воды. Кроме того, слабая сцементированность песчаника может порождать дополнительные сложности. В 1959 г. при сооружении туннеля Авали в Ливане наткнулись на крутонаклонный пласт песчаника, в результате участок туннеля протяженностью в 2,5 км был затоплен и забит илом. Геологические исследования показывали присутствие песчаника, однако никаких сведений относительно свойств породы, находящейся в туннеле под давлением на глубине около 600 м, получено не было. Проводившееся в штреке туннеля искусственное дренирование при слабой сцементированности песчаника вызвало подпочвенную эрозию и кавитацию, что в свою очередь позволило большому количеству воды затечь в туннель. Когда, наконец, все это поняли, направление туннеля на участке более 1,5 км было изменено, чтобы он не проходил в песчанике.

Известняк — тоже высокопроницаемая порода, хотя ее свойства совершенно иные, чем у песчаника. Сам по себе известняк обычно почти водонепроницаем и все же он пропускает огромные количества воды через имеющиеся в нем пустоты растворения. Дело усложняется еще и тем, что расположение подобных водоносных камер предсказать практически невозможно.

Под рекой Северн был построен туннель, по которому шла железная дорога из Англии в Уэльс; этот туннель был частично проложен в каменноугольном известняке. В 1879 г. при проходке со стороны Уэльса на значительной глубине от поверхности земли была подсечена затопленная пещера в кровле известняка. Проходку, естественно, прекратили, но длительное время не могли справиться с затоплением. Оказалось, что пещера была соединена с подземным руслом реки Северн, и поэтому поступление воды в туннель продолжалось. Лишь после того, как было пройдено множество вертикальных и горизонтальных выработок, через которые велось дренирование и откачка, строительство туннеля



Разрез района Уэст-Драйфонтейн; показано расположение выработок, затопленных в 1968 г., прежде чем удалось построить аварийные плотины.

было завершено. Аналогичные проблемы возникли и при строительстве туннеля Грехенберг в горах Юра (Швейцария), когда достигли участка, где вода пропитывала два маломощных прослоя сильно трещиноватого известняка. В одном из штреков приток воды был настолько сильным, что работы пришлось приостановить на два месяца, пока течение не ослабло.

Но не только проходчики туннелей сталкиваются с неприятными неожиданностями в кавернозных известняках. Эти породы нередко преподносят сюрпризы и горнякам при разработке месторождений полезных ископаемых. Медные рудники Морокоча в Перу и свинцовые рудники в горах Холкин в Уэльсе — вот лишь два примера месторождений, где постоянно возникают различные серьезные проблемы, связанные с опасностью затопления подземных выработок водами из известняковых пещер.

Однако самое сильное затопление произошло на крупнейшей золоторудной шахте мира в Южной Африке. Шахта Уэст-Драйфонтейн находится в самом сердце богатого месторождения золота Ранд в долине Вандерфонтейн близ Йоганнесбурга. Золото добывают из конгломератов, залегающих в мощной толще кварцитов. И кварциты, и конгломераты абсолютно водонепроницаемы. Золотоносные слои встречаются лишь на значительной глубине, между этими слоями и земной поверхностью располагается толща доломитов мощностью около 900 м; доломиты — породы трещиноватые, ячеистые, являющиеся прекрасными водоносными горизонтами. Гидрология грунтовых вод усложняется еще и присутствием вертикальных сиенитовых даек, секущих доломиты, кварциты и золоторудные тела. Дайки водонепроницаемы и представляют собой барьеры, препятствующие движению грунтовых вод.

Большинство выработок на шахте Уэст-Драйфонтейн располагается на ограниченном дайками участке, который известен под названием «блок Оберхольц». Для того чтобы сделать работы

в шахте более эффективными и безопасными, этот участок был давным-давно осушен путем массивированной откачки воды. В 1964 г. общая площадь шахты увеличилась к востоку в результате проходки подземных галерей в дайке и блоке Банк. Доломиты в блоке Банк обезвожены не были, но горные выработки располагали лишь в залегающих ниже доломитов водонепроницаемых кварцитах. Как и следовало ожидать, некоторое количество воды просачивалось в шахту, но ее удавалось откачивать. На шахте Уэст-Драйфонтейн имелось множество насосных установок и дренажных канав, которые отводили лишнюю воду в старые выработки, игравшие роль временных водохранилищ. Одной из задач этих мероприятий было устранить опасность внезапных прорывов воды, которые повторялись периодически.

Так продолжалось до 26 октября 1968 г. В тот день в 9 ч утра кровлю выработок блока Банк разорвала трещина, в которую устремился поток воды. Этого никто не ожидал. Сток воды из трещины составил 4,5 м³ в секунду, что в 6 раз превысило обычно существовавший здесь суммарный сток. После образования трещины объем воды, поступавшей в шахту, в полтора раза превысил общую производительность водоотлива. Когда шахта начала медленно заполняться водой, спасательные работы развернулись с поистине фантастической быстротой. Только благодаря быстрой эвакуации наверх всех работавших в шахте, а их было 13 500 человек, люди были спасены.

К счастью, вся вода устремилась в главную часть шахты: от восточного края выработки, где произошел прорыв, она поступала в две подземные галереи, откуда текла потоками глубиной около метра. Лишь после 26 суток упорного труда в ужасных условиях и благодаря смелой инженерной изобретательности в галереях удалось соорудить бетонные перемычки и наводнение было остановлено. К тому времени глубина воды в стволе шахты уже составила 750 м, но верхние горизонты и основные насосные установки были спасены. Восточный участок был еще скрыт под водой, а западный — главный — участок шахты Уэст-Драйфонтейн уже осушили насосами, и добыча возобновилась.

При расследовании причин катастрофы установили, что вода прорвалась из водонасыщенных доломитов, перекрывавших шахту, а столь грандиозные масштабы наводнения объясняются двумя факторами — почти 700-метровым напором воды и кавернозностью доломитов. Однако вода преодолела и кварциты мощностью около 30 м, отделявшие шахту от доломитов.

Разработка месторождения осуществлялась путем выемки золотоносных пород. При этом, естественно, нарушалась целостность пород в кровле выработок. Несмотря на то что при проходке сооружались крепи, определенные подвижки блоков породы в кровле были неизбежными. Кроме того, недалеко от места прорыва воды разрабатываемые золотоносные породы и перекрывающие их доломиты были рассечены крупным разломом, направле-

ние которого могло определять развитие каверн в доломите, локализацию зон трещин и сдвигов пород, залегающих в кровле выработок. Возможно, сыграли свою роль и слабые толчки, наблюдавшиеся в ночь перед прорывом воды. Во всяком случае, образование трещины в водонепроницаемом барьере кварцитов между насыщенным водой доломитом и шахтой вполне объяснимо.

Возникает вопрос: можно ли было предсказать это затопление? Пессимисты утверждают, что проведение горных работ под водонасыщенным кавернозным доломитом делало катастрофу неизбежной, однако это не так. Если в кровле залегают водонепроницаемый кварцит, горные работы можно вести в течение многих лет и при этом будут наблюдаться лишь слабые протечки.

К сожалению, наука о механике пород еще не достигла того уровня, когда горным инженерам до начала возведения подземных сооружений могла бы быть предложена надежная количественная оценка всех шансов за и против. Если сопротивление отдельных пород и можно определить, то до сих пор не существует достоверного способа предсказания устойчивости тысяч трещин, которые скрыты в породах глубоко от поверхности земли. При планировании работ в шахте инженеры полагались лишь на свой опыт; было решено рискнуть, и в данном случае — напрасно. Правильное решение заключалось в отводе вод из доломитов блока Банк. Однако по предварительным расчетам специалистов эта операция казалась слишком дорогостоящей, и ее решили не осуществлять. Доломиты были осушены только после затопления шахты, поскольку добычу золота надо было продолжать и другого выхода не было.

Угроза погребенных долин

«Рокхед» — это термин, которым пользуются шахтеры и инженеры для обозначения подземной границы между твердыми, консолидированными породами и вышележащими неуплотненными осадками. Этот раздел может находиться как на небольшой глубине — под маломощным слоем почвы, так и на значительной глубине — под рыхлыми осадками. В последнем случае это создает серьезную угрозу для проходчиков туннелей и шахтеров: если туннель или штрек неожиданно выйдет из твердых пород в слабые, рыхлые, подвижные осадки (обычно это песок или глина), насыщенные водой под высоким давлением, неизбежна катастрофа. Как проходчикам туннелей, так и шахтерам необходимо знать, где на данном участке залегают нижняя граница рыхлых отложений. Если этот рубеж относительно плоский, особых проблем не возникает, однако форма его может быть очень сложной. Обычно эта форма отражает погребенный рельеф местности, существовавший здесь до захоронения его под перекрывающими осадками. Чтобы выявить строение этой поверхности, необходимо знать прошлые процессы, влиявшие на формирование

рельефа, которые в свою очередь зависят от движений земной коры и от климатических условий. Многочисленные оледенения и перемены климата в течение последних нескольких миллионов лет еще больше затрудняют осуществление подобных реконструкций.

Самая грозная опасность подстерегает шахтеров и проходчиков туннелей там, где ложе выполненной осадками древней долины неожиданно резко опускается на большую глубину. С поверхности же форму таких погребенных долин и положение их днища установить почти невозможно. В 1907 г. в горах Юра (Швейцария) велось строительство туннеля Вайссенштайн. Однако проектировщики совершенно не учли, что на одном из участков существовала погребенная долина. Когда же при проходке туннеля строители достигли этой долины, сдержать насыщенные водой осадки оказалось весьма непросто.

Ложе погребенных долин может располагаться ниже современного уровня моря — на глубине базиса эрозии, существовавшего в ледниковый период, когда уровень моря был гораздо ниже, чем сейчас. Последующее повышение уровня моря сопровождалось отложением осадков в древней долине. Под рекой Тайн в Ньюкасле (Англия) имеется выполненная осадками значительная по протяженности долина глубиной 40 м; при добыче угля в многочисленных мелких шахтах района эту долину издавна старались по мере возможности избегать.

Очень трудно определить местонахождение погребенных долин там, где они не соответствуют очертаниям современных долин. При сооружении гидротехнического канала Ваггиталь под долиной Швендибах в Швейцарии предполагали, что рыхлые осадки достигают значительной глубины. Поэтому по линии будущего канала была заложена серия горных выработок, одна из которых вскрыла границу коренных и рыхлых пород на глубине 12 м. Канал предполагалось вести на глубине 30 м, поэтому разведочные горные работы продолжали, и другая выработка — в 50 м к северу от первой — вошла в погребенную долину, расположенную на проектной глубине закладки канала. Во избежание катастрофы строительные работы были законсервированы.

Самые глубокие и опасные погребенные долины приурочены к районам, подвергавшимся оледенению. Это объясняется тем, что достаточно мощные ледники при своем движении через уже существовавшие долины могли перемещаться вверх по склонам, переуглубляя отдельные их участки. При отступлении ледника происходит накопление переносимых водой осадков и заполнение ими углубленных частей долины. Это — одна из основных проблем, с которой сталкиваются инженеры при строительстве туннелей, поскольку многие районы Европы и Северной Америки в ледниковую эпоху были охвачены оледенением. В Колмене (Канадские Скалистые горы) шахтеры-угольщики обнаружили погребенную долину, заполненную рыхлыми осадками и погру-

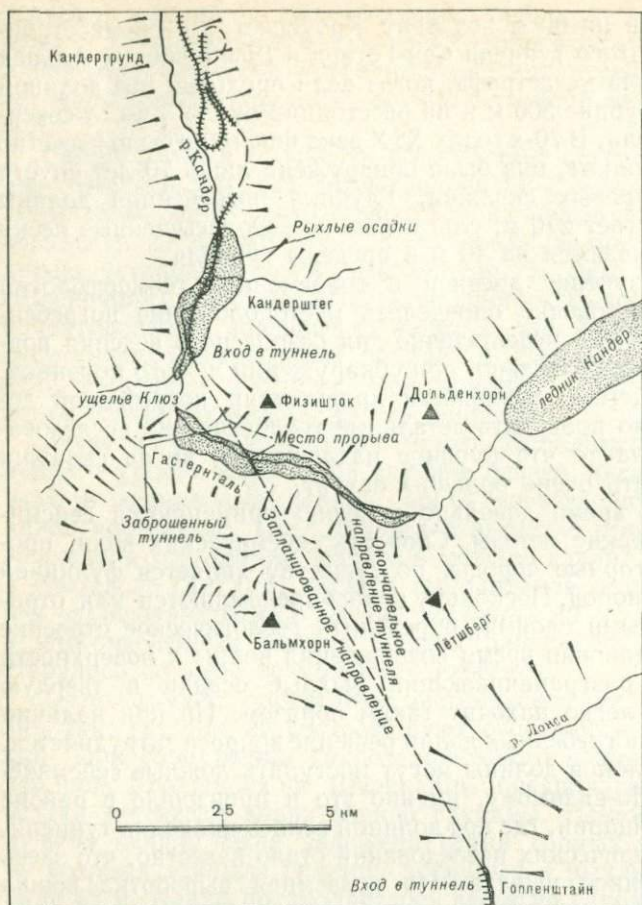
жающуюся почти на 90 м под реку Кроуснест. Во время строительства знаменитого туннеля Сен-Готард в Швейцарских Альпах чуть не произошла катастрофа, когда вели проходку под долиной Андерматт на глубине 300 м и на расстоянии около 3 км от северного устья туннеля. В 70-х годах XIX века ничего не было известно о погребенной долине, она была обнаружена лишь 70 лет спустя при помощи буровых скважин. Глубина погребенной долины Андерматт достигает 270 м, слагающие ее водонасыщенные пески и глины протягиваются на 40 м в пределы туннеля.

Детальное изучение древней и современной геоморфологии помогает ориентировочно определить местоположение погребенной долины, но этого недостаточно для безопасного ведения подземных работ. Следовательно, при обнаружении любого признака, свидетельствующего о возможном присутствии погребенной долины, необходимо проводить детальные геологические исследования, несмотря на то что бурение надлежащего числа скважин может потребовать очень больших затрат.

В настоящее время довольно успешно применяются сейсмические геофизические методы. Скорость сейсмических волн, проходящих через горные породы, по существу является функцией плотности этих пород. Поскольку волны преломляются или отражаются различными слоями, определить геологическое строение недр можно, установив время возвращения волны к поверхности земли. Рубеж, разграничивающий рыхлые осадки и твердую породу, обычно легко находят таким образом. Но при наличии глубоких узких погребенных долин решение вопроса затрудняется, поскольку со склонов долины могут поступать ложные сейсмические сигналы. По-видимому, именно это и произошло в районе Мовуазен в Швейцарии, где под долиной велась проходка туннеля. По данным геофизических исследований стало известно, что здесь имеется погребенное ущелье. Но подземная выработка вошла в эти отложения в совершенно неожиданном месте, и в туннель устремился поток воды, смешанной с песком; погибло четыре человека.

Последствия недостаточно тщательной разведки погребенных долин могут быть ужасными. С самого начала сооружения туннеля Летшберг в Швейцарии совершенно не учитывались местные геологические условия. По этому туннелю протяженностью около 15 км должна была проходить железнодорожная магистраль через Бернские Альпы — от Кандерштега на севере до Гоппенштайна на юге. Оба входа в туннель планировалось расположить в живописнейшей местности на уровне дна ледниковых долин.

У Кандерштега долина имеет удлиненный профиль с четко выраженными уступами, что характерно для многих ледниковых долин. Железная дорога должна была входить в туннель у одного из таких уступов, вздымавшегося почти на 200 м. Выше по течению погребенная долина разветвлялась, и одно ответвление — Гастерталь — проходило как раз над туннелем. Инженеры,



Железнодорожный туннель в Лётшберге; показано запланированное и фактическое направления туннеля.

проектировавшие туннель в конце XIX века, плохо знали геологию местности. Предполагалось, что у Кандерштега туннель пройдет через известняки под горой Физишток, а затем войдет в твердый гранит под горой Бальмхорн; не было полной ясности и в геологическом строении долины Гастренталь.

Туннель должен был строиться на глубине 180 м от поверхности земли. Грунт в долине был представлен рыхлыми осадками, однако геологи, консультировавшие строителей туннеля, авторитетно заявляли, что мощность рыхлых осадков не превышает 60 м и «никакого риска» нет. Один из геологов, правда, высказал мнение, что мощность рыхлых осадков, возможно, достигает 200 м и часть туннеля пройдет через них. Он рекомендовал поставить буровые работы в долине Гастренталь. Однако проект строитель-



Профиль долины Гастернталь.

ства туннеля был уже утвержден, и на сообщение этого геолога не обратили никакого внимания.

В октябре 1906 г. была начата проходка туннеля Лётшберг. Два года спустя его протяженность со стороны Кандерштега уже превысила 2,5 км. Предполагаемая «опасная зона» под северным бортом долины Гастернталь осталась позади, и проходка туннеля уже велась под долиной. Шли обычные подземные строительные работы. В половине третьего ночи 24 июля 1908 г. был проведен очередной взрыв. Еще не смолкло его эхо, когда лавина из валунов, грязи, воды и песка прорвалась в туннель и заполнила его на протяжении 1300 м. Все находившиеся здесь люди, а их было 25, погибли. Одновременно наверху, в долине Гастернталь, в русле реки образовалась типичная депрессия опускания диаметром 150 м.

Нет почти никаких сообщений о причинах этой катастрофы и о последовавших за ней событиях. Однако совершенно ясно, что туннель вошел в отложения очень глубокой погребенной долины, выполненной рыхлыми осадками. Разведочные скважины, пробуренные впоследствии в долине Гастернталь, достигли глубины 215 м, но о полученных результатах тоже ничего не сообщалось. Тем временем работы по строительству туннеля продолжались. Вести проходку в насыщенных водой, рыхлых отложениях, выполнявших долину, можно было только после их укрепления нагнетанием цементного раствора либо замораживанием. В данном случае применить любой из этих методов было очень трудно, к тому же рыхлые отложения, заполнившие туннель, невозможно было удалить, так как под давлением они постоянно перемещались.

Было принято единственно возможное решение — забетонировать штрек и забросить участок туннеля протяженностью около 1,5 км, заполненный рыхлыми осадками. Это и было осуществлено; проходку затем начали вести в новом направлении, вследствие чего в туннеле образовалось три изгиба. Туннель прошел под долиной Гастернталь выше по течению, где между выработкой и рыхлыми осадками залегают коренные породы мощностью 150 м. В 1913 г. по туннелю Лётшберг началось движение поездов.

Катастрофы в Лётшберге могло бы и не быть, если бы предварительно были проведены более детальные геологические исследова-

дования или хотя бы учтены все имеющиеся данные. Гастерталь являет собой прекрасный пример глубокой ледниковой долины, заполненной рыхлыми отложениями. В таких долинах совершенно невозможно заранее предсказать, до какой глубины эти рыхлые отложения распространяются. Коренные породы выходят здесь на земную поверхность в ущелье Клюз ниже долины Гастерталь. Для того чтобы при проходке туннеля встретились рыхлые отложения, было достаточно даже незначительного (не более 1 : 10) обратного уклона дна погребенной долины. Такое явление весьма характерно для альпийских ледниковых долин Швейцарии, где крутые склоны часто выпажаны ледниками, двигавшимися вверх по склону. Все настораживающие признаки были налицо, но ни инженеры, ни «геологи-консультанты» не придали им никакого значения.

По существу ни один геолог не мог точно указать, на какую глубину распространяются рыхлые отложения в долине Гастерталь. Однако любой знающий геолог, как, например, тот, на заявление которого перед катастрофой не обратили никакого внимания, должен был предупредить, что рыхлые отложения вполне могут достигать уровня проходки туннеля. Возможно, стоило пойти на некоторый финансовый риск и повести туннель в другом направлении, что в конце концов и пришлось сделать. Тогда по крайней мере было бы спасено 25 человеческих жизней.

Как выяснилось впоследствии, дешевле всего было бы до сооружения туннеля пробурить скважину в дне долины. Если бы этот туннель строился сейчас, мощность рыхлых отложений можно было бы определить геофизическими методами. Однако в связи с тем что долина Гастерталь очень узкая, результаты могли оказаться и ошибочными. Мораль истории туннеля Лётшберг такова: ничто не может заменить буровую скважину.

Проблемы горных работ в породах со сложной структурой

Если проходка туннеля или иной горизонтальной выработки ведется в породах, которые могут быть охарактеризованы как «достаточно однородные с геологической точки зрения», особых трудностей не возникает и опасности обрушения грунта нет. Независимо от того, крепкая порода или рыхлая, можно применять принципы горной механики, а метод извлечения, соответствующий данным условиям, можно выбрать на основании математических расчетов. Однако очень часто строительство туннеля приходится вести в породах с разными свойствами и сложной структурой. Если при этом определять и учитывать все геологические условия, сооружение туннеля будет очень дорогостоящим и потребует много времени. С другой стороны, если геология участка недостаточно хорошо изучена, проходка туннелей или про-

ведение горных работ в слабом грунте могут привести к катастрофе.

Железнодорожный туннель Квинешей в Норвегии был построен в 1940 г. Через 8 лет он частично обрушился. В результате постепенного разрушения кровли туннеля в ней образовалась трубообразная полость диаметром до 6 м и высотой более 30 м. Эта «труба» возникла вдоль пересечения двух разломов.

Разломы — это проблема, с которой инженеры-строители сталкиваются постоянно. Тип разломов обычно бывает невозможно предсказать, и они почти всегда являются плоскостями ослабления. Разломы развиваются в результате движения, происходящего между двумя блоками горных пород, поэтому они включают зоны обломочных пород, известных под названием брекчий, или пласты тонкоразмолотой породы — «жильной глинки», которая может содержать очень рыхлые глинистые минералы.

При обрушении в туннеле Квинешей одна трещина включала брекчию, слабо цементированную растворимым кальцитом, а другая — монтмориллонитовую жильную глинку, этот глинистый минерал широко известен благодаря своему свойству разбухать при контакте с водой. Как обычно наблюдается вблизи разломов, порода была сильно трещиноватой; вода, поступившая из разлома, где содержался кальцит, вызвала разбухание монтмориллонита. В конце концов давление и вес породы стали чрезмерно большими для неукрепленной облицовки туннеля, и произошло обрушение. . .

В гидроэнергетических системах обрушения туннелей происходят особенно часто в связи с тем, что на породы воздействуют огромные гидростатические силы, а также изменения давления, которые в свою очередь обусловлены неравномерным использованием водной энергии. В 1956 г. обрушился туннель Кемано на западном побережье Канады, прослужив всего два года. Туннель был практически завален обломками породы, падавшими из огромной разрастающейся каверны (более 20 м в поперечнике) на своде туннеля. Эта каверна сформировалась вдоль разлома, в котором мощность жильной глинки не превышала 5 см. Но по обеим сторонам от разлома в полосе шириной около метра порода стала более рыхлой в связи с тем, что она преобразовалась в хлорит — очень неплотный гидратированный минерал. Новый рыхлый материал был размыт, после чего и началось постепенное обрушение пород по обеим сторонам разлома. На удаление воды и обломков из туннеля и на укрепление свода каверны было затрачено 2 млн. долл., тогда как бетонная облицовка туннеля в зоне разлома обошлась бы гораздо дешевле, если бы с самого начала осознавали степень возможной опасности.

При сооружении туннеля Лемонтайм в Тасмании на тех участках, где имелись разломы, стенки туннеля были покрыты тонким защитным слоем бетона. Но это не помогло, всего лишь через пять месяцев после завершения строительства в 1969 г. туннель

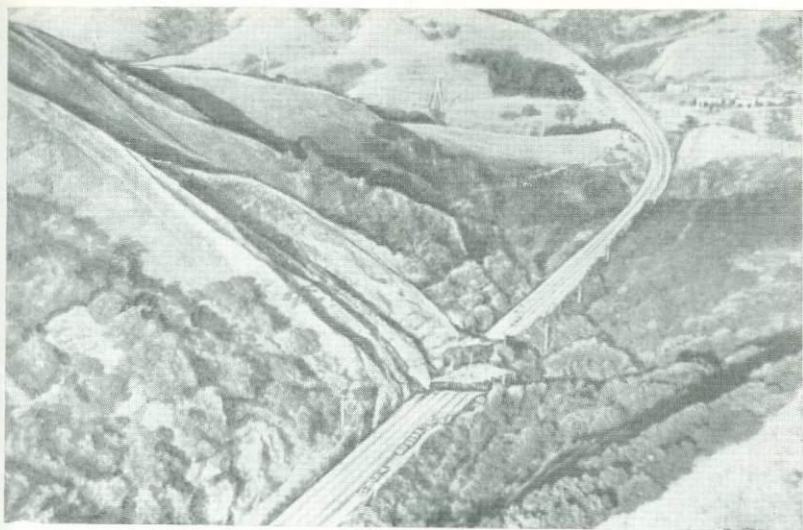
обрушился. Причиной опять были разломы. В данном случае двумя разломами, отстоящими друг от друга всего на 3 м, пересекались филлиты и кристаллические сланцы. Блок породы, зажатый между разломами, оказывал на тонкую облицовку туннеля слишком сильное давление, поэтому обрушение было неизбежным. При ремонтных работах были сооружены массивные стальные опоры, укрепившие примыкающую к разломам зону перемятых пород, но это опять-таки было сделано *post factum*.

Изучение геологических катастроф в туннелях позволяет привести множество самых разных примеров. Однако есть туннель, в котором наблюдалось сочетание практически всех известных типов геологических катастроф. Это — туннель Танна в Японии, строительство которого из-за сложных геологических условий продолжалось 16 лет, хотя длина его всего 8 км. В этом туннеле погибло более 70 человек.

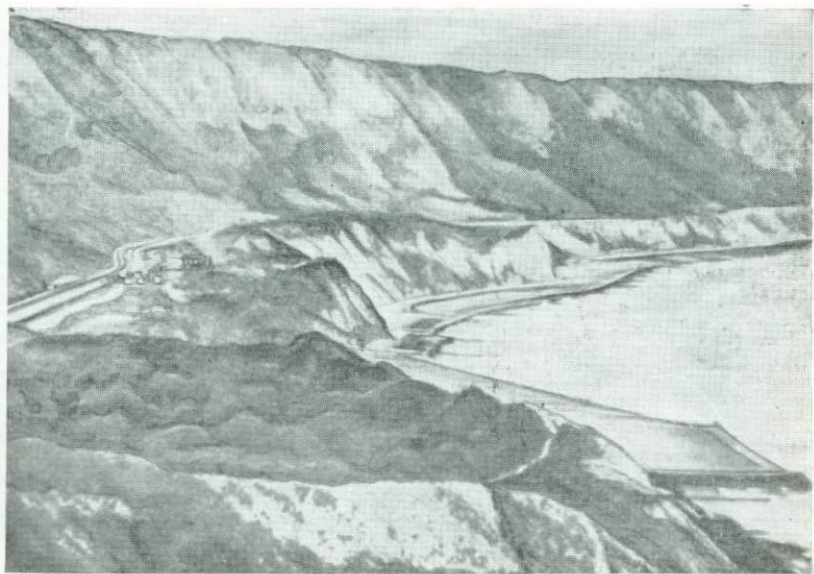
Строительные работы начались в 1918 г., а завершились в 1934 г. В туннеле проходит главная железнодорожная магистраль от Токио к городу Кобе через гору Такиджи на полуострове Идзу. Трудности при строительстве туннеля возникли в связи с тем, что проходку необходимо было вести в сильно нарушенной и сложной в структурном отношении толще водопроницаемых вулканических пеплов. Многие разности этих пеплов были столь рыхлыми и водонасыщенными, что вели себя скорее как жидкость, а не как твердое вещество; некоторые же глины легко впитывали воду и резко увеличивались в объеме. Под воздействием давления разбухших глинистых слоев в туннеле дважды происходили обрушения, в результате одного из них погибли все находившиеся под землей люди. В 1921 г. обрушился участок туннеля протяженностью 45 м. При обвале погибло 16 рабочих, а еще 17 человек в течение недели не могли выбраться из туннеля, заваленного породой, пока их не откопали.

В 1924 г. в западный штрек туннеля Танна ворвалось огромное количество холодной воды, что было вызвано чрезвычайно высокой проницаемостью вулканических пород. В том же году в восточный штрек хлынула горячая вода, вытекавшая под большим давлением из зоны тектонических брекчей. При строительстве туннелей горячую воду обычно встречали на большой глубине; примером тому служит Симплонский туннель в Швейцарии, где температура воды на глубине 2100 м от земной поверхности составляла 56 °С. Подобной глубины туннель Танна, конечно, не достиг, однако в связи с тем что он находился в районе более активной вулканической деятельности, геотермальные потоки были обнаружены на гораздо меньшей глубине. В зоне разломов, содержащей горячую воду, отрезок туннеля протяженностью 300 м соорудился 3,5 года.

Вулканическая деятельность в Японии еще раз свидетельствует о том, что эта страна расположена в неустойчивой части земной коры. В 1930 г., когда работы в туннеле Танна близились к концу,



Небольшой оползень на сверхкрутом склоне полностью перегородил это шоссе недалеко от Сан Франциско



По неустойчивой террасе в районе Фолкстон-Уоррен проходит железная дорога, ведущая к Дувру; уложенные в приливно-отливной зоне бетонные плиты сыграли важную роль в стабилизации оползня.



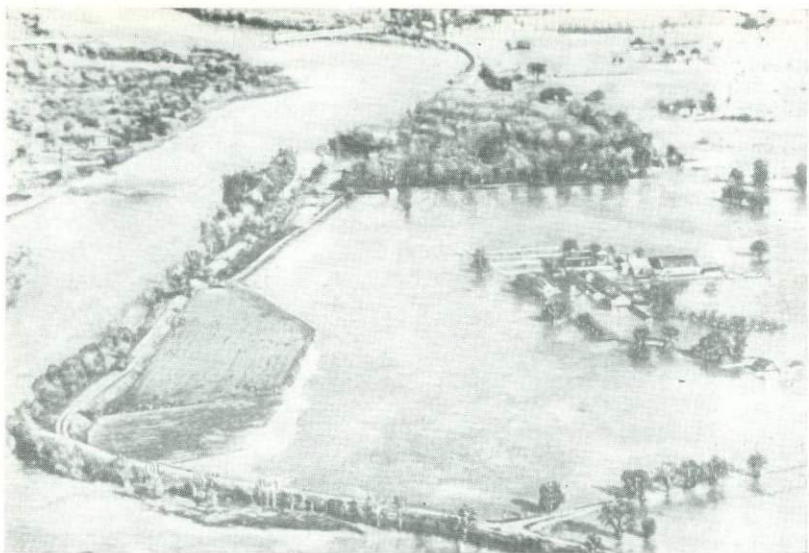
Плотина на реке Вайонт оказалась совершенно бесполезной, водохранилище заполнила оползневая масса, спустившаяся с горы Маунт-Ток (справа от участка на фотоснимке).



Обломочные отложения в долине реки Пьяве — последствия огромной волны, выплеснувшейся из водохранилища Вайонт.



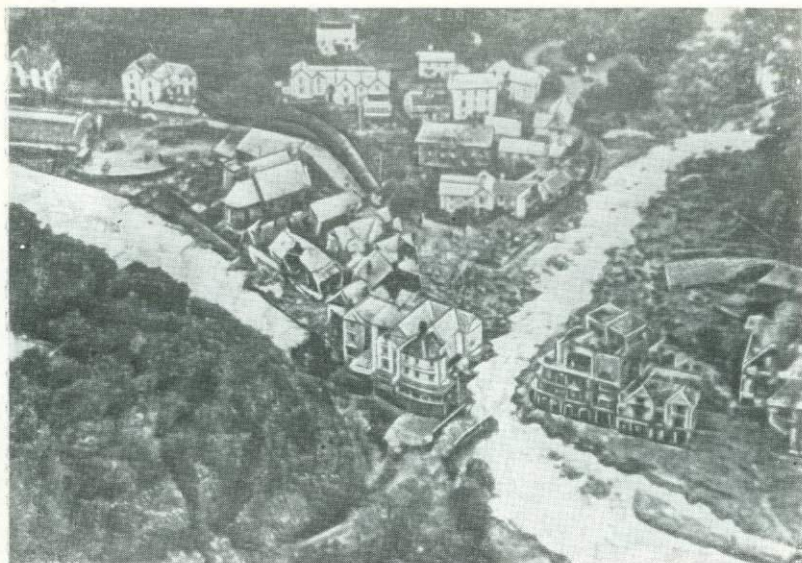
Спасательные работы в городке Лангароне, пострадавшем при обрушении плотины на реке Вайонт.



Эта небольшая плотина отделяет реку Фетер (приток Миссисипи) от ее поймы, затопленной в 1955 г.



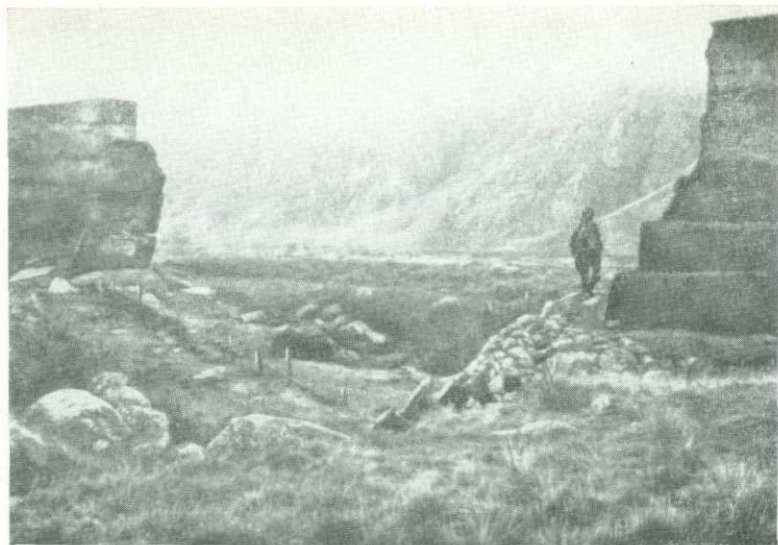
Паводковая вода сняла с фундамента этот бревенчатый дом в Норуолке (штат Коннектикут) и перенесла его на железной орожное полотно.



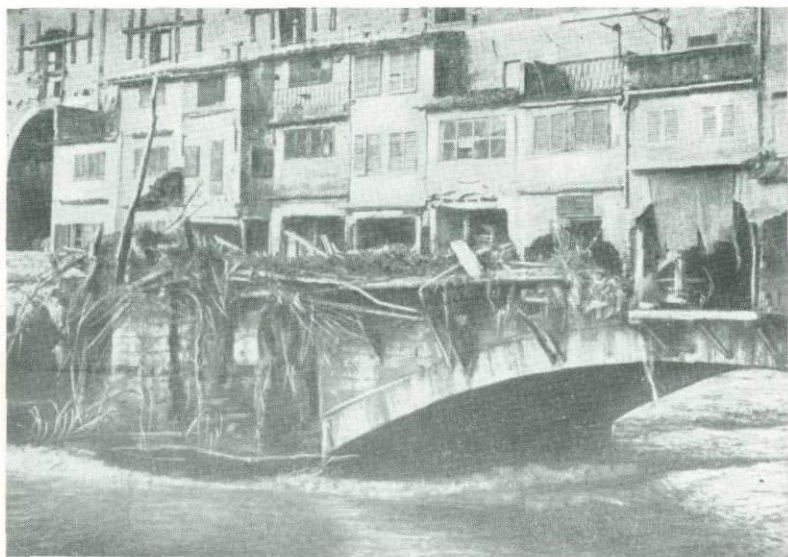
Воды реки Уэст-Лин текут в русле, проложенном паводковыми потоками посреди деревни Линмут, и впадают в реку Ист-Лин (на переднем плане).



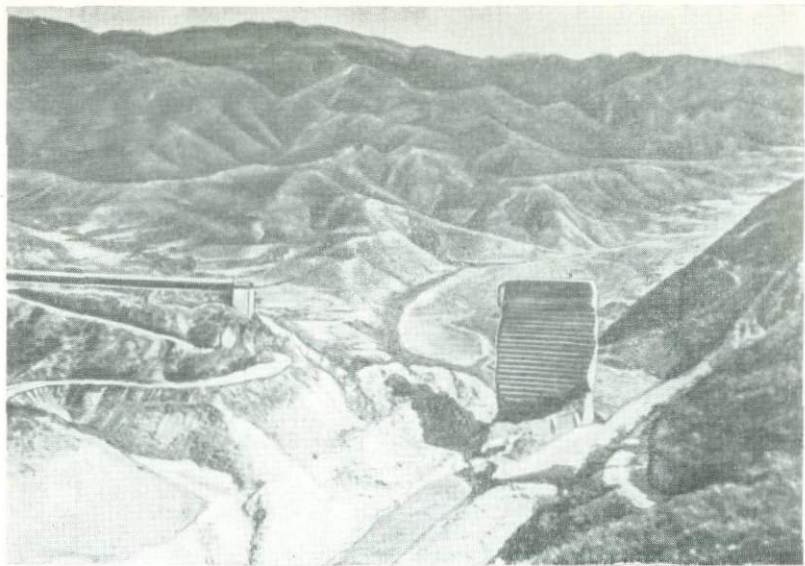
Проложив новое русло через деревню Линмут, река нанесла ей значительные разрушения.



Огромный пролом в плотине Эйджайо (северный Уэльс), образовавшийся в 1925 г. при прорыве воды из водохранилища.



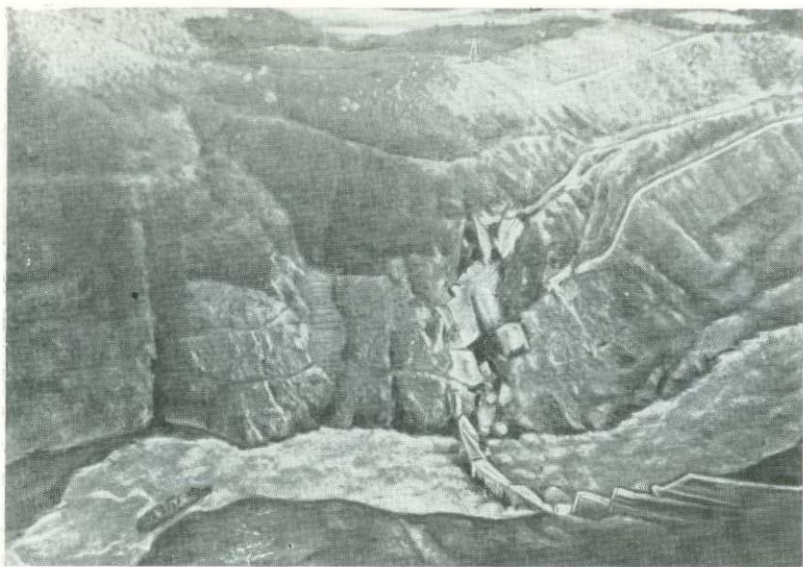
Обломки у знаменитого моста Понте-Веккио показывают, какого уровня достигла река Арно во время разрушительного наводнения 1966 г. во Флоренции.



Лос-Анджелес печально знаменит тем, что в этом городе произошло два сильных обрушения плотин; в 1928 г. от плотины Сент-Франсис остался лишь узкий сегмент ее центральной части.



В 1963 г. вода начала медленно просачиваться из водохранилища Болдуин-Хиллс; едва жители густонаселенных пригородных районов эвакуировались, как вода прорвала плотину и затопила сотни домов.



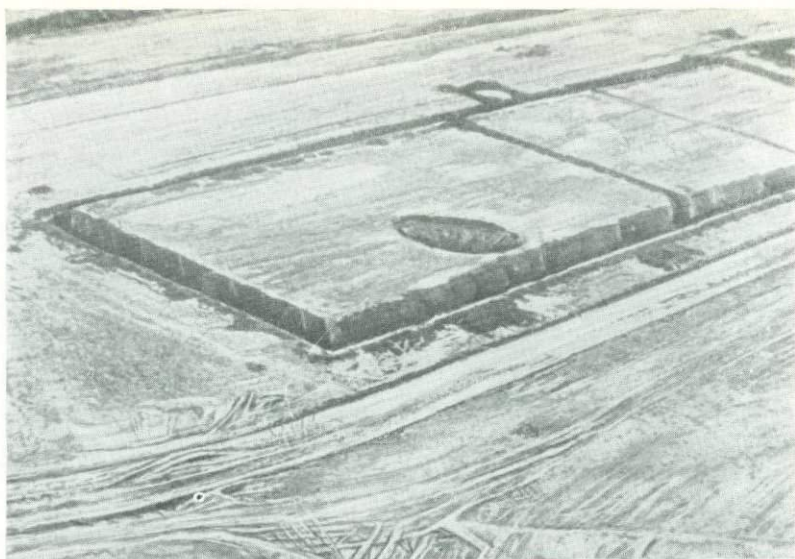
В 1959 г. вследствие подвижек грунта обрушилась тонкая бетонная перемычка плотины Мальпассе.



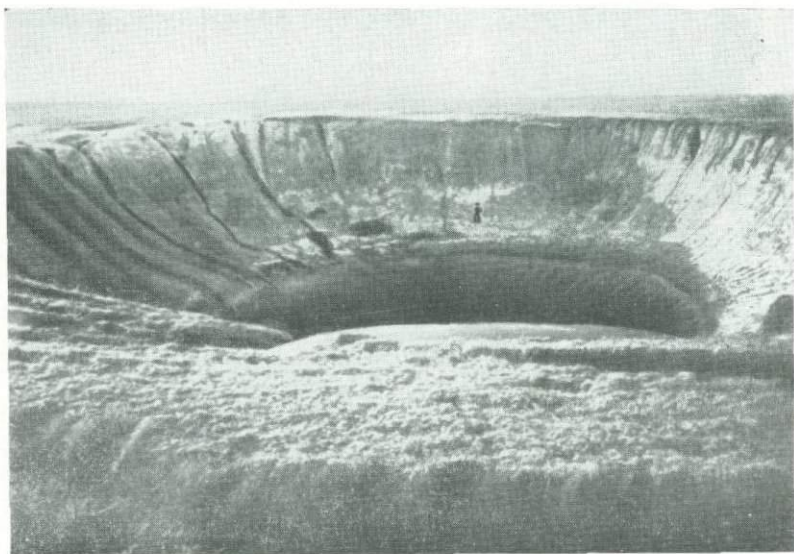
После обрушения плотины вся вода из водохранилища Мальпассе мгновенно устремилась вниз по долине Рейран; находившемуся на ее пути городу Фрежюс был нанесен огромный ущерб.



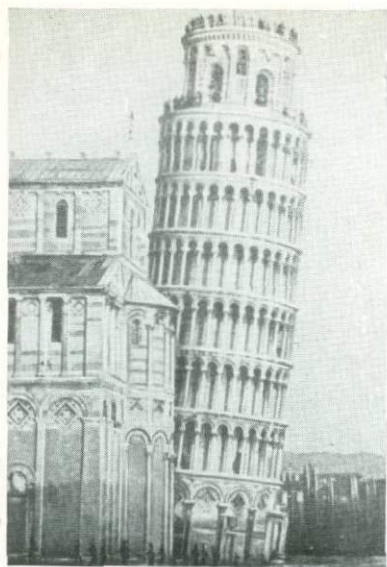
Венеция — город, подверженный проседанию, очень часто затопляется, и гондольеры переправляются прямо через площадь Святого Марка.



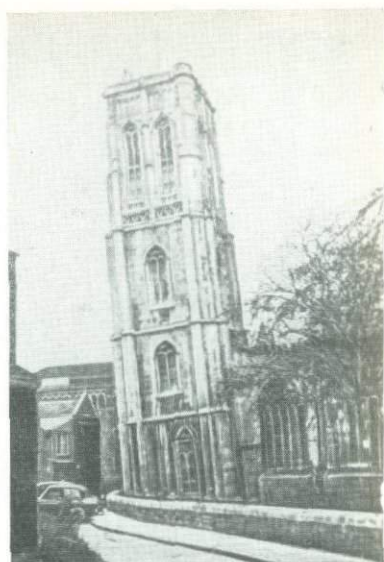
Фундамент, заложенный для постройки магазина в Бирмингеме (штат Алабама), стал причиной образования карстовой воронки.



Громадная впадина в Миде (штат Канзас), образовавшаяся в 1879 г. в результате проседания при растворении подстилающего соляного пласта.



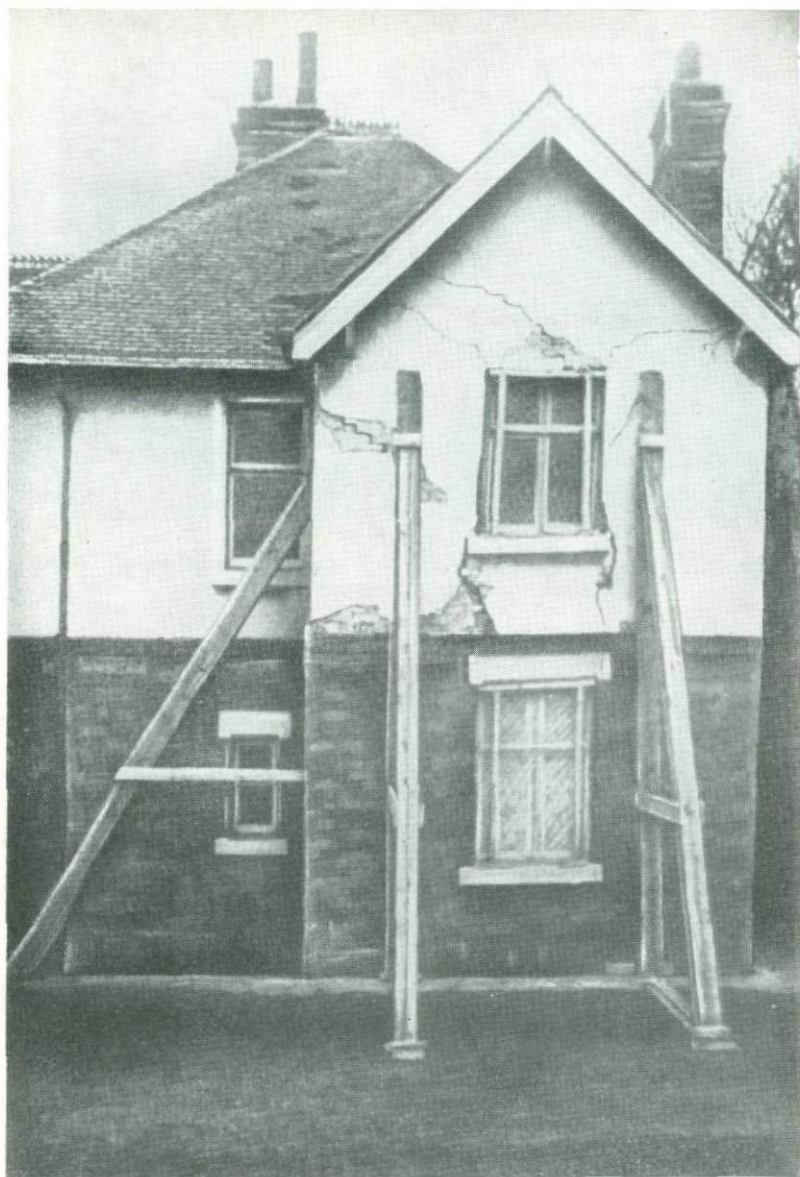
Падающая Пизанская башня — колокольня собора.



Падающая башня собора Темпл в Бристоле.



Прежде на этом месте было два курятника и садик (Бишоприггс, Шотландия); зимней ночью 1947 г. сад и один из курятников провалились в забытую старую шахту.



Эти трещины в здании вызваны проседанием, связанным с добычей угля на глубине (город Хакнолл, Ноттингемшир, 1972 г.).



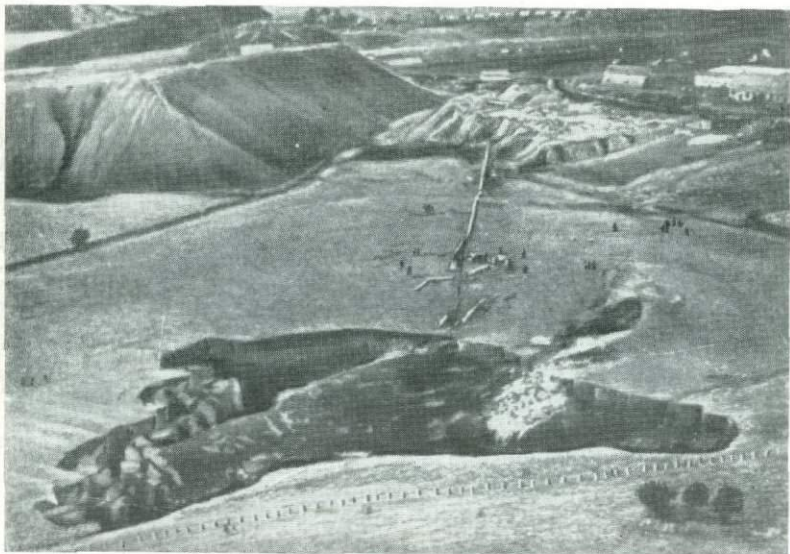
Трещины в земле и разрушенный дом — результаты проседания (Банка, Южная Африка, 1972 г.).



Проседание в Чeshire, обусловленное добычей соли. Подобные явления настолько распространены в этой местности, что здания снабжают деревянными стропилами, с помощью которых их иногда удается вернуть в первоначальное положение.



Провалы на улице Жаклин-Клоуз (Бери-Сент-Эдмендс), образовавшиеся в результате обрушения подстилающих меловых пород в старые горные выработки, которые находятся под этим районом.



Эта огромная воронка образовалась в 1950 г., когда влажный торфяной грунт проник в верхнюю штольню угольной копи Нокшиннх, при этом погибло более 100 шахтеров.



*Классическая ледниковая долина Гастерталь; в 1908 г. при прокладке туннеля под ее дном на глубине более 180 м были погребены лавиной песка и воды
25 человек.*



После катастрофы, происшедшей на угольных коях Лофтхаус в 1972 г.



Карстовая воронка диаметром около 275 м, образовавшаяся в 1970 г. над шахтой Муфулира (Замбия).

в этом районе произошло довольно слабое землетрясение, но вибрации оказались достаточными для смещения слоев вулканического пепла, вследствие чего кровля туннеля обрушилась и погребла пятерых рабочих. Двоих удалось откопать живыми, а трое пополнили длинный список жертв туннеля.

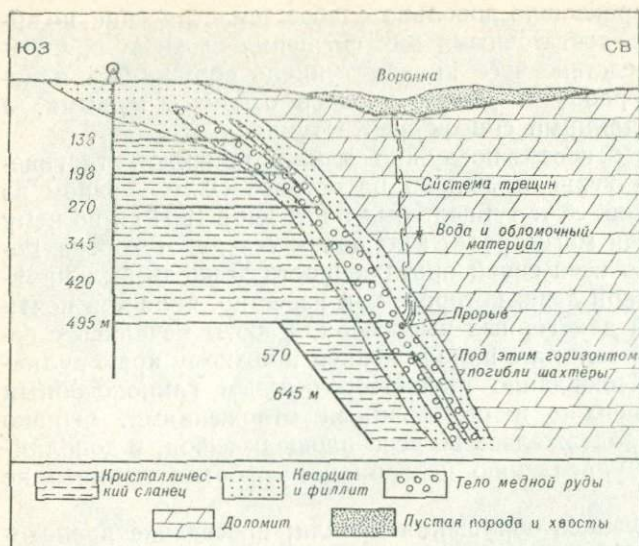
Вулканический пепел послужил также причиной трагического обрушения туннеля Уилсон на острове Оаху — одном из Гавайских островов. Этот туннель был построен в 1954 г., по нему проходила главная магистраль, ведущая к северу от города Гонолулу. Почти по всей своей протяженности туннель был пройден в вулканической лаве, которая, как известно, является почти идеальной средой для горных выработок. Работы начались с северного конца туннеля, а с приближением к южному краю вулканическая лава неожиданно сменилась рыхлым глиноподобным вулканическим пеплом и обломочными отложениями. Однако выемка породы продолжалась по всей площади забоя, и дополнительных мер по укреплению подземной выработки принято не было.

В туннеле начались обрушения кровли; проседание происходило и на земной поверхности, в 30 м над туннелем. В июле 1954 г. случилось два обвала, но человеческих жертв, к счастью, не было. В августе, при работах по расчистке, произошел третий обвал и погибло пять рабочих. С тех пор проходку в обрушившемся грунте и в оставшейся ненарушенной глине вели несколькими небольшими параллельными штреками; благодаря применению этого метода обрушений в дальнейшем не было.

Несомненно, следовало ожидать, что кровля в таком рыхлом материале, какой встретился в туннеле Уилсон, будет весьма неустойчивой. Но определить степень прочности кровли туннеля, проектируемого в более твердых и плотных породах, не так легко. Туннель Скогн — гидротехнический канал в центральной Норвегии — был пройден в древней метаморфической породе, и тем не менее он обрушился. Впоследствии поняли причину, но, к сожалению, было уже слишком поздно. Оказалось, что обрушение было вызвано разрыхлением пород, происшедшим вследствие того, что некоторые минералы были преобразованы в монтмориллонитовую глину.

В некоторых случаях подвижки грунта неизбежны независимо от типа породы; более того, бороться с ними практически невозможно.

Когда породы залегают на большой глубине, они сжаты под действием огромных давлений. Если эти давления частично уменьшаются в одном направлении (например, когда ведется выемка породы при строительстве туннеля или шахты), обычно происходит смещение пород в образовавшееся пустое пространство. На небольшой глубине ослабление давления может вызвать подвижки рыхлых глин, но твердые породы, такие как гранит, остаются без изменений. Однако на глубине сотен и тысяч метров



Поперечный разрез шахты Муфулира.

давления достаточно высоки, чтобы деформировать любую породу. Симплонский туннель в Швейцарии проходит под горным хребтом на глубине около 2 км; на одном из участков его стены медленно, но неминуемо оползают.

На золотых рудниках южной Африки, достигших еще большей глубины, стенки не деформируются постепенно, а резко опрокидываются в горные выработки. Эти так называемые горные удары обычно случаются через некоторое время после проходки штольни. Благодаря упругости породы медленное оползание идет до тех пор, пока не будет превышен предел прочности, после чего и следует горный удар.

Другой тип неизбежного смещения пород наблюдается в шахтах, где при разработке рудных месторождений остаются огромные пустоты (очистные забои), которые могут быть поддержаны целиками и крепями лишь в течение ограниченного времени. Нет необходимости, да и весьма нежелательно с экономической точки зрения оставлять в целиках слишком большое количество руды, после того как эксплуатация шахты закончена. Но если постепенное обрушение заброшенных забоев охватит также толщу перекрывающих пород, последствия могут привести к катастрофе, как это случилось на медном руднике Муфулира.

Муфулира находится в очень богатом «медном поясе» Замбии. С 1933 г. на этом руднике велась разработка мощного наклонного пласта богатой медной руды. Рудное тело круто падает на северо-восток, и мощность его достигает 36 м. Как и обычно, вход в шахту и все технические установки располагались в ненарушенном

лежащем боку рудного тела. По мере того как извлекалась руда, заброшенные наклонные забои обрушались, и в конце концов последствия постепенного обрушения пород всяческого бока достигли поверхности земли. Дробильная и рудоперерабатывающая установки на шахте давали огромное количество отходов, главным образом в виде тонкого шлама; в течение многих лет пустую породу выгружали над всяческим боком шахты. Это преследовало сразу две цели: удалить пустую породу от шахтных установок и засыпать болото, грозившее малярией. По мере того как всякий бок шахты продолжал проседать, на земной поверхности образовывались озера, которые также заполнялись отходами; к 1956 г. этим мелким обломочным материалом был засыпан бассейн глубиной 12 м.

В обычных нормальных условиях помещение отходов со стороны всяческого бока пласта было бы абсолютно безопасным. Поскольку породы обрушивались внутрь шахты, в ее кровле возникали трещины, направленные к поверхности земли, размер которых должен был уменьшаться с удалением от горных выработок. В том случае, когда горные выработки находятся на глубине 300 м и более, как на руднике Муфулира, любые трещины, выходящие на поверхность, будут настолько узкими, что их быстро закупорят наносы. Однако на шахте Муфулира условия не были нормальными. Непосредственно над рудным телом залегала маломощная зона кварцитов, а над ней, до самой земной поверхности, массивные доломиты.

Первые предвестники катастрофы появились в конце 1968 г., когда в покрове отходов образовалась воронка диаметром 60 м. Можно было предположить, что под ней возникла огромная полость, поглотившая исчезнувший материал. Однако этому факту не придали никакого значения, и отходы продолжали сгружать в воронку. В апреле 1970 г. из трещины в кровле шахты на глубине 525 м полилась грязь; сделали ее анализ, но никаких признаков присутствия в ней материала отвалов обнаружено не было, хотя грязь и содержала частицы почвы, что указывало на ее непосредственную связь с поверхностью. Должно быть, в разрушающихся породах кровли возникло очень много трещин и пустот, если осадки с поверхности смогли проникнуть до такой глубины. Однако и в данном случае масштабам трещинообразования и опасным последствиям этого процесса не придали должного значения. В течение лета 1970 г. в шахте неоднократно обнаруживали грязевые экструзии, а наверху, где сгружались отходы, появились новые воронки. Эти воронки по-прежнему заполняли, и горные работы внизу, в шахте, продолжались.

25 сентября 1970 г. произошла катастрофа: поток, состоявший из воды, грязи и материала отходов, прорвал кровлю пород на глубине 525 м от земной поверхности и устремился в шахту. Жидкий грязеподобный материал проник через горные выработки в нижележащие горизонты и сильно их разрушил. Самые же ниж-

ние галереи шахты, находившиеся на глубине более 800 м, были до самой кровли заполнены водой вперемешку с осадками. Погибло 89 шахтеров — одни из них утонули, другие были погребены жидкой лавиной.

На поверхности земли, там где сгружались отходы производства, образовалась огромная воронка — 300 м в поперечнике и 15 м глубиной. Размеры воронки свидетельствовали о том, что под землей исчезло 700 000 м³ вещества, однако в шахту попало всего 280 000 м³. Даже если сделать скидку на сжатие, огромное количество осадков поглотили трещины и каверны в доломите.

Проблемы при разработке месторождений угля

Добыча угля занимает особое место в промышленном мире, во-первых, в связи с огромными масштабами и большой экономической важностью угольной промышленности, а во-вторых, потому, что угледобытчики подвергают свою жизнь повышенной опасности. Большинство шахтеров всего мира занято в угледобывающей промышленности, поэтому вдвойне досадно, что именно этот процесс гораздо опаснее извлечения любого другого полезного ископаемого. Это объясняется отнюдь не низким уровнем методов разработки и техники безопасности, а определенными чертами геологических обстановок, в которых встречается уголь, в частности его связью со взрывными и ядовитыми газами, а также залеганием в толщах структурно слабых осадочных пород.

Уголь образуется вследствие бактериального разложения отмершей растительности, и одним из многочисленных побочных продуктов являются различные газы, в том числе чрезвычайно легко воспламеняющийся метан. Во многих случаях углеобразованием выделяются и улетучиваются, однако нередко любые пористые породы — сам уголь или песчаник — могут улавливать метан, даже если он находится под высоким давлением. Выделяющийся в угольных шахтах газ может быть ядовитым, а смешиваясь с воздухом, становится взрывоопасным. Некоторые угольные пласты содержат очень большие количества газа, тогда как в других он практически отсутствует. Легко измерить объем газа, выделяющегося из любого угольного пласта, однако обычно бывает невозможно установить, почему именно данный слой содержит газ. На основании геологических данных нельзя, к сожалению, заранее сказать, существует ли опасность появления газа в данной угольной шахте или такой опасности нет.

Добыча угля — это единственный вид подземных работ, при которых следует опасаться возникновения взрывных газов. Обычно при проходке туннелей в угленосных районах можно встретить газ, однако быстрая облицовка штрека бетоном почти полностью устраняет всякую опасность. Кроме угля газ сопут-

ствует нефти, которая также образуется вследствие разложения органических, но уже преимущественно животных, остатков. Гидротехнический канал в Сан-Фернандо близ Лос-Анджелеса (Калифорния) был построен в 1971 г. в очень пористых песчаниках, содержащих нефть и природный газ. Сначала произошло несколько слабых взрывов газа, а затем последовал более сильный, унесший 16 человеческих жизней. Некоторые люди погибли при самом взрыве, другие — при пожаре, последовавшем за ним, третьи задохнулись в смертоносной смеси газов.

Взрываться в шахтах может и угольная пыль, находящаяся в воздухе: смешиваясь с соответствующим количеством воздуха, она становится столь же опасной, как динамит. Взрыв угольной пыли, происшедший в апреле 1942 г. на угольном руднике Хонкейко в Китае, по праву считается самой страшной подземной катастрофой — при этом взрыве погибло 1572 шахтера. В какой-то мере опасность угольной пыли можно свести к минимуму, смешивая ее с инертной известняковой пылью; но газ, если он есть в угольном пласте, полностью удалить из выработок невозможно. Единственный путь борьбы с ним — это тщательное планирование вентиляционных систем и создание запасных выходов как для газов, так и для шахтеров. Значительные успехи, достигнутые в этом направлении, позволили заметно снизить число жертв несчастных случаев; в прошлом веке взрывы регулярно уносили множество человеческих жизней, в современных же шахтах они проявляются гораздо слабее и происходят реже.

Налаженная вентиляция позволяет легко справляться с постоянными и предсказуемыми просачиваниями газа. Но значительную опасность таят отдельные «выбросы» включений газа, находящегося под давлением, когда газ буквально взрывается, вырываясь из угольных пластов. В 1971 г. при прорыве газа в угольном руднике Синхейдр в Уэльсе погибло шесть шахтеров. Даже при ретроспективном рассмотрении оказалось, что эту катастрофу невозможно было предвидеть. Свести к минимуму воздействие газов можно было лишь при помощи огромного числа буровых скважин и вентиляционных установок, но даже в этом случае весьма сомнительно, что человеческих жертв удалось бы избежать.

Выработка крупных участков в горизонтальных или слабо наклоненных пластах неизбежно создает определенную опасность обрушения пород. Уголь обычно приурочен к толщам осадочных пород, представляющих собой переслаивание относительно рыхлых сланцев и достаточно крепких — при условии отсутствия трещин — песчаников. Такое сочетание пород весьма непрочное, и поэтому опасность существует при разработке любых угольных месторождений. Хотя крупные обрушения, как можно надеяться, стали достоянием прошлого благодаря улучшению техники безопасности, небольшие камнепады, вероятно, не прекратятся

никогда, в одной только Великобритании они ежегодно уносят в среднем 13 человеческих жизней.

В 1837 г. на угольном руднике Уоркингтон на северо-западе Англии вели выемку угля в пластах, залегающих под морским дном. Кровлю выработок поддерживали целики угля, для этого около 35 % угля оставляли в шахте. В целях экономии управляющий шахты приказал свести мощность целиков к минимуму. Это вообще бывает крайне опасно, а в Уоркингтоне сделать такой шаг просто было нельзя, и 28 июля произошло неизбежное. Некоторые целики угля обвалились; кровля обрушилась; из-за разрушения пород в ней образовались трещины, дошедшие до самого морского дна, и в них устремилась морская вода. . . С берега был виден водоворот, возникший в море над этим участком. В этот день в шахте утонуло 27 мужчин и мальчиков. Этой катастрофы могло бы не быть, поскольку надежные размеры целиков определяются как функция прочности угля и мощности покрова пород. Теоретические достижения в области горной механики и применение современных методов добычи по существу устранили опасность больших обрушений.

Однако незначительные обрушения кровли заранее предсказать почти невозможно, даже если этот «малый масштаб» достаточен, чтобы раздавить человека. Опыт работ в Северной Америке и Европе показал, что для предвидения возможного обрушения внимание должно быть обращено как на густоту трещин отдельности, так и на характеристики пород, залегающих в кровле. Например, если под массивным песчаником залегают маломощный пласт сланца, образующий кровлю угольного пласта, этот сланец обычно обрушается. В том случае, если в песчанике имеются зоны разломов, кровля становится слабой и из рыхлых сланцев часто выпадают конкреции железняка. Что ни говори, лишь бдительный глаз шахтера, прораба или рудничного геолога может дать наиболее точную оценку ситуации в каждом конкретном случае, однако при этом правильное понимание всего множества наблюдаемых геологических факторов будет играть весьма положительную роль.

Основную опасность при добыче угля таят газ и горные породы, на третьем месте после них стоит вода. Высокая водопроницаемость многих сопряженных с угольными пластами пород, особенно песчаников, делает присутствие воды в угольной шахте практически неизбежным. Приток воды даже из наиболее пористых песчаников вряд ли может угрожать жизни, однако он может нанести урон с экономической точки зрения, поскольку необходимо прерывать работы и постоянно откачивать воду. После того как шахта заброшена и откачка прекращена, водопроницаемость песчаников ведет к быстрому затоплению старых горных выработок до уровня местного водного зеркала. Поскольку с целью выемки максимального количества угля группы шахт располагают очень близко, существует опасность при проходке нового штрека попасть в старые выработки.

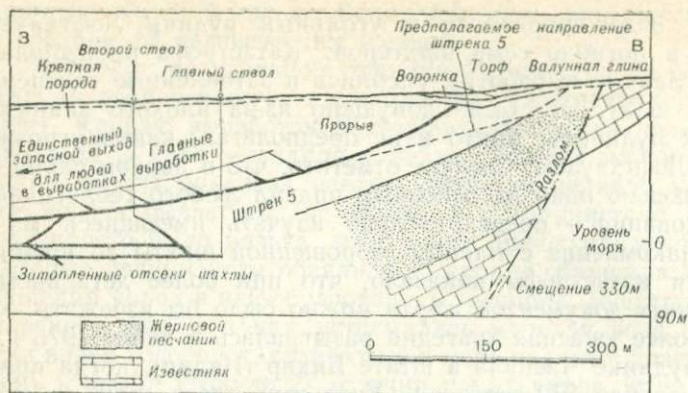
В 1973 г. вода прорвалась в угольный рудник Лофтхауз в Йоркшире и погибло семь шахтеров. Катастрофа произошла потому, что главные выработки уперлись в затопленные галереи заброшенных шахт. Это было допущено из-за плохого знания плана старых рудников; никто и не предполагал, какая угроза нависла над Лофтхаузом. Следует отметить, что в данном случае не было соблюдено одно из основных правил любого геологического исследования — предварительно изучать имеющиеся материалы. Ознакомление с планом заброшенной шахты во время расследования катастрофы показало, что при более детальном изучении старых документов жертв можно было бы избежать.

Гораздо более ужасная трагедия разыгралась в конце 1975 г. в угольном руднике Часнала в штате Бихар (Индия), когда при затоплении погибло 372 шахтера. Угольный пласт здесь круто наклонен, и вода из огромной затопленной открытой выработки прорвалась через штрек на глубине 150 м в подземные галереи. При таких масштабах затопления у шахтеров, трудившихся в главных выработках на глубине 300 м, никаких шансов на спасение не было. В данном случае о старой открытой выработке знали и была оставлена зона угля, игравшая роль барьера между водой и действующей шахтой. Но то ли барьер был недостаточно толстым для угля с такой степенью прочности, то ли уголь оказался более выветрелым и разрушенным, чем ожидалось, то ли глубина старой открытой выработки была больше, чем предполагалось, — во всяком случае затопление было допущено прежде всего из-за недостаточного знания геологической обстановки в районе шахты. Когда дело касается затопливаемых горных выработок, подобная неграмотность может обернуться катастрофой.

Возможно, спорным является вопрос, кто именно виноват в катастрофах, происшедших в шахтах Часнала и Лофтхауз. В подобных случаях трудно указать на кого-то определенного. Видимо, в этих катастрофах повинны и геологи, и горные инженеры, и управляющие шахт, и маркшейдеры.

В 1970 г. в угольный рудник Зелёнка в Польше прорвалась вода из расположенного на поверхности водоема и утонуло пять шахтеров. Было проведено расследование, в результате которого рудничный геолог, прораб, главный инженер и управляющий шахты были осуждены. В данном случае суд, очевидно, исходил из того, что трагедии в Зелёнке могло бы не быть, если бы эти лица должным образом выполняли свои обязанности. Несомненно, катастрофы такого рода можно было избежать.

В 1938 г. разведочная буровая скважина показала, что в неразрабатываемой части угленосного бассейна Нью-Камнок на северной оконечности Южных нагорий в Шотландии залегает мощный угольный пласт. Для его разработки в 1942 г. был открыт угольный рудник Нокшиннох-Касл. Два ствола шахты находились близко один к другому, от них отходили штреки, прой-



Угольная шахта Нокшиннок-Касл и роковой штрек 5, где вследствие неправильного истолкования геологических условий произошел прорыв в шахту насыщенных водой поверхностных отложений.

денные в пустой породе и игравшие роль подземных переходов. По ним можно было проникнуть в различные выработки, где велась выемка угля. Все угольные пласты падали на север, и в дальнейшем можно было бы вести выемку угля в этом направлении на гораздо большей глубине. К западу от этого участка находилась старая, заброшенная шахта, а на востоке новые выработки были ограничены зоной разломов.

До 1950 г. выемка угля в основном велась вверх по падению пород в южном и юго-восточном направлении. Месторождение разрабатывалось камерно-столбовым способом, при этом галереи шириной 5 м были пройдены в виде решетки, центры ячеек которой отстояли друг от друга на 30 м. Таким образом, извлекалась лишь одна треть угля, а две трети оставлялись для укрепления кровли. Высота штреков была около 2 м; в кровле тоже оставляли некоторое количество угля, которым поддерживался залегавший непосредственно на угле довольно рыхлый сланец. При нормальном использовании рудничных стоек никакой угрозы обрушения кровли не существовало.

В 1950 г. выемка угля велась в основном вокруг главного подходного пути штрека 5, следовавшего наклонно вверх по падению в направлении главного разлома на юге. Выбраться из этих выработок можно было, только вернувшись вниз на уровень транспортных галерей западной шахты, а оттуда — к основанию ствола. Так же как и в других угольных бассейнах этой части Шотландии, геология шахты была непростой. На геологических картах в непосредственной близости от шахты были отмечены обнажения валунной глины, аллювия, торфа, гравия. Однако о мощности приповерхностных отложений ничего не было известно.

Угольный пласт пересекали несколько небольших разломов; пласт падал на север, причем по направлению к югу падение его

становилось все более крутым. Было известно, что на юге имеется крупный разлом со значительным (более 300 м) смещением, и ожидалось, что он ограничит в этом направлении угленосный бассейн. Однако можно было лишь высказывать предположения относительно детального геологического строения участка за пределами выработок, и работы в штреке 5 продолжались, отчасти для разведки участка на юге-востоке. Предполагалось, что главный пласт на руднике Нокшинно заканчивается у зоны дробления, протягивающейся вдоль главного разлома. В апреле 1950 г. отдел планирования при Комитете по делам угольных шахт рассчитал на основании падения угольного пласта, что это произойдет примерно на глубине 30 м от поверхности земли. Однако к югу падение пласта становилось еще более крутым, и вскоре всем работавшим в шахте стало ясно, что штрек в угольном пласте дойдет до земной поверхности, еще не достигнув зоны разлома. Руководство шахты даже полагало, что это будет весьма полезно для доступа к руднику и для его вентиляции.

13 августа 1950 г. на забое штрека 5 был произведен взрыв; он вскрыл границу коренных пород и перекрывающих их рыхлых отложений, из которых в шахту начала сочиться вода. Особой тревоги это не вызвало; были установлены дополнительные стойки для укрепления кровли шахты и работы в штреке временно прекращены; в течение недели никаких изменений не произошло. Тем временем маркшейдеры определили, что кровля в точке прорыва находилась на 11 м ниже поверхности земли. Утром 7 сентября после проливного дождя, шедшего на протяжении всей ночи, было замечено, что приток воды в шахту усилился. Основания стоек, укреплявших кровлю, покоились на обломках рыхлых пород; эти породы были быстро вымыты водой. Некоторые стойки рухнули, а вечером того же дня в штреке обрушился большой участок кровли. Одновременно наверху, над месторождением, образовалась неглубокая впадина, было решено отгородить этот участок поверхности. Шахтеры же продолжали работу.

В половине восьмого в шахте раздался «ужасный рев» и в штрек 5 обрушилась огромная масса насыщенной водой породы. По штреку потекла похожая на патоку река черного шлама, заливая все выработки. Грязь и торф заполнили проходы на северной стороне штрека и все галереи, ведущие к стволу; эта масса поднялась по главному стволу шахты и достигла глубины 8 м от его устья. В очистных выработках у верхнего края штрека 5 работали 11 человек; все они погибли в этом грязевом потоке. Еще два человека, стоявшие у конвейерных лент в нижнем конце штрека 5, были окружены жидким шламом и умерли медленной смертью. Шестерым шахтерам удалось подняться наверх по стволу шахты, но 116 человек сумели лишь пробраться к западному концу шахты, где они были впоследствии окружены шламом, заполнившим все галереи, ведущие к главному стволу. Благодаря счастливой случайности шахтеры оказались в той части шахты,

которая находилась на расстоянии всего 8 м от горизонтальной выработки в заброшенной угольной копи Банк.

В течение двух суток проводились четко организованные и полные драматизма спасательные работы. Был пробит туннель, соединивший обе шахты, и все 116 шахтеров целыми и невредимыми вышли по запасному выходу из заполненных газом выработок, протягивавшихся более чем на 1,5 км. Успех спасательной операции заставил забыть о том, что это была катастрофа, в которой погибло 13 человек.

Рассматривая случай в шахте Нокшиннох, следует задавать вопрос, не как произошла эта катастрофа, а почему она произошла. Расследование показало, что основной ее причиной было отсутствие согласованности в действиях разных служб. У планировщиков имелась геологическая карта района, и они знали, что в районе месторождения есть торфяная залежь. Однако они полагали, что угольный пласт простирается до разлома, а не до земной поверхности, и дали указание продолжать работы в штреке 5. У руководства шахты геологической карты не было, но оно знало, что при проходке этого штрека шахтеры выйдут на поверхность земли, а не к разлому. Поскольку согласно указаниям отдела планирования работы в штреке 5 должны были продолжаться, руководство шахты не видело никаких оснований, чтобы их прекратить.

Обе названные группы должностных лиц ошибались в отношении геологии этого участка. Отдел планирования исходил из прогноза равномерного падения угольного пласта на протяжении 300 м в направлении ожидаемого пересечения пласта угля и зоны разлома. При этом не учитывалось, что слои горных пород изгибаются при движении против плоскости разлома; при таком крупном разломе, как тот, что существовал к югу от Нокшинноха, угольный пласт вполне мог круто подняться в южном направлении. Кроме того, не принималось во внимание, что в районе, столь сложном в структурном отношении, вполне могли встретиться другие складки или разломы. Планировщики же были абсолютно уверены в правильности своих прогнозов. С другой стороны, руководство шахты ограничилось тем, что просто следило, как штрек 5 приближается к земной поверхности. А ведь было совершенно ясно, что вблизи ее есть вероятность встретить отложения, которые, учитывая историю оледенений данного района, могут представлять определенную опасность.

В ледниковую эпоху вся территория Шотландии была покрыта ледниками. Район Нокшиннох находится на северном конце узкой ледниковой долины Глен-Афтон, где развиты валунные глины, мощность которых не была точно установлена. В этих условиях невозможно предсказать, какими именно будут приповерхностные отложения, и следовало бы тщательно проверить направление штрека 5. Фермер — владелец поля над штреком — знал о существовании торфяного слоя. Ему было известно, что

земля здесь очень рыхлая и что на мокром участке растут камыши. Он видел торф и в канавах, окружавших поле, но фермера никто не спросил... Маркшейдеры, проверявшие уровень поверхности, установили, что «грунт несколько пропитан водой». Тем не менее никто не только не взглянул на геологическую карту, но даже не удосужился взять в руки лопату и сделать закопушку, чтобы посмотреть, что же там залегает.

Одна из рекомендаций, выработанных в ходе расследования катастрофы в шахте Нокшиннох, заключалась в следующем: ни одна горная выработка не должна приближаться к земной поверхности менее чем на 45 м, пока геология участка не будет изучена бурением или другими надежными методами; к этим методам может быть отнесена сейсморазведка. Кроме того, было рекомендовано еще до начала горных работ детально изучать геологию вышележащего участка.

Если бы в Нокшиннохе кто-нибудь, знавший расположение штрека 5, задумался над геологической обстановкой на этом участке, несчастья могло бы не быть. Если бы кто-нибудь хотя бы несколько минут побродил по полю, заглянул в канавы и бросил взгляд на геологическую карту или просто поболтал с фермером, тринадцать человеческих жизней были бы спасены. . .

Следует еще раз подчеркнуть основные правила геологических исследований. Первым этапом при решении любой геологической проблемы являются чтение карты, проверка всех возможных источников информации, отбор проб грунта, а затем — анализ всех вероятных последствий. Понять геологию погребенных пород обычно бывает нелегко; это почти невозможно сделать, если не будут пробурены десятки скважин. Очень часто мы имеем дело с огромным количеством фрагментарной информации, по которой необходимо установить истинное положение вещей. Если неправильно подобрать факты или же упустить какой-либо из них, то составить общую картину не удастся. А при строительстве и планировании неполнота геологической картины нередко приводит к катастрофе.

Будущее

Катастрофы в Лётшберге и Нокшиннохе служат примерами того, к чему приводит игнорирование геологических условий. Однако эти несчастья уже в прошлом, а сооружение туннеля Сейкан — это будущее. Строительство невероятного подводного туннеля в Японии еще не завершено, поэтому пока его нельзя рассматривать как пример успешной проходки, тем более что уже возникал ряд сложностей, связанных с проблемами затопления.

С другой стороны, туннель Сейкан совершенно уникален. При его строительстве уже удалось пройти грунт гораздо более трудный, чем в Нокшиннохе и Лётшберге. Когда сооружение

этого туннеля будет завершено, он станет олицетворением победы человека в борьбе с непокорными грунтами. Эта победа стала возможной только при современном уровне развития гражданского строительства.

Ход работ в туннеле Сейкан позволяет предполагать, что строительство будет завершено успешно. Это рискованное предприятие основано на результатах 25-летних геологических исследований и на анализе материалов, полученных при бурении множества скважин.

Если строительство туннеля Сейкан удастся успешно завершить, тогда практически любые другие работы под землей можно считать обычным делом при условии должного внимания к геологической обстановке. И наоборот, если при проведении любых горных работ или проходке туннелей в будущем произойдет катастрофа, вызванная особенностями грунтов, то причиной будет плохое знание геологии.

Но послужат ли прошлые катастрофы должным уроком или же человек по-прежнему не будет обращать внимания на геологическую обстановку и станет виновником новых бедствий?

Список литературы

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

- Bolt B. A., Horn W. L., Macdonald G. A., Scott R. F.*, 1975, *Geological Hazards*; Springer-Verlag, New York.
- Eiby G. A.*, 1967, *Earthquakes*; F. Muller, London.
- Heck N. H.*, 1936, *Earthquakes*; Oxford University Press.
- Lane F. W.*, 1945, *The Elements Rage*; Country Life, London.
- Oakeshott G. B.*, 1976, *Volcanoes and Earthquakes, Geologic Violence*; McGraw-Hill, New York.
- Richter C. F.*, 1958, *Elementary Seismology*; W. H. Freeman, San Francisco.
- (В названных работах анализируются отдельные землетрясения, описанные в данной главе).
- Link M. C.*, 1960, *Exploring the drowned city of Port Royal*; *National Geographic Magazine* 117, 151—64.

Разломы и землетрясения

- Bolt B. A.*, 1970, *Causes of earthquakes*; 21—45 in *Earthquake Engineering* Wiegel R. L. (ed.), Prentice-Hall, New Jersey.
- Brander J.*, 1976, *Turkey's earthquake*; *New Scientist* 72, 537.

Сопутствующие явления:

оползни, погружение
земной коры и цунами

- Eckel E. B.*, 1970, *The Alaska earthquake, March 27 1964; lessons and conclusions*; U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 546.
- Hansen W. R.*, 1974, *Some engineering geologic effects of the 1964 Alaska earthquake*; 193—210, in *La Géologie de l'Ingénieur*, Calembert L. (ed.), Soc. Géol. de Belgique.
- Miller R. D. and Dobrocolny E.*, 1959, *Surficial geology of Anchorage and vicinity, Alaska*; U. S. Geol. Surv. Bull., 1093.
- Clapperton C. M. and Hamilton P.*, 1971, *Peru beneath its eternal threat*; *Geographical Magazine* 43, 632—9.
- Ericksen G. E. and Plafker G.*, 1970, *Preliminary report on the geologic events associated with the May 31, 1970, Peru earthquake*; U. S. Geol. Surv. Circ., 639.
- Wiegel R. L.*, 1970, *Tsunamis*; 253—306, in *Earthquake Engineering*, Wiegel R. L. (ed.), Prentice-Hall, New Jersey.
- Bernstein J.*, 1954, *Tsunamis*; *Scient. Amer.* 191, 60—4.

Сейсмические пояса и устойчивые участки

- Anderson D. L.*, 1971, *The San Andreas Fault*; *Scient. Amer.* 225, 53—68.
- Iacopi R.*, 1971, *Earthquake Country*; Lane Books, California.
- Greensfeider R.*, 1971, *Seismologic and crustal movement investigations of the San Fernando earthquake*; *Calif. Geol. (Apr-May)*, 62—6.

Прогноз землетрясений

- Pakiser L. C., Eaton J. P., Healy J. H., Raleigh C. B.*, 1969, Earthquake Prediction and Control; Science 166, 1467—73.
Press F., 1975, Earthquake Prediction; Scient. Amer. 232, 14—23.
Rikitake T., 1976, Earthquake Prediction; Elsevier, Amsterdam.
Whitcomb J. H., Garmany J. D., Anderson D., L., 1973, Earthquake Prediction: Variation of Seismic Velocities before the San Francisco Earthquake; Science 180, 632—5.

Защита от землетрясений

- Kunze W. E., Fintel M., Amrhein J. E.*, 1963, Skopje earthquake damage; Civ. Eng. 33, 56—9.
Nichols D. R. and Buchanan-Banks J. M., 1974, Seismic Hazards and Land-Use Planning; U. S. Geol. Surv. Circ., 690.
Borcherdt R. D. (ed.), 1975, Basis for reduction of earthquake hazards, San Francisco Bay Region, California; U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 941-A.

ВУЛКАНЫ

- Bolt B. A., Horn W. L., Macdonald G. A., Scott R. F.*, 1975, Geological Hazards; Springer-Verlag, New York.
Francis P., 1976, Volcanoes; Penguin Books, London.
Macdonald G. A., 1972, Volcanoes; Prentice-Hall, New York.
Rittmann A. and L., 1976, Volcanoes; Orbis, London.
Wilcoxson K., 1967, Volcanoes; Cassel, London.
(В названных работах дается детальные описания многих примеров, рассматриваемых в данной главе).

Природа вулканической деятельности

- Foshag W. F. and Jernaro Gonzalez R.*, 1950, Birth and development of Paricutin Volcano; U. S. Geol. Surv. Bull., 965-D.
Bardarson H. R., 1972, Ice and Fire; H. R. Bardarson, Reykjavik.
Thorarinsson S., 1970, The Lakagigar eruption of 1783; Bull. volcan. Series 2, 33, 910—27.
Booth B., 1974, Persistent Etna; Geog. Mag. 46, 415—17.

Сила вулканических извержений

- Edey A. M.*, 1975, Lost World of the Aegean; Time Life International, Amsterdam.

Ущерб, наносимый извержениями

- Clapperton C. M.*, 1973, Eruption of Helgefell; Geog. Mag. 45, 482—6.
Clapperton C. M., 1973, Dying fire of a new volcano; Geog. Mag. 45, 623—7., 333—42.
Williams R. S. and Moore J. G., 1973, Iceland chills a lava flow; Geotimes 18 (8), 14—17.
Mason A. C. and Foster H. L., 1953, Diversion of Lava flows at Oshima, Japan; Am. Journ. Sci. 251, 249—58.
Murton B. J. and Shimabukuro S., 1974, Human adjustment to volcanic hazard in Puna District, Hawaii; 151—9, in White G. F. (ed.), Natural Hazards, Oxford University Press.

Прогноз вулканических извержений

- Crandell D. R. and Mullineaux D. R.*, 1975, Technique and Rationale of volcanic Hazards Appraisals in the Cascade Range, Northwestern United States; Environmental Geology 1, 23—32.

- Booth B.*, 1976, Predicting eruptions; *New Scientist* 71, 526—8.
Shimozuru D., 1971, A seismological approach to the prediction of volcanic eruptions, in *The surveillance and prediction of volcanic activity*, UNESCO Publication Earth Sciences 8, 19—45.

ОПОЛЗНИ

- Bolt B. A., Horn W. L., Macdonald G. A., Scott R. F.*, 1975, *Geological Hazards*; Springer Verlag, New York.
Brunsdon D., 1971, Ever-moving hillsides; *Geog. Mag.* 43, 759—64.
Leggett R. F., 1961, *Geology and engineering*; McGraw-Hill, New York.
Morton D. M. and Streitz R., 1967, Landslides; *Mineral Information Service* 20, 123—40.
Sharpe C. F. S., 1968, *Landslides and their related phenomena*; Cooper Square, New York.
Terzaghi K., 1950, Mechanics of landslides; 83—124, in *Application of geology to engineering practice*, Berkeley Volume, *Geol. Soc. Amer.*
Zaruba Q. and Mencl V., 1969, *Landslides and their control*; Elsevier, Amsterdam.
Mathews W. H. and McTaggart K. C., 1969, The Hope Landslide, British Columbia; *Proc. Geol. Assoc. Canada* 20, 65—75.
Voight B., 1977, *Rockslides and Avalanches*; Elsevier, Amsterdam.

Камнепады

- Watson R. A. and Wright H. E.*, 1969, The Saidmarreh Landslide, Iran; *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 123, 115—39.
Shreve R. L., 1968, Leakage and fluidization in air-layer lubricated avalanches; *Geol. Soc. Amer. Bull.* 79, 653—8.
Hsu K. J., 1975, Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rock-falls; *Geol. Soc. Amer. Bull.* 86, 129—40.
Shreve R. L., 1968, The Blackhawk Landslides; *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, 108.
Barney K. R., 1960, Madison Canyon Slide; *Civil Engineering* (Aug), 72—5.
Daly R. A., Miller W. G. and Rice G. S., 1912, Report of the commission appointed to investigate Turtle Mountain, Frank, Alberta; *Nat. Museum of Canada Memoir*, 27.

Обвалы

- Taylor F. M.*, 1966, A landslide at Matlock, Derbyshire, 1966; *Mercian Geol.* 1, 351—5.
Drouhin G., Gautier M. and Dervieux F., 1948, Slide and subsidence of the hills of St. Raphael — Telemly; *Proc. Second Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.* 5, 104—6.
Alden W. C., 1928, Landslide and flood at Gros Ventre, Wyoming; *Amer. Inst. Min. and Met. Eng.* 76, 347—58.

Вода в оползнях

- Jaeger C.*, 1969, The stability of partly immersed fissured rock masses and the Vajont rock slide; *Civ. Eng. and Public Works Rev.* 6, 1204—7.
Jaeger C., 1972, *Rock mechanics and engineering*; Cambridge University Press.
Kiersch G. A., 1964, Vajont Reservoir disaster; *Civil Engineering* 34, 32—9.
Muller L., 1964, The rock slide in the Vajont Valley; *Journ. Int. Soc. Rock Mech.* 2, 148—212.

Оползни в рыхлых породах

- Barton M. E.*, 1973; The degradation of the Barton Clay Cliffs of Hampshire; *Quart. Journ. Eng. Geol.* 6, 423—40.
Sullivan R., 1975, Geological hazards along the coast south of San Francisco; *Calif. Geol.* (Feb), 27—36.

Walcott C. D. (ed.), 1924, Report of the committee of the National Academy of Sciences on the Panama Canal slides; Mem. Nat. Acad. Sci., 18.

Attewell P. B. and Farmer I. W., 1976, Principles of engineering geology; Chapman and Hall, London.

Chandler R. J., 1970, The degradation of Lias clay slopes in an area of the east Midlands; Quart. Journ. Eng. Geol. 2, 161—81.

Skempton A. W., 1964, Long-term stability of clay slopes; Geotechnique 14, 75—101.

Оползни течения

Crawford C. B. and Eden W. J., 1963, Nicolet landslide of November, 1955, Quebec, Canada; Eng. Geol. Case Histories, Geol. Soc. Amer. 4, 45—50.

Holmsen P., 1953, Landslips in Norwegian quick-clays; Geotechnique 3, 187—94.

Tavenas F., Chagnon J. Y. and La Rochelle P., 1971, The Saint-Jean-Vianney landslide: observations and eyewitness accounts; Can. Geotech. Journ. 8, 463—78.

Kerr P. F., 1963, Quick clay; Sci. Am. 309, 132—41.

Skempton A. W. and Northey R. D., 1952, The sensitivity of clays; Geotechnique 3, 30—53.

Campbell R. H., 1975, Soil slips, debris flows and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California; U. S. Geol. Soc. Prof. Paper, 851.

Casagrande A., 1965, Role of the calculated risk in earthwork and foundation engineering; Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., Journ. Soil. Mech. Div. 91 (SM4), 1—40.

Aberfan Tribunal, 1967, Report of the Tribunal appointed to inquire into the disaster at Aberfan; HMSO, London.

Aberfan Tribunal, 1969, A selection of technical reports submitted to Aberfan Tribunal; HMSO, London.

Anderson J. G. C. and Trigg C. F., 1976, Case-histories in engineering geology; Elek Science, London.

Knox G., 1927, Landslides in South Wales valleys; Proc. S. Wales. Inst. Eng. 43, 161—247.

Powell D. L. J., 1939, The sliding of colliery rubbish tips; Powell Duffryn Company (reprinted in Aberfan Tribunal, 1967).

Watkins G. L., 1959, The stability of colliery spoilbanks; Colliery Engineering (Nov).

Bishop A. W., 1973, The stability of tips and spoil heaps; Quart. Journ. Eng. Geol. 6, 335—76.

Контроль над оползнями и их прогноз

Stevenson P. C., 1975, A predictive landslide survey and its social impact; Proc. 2nd. Aust. N. Z. Conf. Geomech. Brisbane. Inst. Eng. Australia, 10—15.

Franklin J. A. and Denton P. E., 1973, The monitoring of rock slopes; Quart. Journ. Eng. Geol. 6, 259—86.

Woods H. D., 1958, Causes of the Sear's Point landslide, Sonoma County, California; Eng. Geol. Case Histories, Geol. Soc. Amer. 2, 41—3.

Wood A. M. M., 1955, Folkestone Warren landslips: investigations 1948—1950; Proc. Inst. Civ. Eng. 4 (11), 410—28.

Huthinson J. N., 1969, A reconsideration of the coastal landslides at Folkestone Warren, Kent; Geotechnique 19, 6—38.

Viner-Brady N. E. V., 1955, Folkestone Warren landslips; remedial measures 1948—1954; Proc. Inst. Civ. Eng. 4 (11), 429—41.

НАВОДНЕНИЯ

International Commission on Large Dams, 1973, Lessons from dam incidents; ICOLD, Paris.

O'Connor R., 1957, Johnstown — the day the dam broke; London.

- Hoyt W. G. and Langbein W. B.*, 1955, Floods; Princeton University Press, Princeton, N. J.
- Newson M. D.*, 1975, Flooding and flood hazard; Oxford University Press.
- Legget R. F.*, 1962, Geology and engineering; McGraw-Hill, New York.
- Baker V. R.*, 1976, Hydrogeomorphic methods for the regional evaluation of flood hazards; *Environmental Geology* 1, 261—82.
- Harding D. M. and Parker D. J.*, 1974, Flood hazard at Shrewsbury, United Kingdom; 43—52, in White C. F. (ed), *Natural Hazards*, Oxford University Press.
- Kidson C.*, 1953, The Exmoor storm and the Lynmouth floods; *Geography* 38, 1—9.
- Cressey C. B.*, 1955, Land of the 500 Million; McGraw-Hill, New York.
- Todd O. J.*, 1936, A Runaway River Controlled; *Engineering News-Record* 116, 735—8.
- Todd O. J.*, 1942, Taming Flood Dragons along China's Hwang Ho; *Nat. Geog. Mag.* 81, 205—34.

Опасности при мероприятиях по водоснабжению

- Dresch J.*, 1973, On the fringes of drought and despair; *Geog. Mag.* 45, 786—7.
- Chappell J. E.*, 1974, Passing the Colorado salt; *Geog. Mag.* 46, 569—74.
- Squire R.*, 1964, Caves in the Tralee area, Co. Kerry, Eire; *Proc. Univ. Bristol Spel. Soc.* 10, 139—48.
- Alew T.*, 1972, Groundwater contamination from sinkhole dumps; *Caves and Karst* 14, 17—23.
- Quinlan J. F. and Rowe D. R.*, 1977, Hydrology and water quality in the Central Kentucky Karst, Phase I; Research Report 101, Univ. Kentucky Water Resources Research Institute.

Геологические проблемы при закладке плотин

- Guthrie Brown J.*, 1964, Discussion on dam disasters; *Proc. Inst. Civ. Eng.* 27, 366—8.
- International Commission on Large Dams*, 1973, Lessons from dam incidents; ICOLD, Paris.
- Smith N.*, 1971, A history of dams; Peter Davies, London.
- Walters R. C. S.*, 1971, Dam geology; Butterworth, London.
- Knill J. L.*, 1974, The application of engineering geology to the construction of dams in the United Kingdom; 113—47 in *La Géologie de l'Ingénieur*, Calembert L. (ed.), Soc. Geol. de Belgique.
- Ransome F. L.*, 1928, Geology of the St. Francis dam-site; *Econ. Geol.* 23, 553—63.
- Clements T.*, 1966, St. Francis Dam Failure of 1928: 89—91, in Lung R. and Proctor R. (eds), *Engineering Geology in Southern California*; Assoc. Eng. Geol. Arcadia, Calif.
- Outland C. F.*, 1963, Man-made Disaster, the story of the St. Francis Dam; A. H. Clark Co., Glendale, California.
- Jessup W. E.*, 1964, Baldwin Hills Dam failure; *Civil Engineering* (Feb), 62—4.
- James L. B.*, 1968, Failure of Baldwin Hills Reservoir, Los Angeles, California; *Engineering Geology Case Histories*, Geol. Soc. Amer. 6, 1—11.
- Hamilton D. H. and Meehan R. L.*, 1971, Ground Rupture in the Baldwin Hills; *Science* 172, 333—44.
- Jaeger C.*, 1963, The Malpasset Report; *Water Power* 15, 55—61.
- Jaeger C.*, 1972, Rock mechanics and engineering; Cambridge University Press.
- Appleton B.*, 1977, All BuRec designs to get independent check (Results of inquiry into Teton Dam failure); *New Civil Engineer* (13 Jan), 8—9.

ПРОСЕДАНИЕ ГРУНТА

- Allen A. S.*, 1969, Geologic settings of subsidence; *Reviews in Engineering Geology*, Geol. Soc. Amer. 2, 305—42.
Bolt V. A., *Horn W. L.*, *Macdonald G. A.*, *Scott R. F.*, 1975, *Geological Hazards*; Springer-Verlag, New York.
Leggett R. F., 1973; *Cities and Geology*; McGraw-Hill, New York.

Проседание при растворении пород

- Brune G.*, 1965, Anhydrite and gypsum problems in engineering geology; *Eng. Geol.* 2, 26—38.
Srikant S. V. and *Bhargava O. N.*, 1972, Subsidence sinkhole at Runjh (Himachal Pradesh, India); *Eng. Geol.* 6, 191—201.
Christiansen E. A., 1971, Geology of the Crater Lake Collapse Structure in Southeastern Saskatchewan; *Can. Journ. Earth Sci.* 8, 1505—13.
De Mille G., *Shouldice J. R.*, *Nelson H. W.*, 1964, Collapse structures related to evaporites of the Prairie Formation, Saskatchewan; *Geol. Soc. Amer. Bull.* 75, 307—16.
Bell F. G., 1975, Salt and subsidence in Cheshire, England; *Eng. Geol.* 9, 237—47.
Calvert A. F., 1915, *Salt in Cheshire*; Spon, London.
Evans W. B., *Wilson A. A.*, *Taylor B. J.*, *Price D.*, 1968, *Geology of the country around Macclesfield, Congleton, Crewe and Middlewich*; HMSO, London.
Walkwork K. L., 1960, Some problems of subsidence and land use in the Mid-Cheshire industrial area; *Geog. Journ.* 126, 191—9.

Проседание в неконсолидированных осадках

- Prokopovitch N. P.*, 1972, Land Subsidence and Population Growth; *Proc. 24th Int. Geol. Cong. (Montreal)* 13, 44—54.
Peck R. B., and *Bryant F. G.*, 1953, The bearing-capacity failure of the Transcona elevator; *Geotechnique* 3, 201—14.
Mann A., 1975, The inclination that defies explanation; *Telegraph Mag.* 537, 9—10.
Spencer C. B., 1953, Leaning Tower of Pisa; *Eng. New-Record* (2 Apr), 40—3.
Mitchell J. K., *Vivatrat V.*, *Lambe T. W.*, 1977, Foundation performance of Tower of Pisa; *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., Journ. Geotech. Eng. Div.* 103 (GT3), 227—49.

Проседание при удалении грунтовых жидкостей

- Poland J. F.*, *Lofgren B. E.*, *Ireland R. L.*, *Pugh R. G.*, 1975, Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1972; *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper* 437-H, 86.
Marsden S. S. and *Davis S. N.*, 1967, Geological Subsidence; *Scient. Amer.* 206, 93—100.
Davis G. H., *Small J. B.*, *Courts H. B.*, 1963, Land subsidence related to decline of artesian pressure in the Ocala Limestone at Savannah, Georgia; *Eng. Geol. Case Histories*, Geol. Soc. Amer. 4, 1—8.
Cooke R. U. and *Doornkamp J. C.*, 1974, *Geomorphology in Environmental Management*; Oxford University Press.
Berghinz C., 1971, Venice is sinking into the sea; *Civil Eng., Am. Soc. Civ. Eng. (Mar)*, 67—71.
O'Riordan N. J., 1975, The Venetian ideal; *Geog. Mag.* 47, 419—26.
Ricceri G. and *Butterfield R.*, 1974, An analysis of compressibility data from a deep borehole in Venice; *Geotechnique* 24, 175—92.
Loehnerberg A., 1958, Aspects of the sinking of Mexico City and proposed countermeasures; *Amer. Water Works Assoc. Journ.* 50, 432—40.

Poland J. F. and Davis G. H., 1969, Land subsidence due to withdrawal of fluids; Reviews in Eng. Geol., Geol. Soc. Amer. 2, 187—246.

Thornley J. H., Soencer C. B., Albin P., 1955, Mexico's Palace of Fine Arts settles ten feet; Civ. Eng. (June), 50—4.

Проседание и обрушение в кавернозных известняках

Sowers G. F., 1975, Failures in limestones in humid subtropics; Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. Journ. Geotech. Eng. Div. 101 (GT8), 771—87.

Trotman E. K. (ed.), 1963, Report on the investigations of Pen Park Hole, Bristol; Cave Res. Gp. Gt. Brit. Publication 12.

Kleywegt R. J. and Enslin J. F., 1975, The application of the gravity method to the problem of ground settlement and sinkhole formation in dolomite on the Far West Rand, South Africa; Proc. Hannover Symposium on Sinkholes and Subsidence, Int. Ass. Eng. Geol. Paper T 3—0.

Early K. R. and Dyer K. R., 1964, The use of a resistivity survey on a foundation site underlain by karst dolomite; Geotechnique 14, 341—8.

Coker A. E., Marshall R., Thomson N. S., 1969, Application of computer processed multispectral data to the discrimination of land collapse (sinkhole) prone areas in Florida; Proc. 6th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan 1, 65—77.

Kennedy J. M., 1968, A microwave radiometric study of buried karst topography; Geol. Soc. Amer. Bull. 79, 735—42.

Newton J. G., and Hyde L. W., 1971, Sinkhole problem in and near Roberts Industrial Subdivision, Birmingham, Alabama; Geol. Surv. Alabama, Circular 68.

Foose R. M., 1969, Mine dewatering and recharge in carbonate rocks near Hershey, Pennsylvania; Eng. Geol. Case Histories, Geol. Soc. Amer. 7, 45—60.

Van Horn F. B., 1910, A Cave-In Caused by an Underground Stream at Staunton, Virginia; Engineering News 64, 238—9.

North F. J., 1952, Some geological aspects of subsidence not related to mining; Proc. S. Wales Inst. Eng. 68, 127—58.

Aley T. J., Williams J. H., Massello J. W., 1972, Groundwater Contamination and Sinkhole Collapse induced by leaky impoundments in soluble rock terrain; Eng. Geol. Series, Missouri Geol. Surv., 5.

Bezuidenhout C. A. and Enslin J. F., 1970, Surface subsidence and sinkholes in the dolomitic areas of the Far West Rand, Transvaal, Republic of South Africa; in Land Subsidence, Publication no. 88, Assoc. Internal. Hydrol. Scient., UNESCO2, 482—95.

Brink A. B. A. and Partridge T. C., 1965, Transvaal Karst; Some Considerations of Development and Morphology with Special Reference to Sinkholes and Subsidence on the Far West Rand; South African Geog. Journ. 47, 11—34.

Foose R. M., 1967, Sinkhole Formation by Groundwater Removal: Far West Rand, South Africa; Science 157, 1045—8.

Обрушение и проседание над горными выработками

Anon, 1916, More Mine Cave-Ins Threaten Parts of Scranton; Eng. News 76, 280—2.

Dean J. W., 1967, Old Mine Shafts and their Hazards; Min. Eng. 126, 368—80.

Lee A. J., 1966, The Effect of Faulting on Mining Subsidence; Min. Eng. 125, 735—45.

Orchard R. J., 1973, Some Aspects of Subsidence in the U. K.; Proc. Fourth Ann. Symp. Illawarra, Austral. Inst. Min. Met. Paper 3.

ПОДЗЕМНЫЕ АВАРИИ

Beaver P., 1972, History of tunnels; P. Davies, London.

Jacobs J. D., 1975, Some tunnel failures and what they have taught; in Hazards in tunnelling and on falsework, Institute of Civil Engineers, London, 37—46.

Sandström G. A., 1963, The history of tunnelling; Barrie and Rockcliffe, London.

Опасное воздействие подземных вод

Hayward D., 1977, Tale of a tunnel (Seikan Tunnel); *New Civil Engineer* (19 May), 29—37.

Cousens R. R. and *Garrett W. S.*, 1970, The flooding at West Driefontein mine, South Africa; *Proc. 9th Commonwealth Cong. Min. Met.* 1, 931—87.

Угроза погребенных долин

Sandström G. A., 1963, Trouble in Lötschberg; 330—9, in *The history of tunnelling*, Barrie and Rockcliffe, London.

Проблемы горных работ в породах со сложной структурой

Spooner J. (ed.), 1971, Mufulira interim report; *Min. Journ.* 276, 122.

Проблемы при разработке месторождений угля

Marshall J. S., 1971, Outburst of coal and firedamp et Cynheidre/Pentremaur Colliery Carmarthenshire, Report; HMSO, London.

Duckham H. and *B.*, 1973, Great pit disasters; David and Charles, Newton Abbot.

Overbey W. K., *Komar C. A.*, *Pasini J.*, 1973, Predicting probable roof fall areas in advance of mining by geological analysis; *U. S. Bur. Mines Tech. Proj. Report*, 70.

Bryan A., 1951, Accident at Knockshinnoch Castle Colliery Ayrshire, Report; HMSO, London.

Толковый словарь

- Аллювий* — осадки, отложенные рек (глины, алевриты, песок, гравий).
- Ангидрит* — минерал, безводный сульфат кальция.
- Андезит* — тип вулканической лавы со средним содержанием кремнезема.
- Антиклиналь* — складка горных пород, обращенная выпуклостью вверх.
- Артезианский напор* — естественное давление в грунтовых водах, заставляющее их подниматься из скважин выше уровня земной поверхности.
- Афтершок* — слабый толчок, который следует за более сильным землетрясением.
- Базальт* — тип вулканической лавы с низким содержанием кремнезема.
- Бентонит* — разновидность глин с высоким содержанием монтмориллонита.
- Биотит* — силикатный минерал, железомagneзиальная слюда.
- Буна* — искусственный барьер, возведенный в приливно-отливной полосе или на пляже для ослабления эрозии берега и уменьшения переноса осадков под воздействием волн.
- Вечная (многолетняя) мерзлота* — постоянно замороженный горизонт, залегающий под поверхностным слоем грунтов.
- Водоносный горизонт* — пласт горной породы, насыщенный грунтовыми водами.
- Галечниковая морена* — общий термин для обозначения несортированных рыхлых отложений, в основном солифлюкционного происхождения.
- Гидравлический напор* — давление подземных вод, зависящее от глубины залегания водоносного горизонта, выражается высотой вертикального столба воды.
- Гидравлическое уплотнение* — уплотнение осадков под воздействием вод.
- Гнейс* — кристаллическая метаморфическая порода, характеризующаяся сланцеватостью — ориентированным расположением минералов.
- Гранит* — грубозернистая богатая кремнеземом изверженная порода, содержащая также полевые шпаты и слюды.
- Дамба* — естественная или искусственная насыпь, расположенная вдоль реки или в ее пойме.
- Дациит* — тип вулканической лавы с высоким содержанием кремнезема.
- Дилатация* — деформация, связанная с изменением объема.
- Доломит* — минерал кальциево-магнезиально-карбонатного состава или порода, состоящая в основном из этого минерала, по свойствам и внешнему облику сходная с известняком.
- Жильная глина* — тонкозернистая пылевидная порода, образующаяся вдоль некоторых разломов.
- Забой* — углубляемое в толщу пород окончание горной выработки.
- Зеленый сланец* — разновидность сланцев с высоким содержанием зеленых силикатных минералов.
- Зеркало скольжения* — гладкая поверхность, отполированная трением блоков пород, перемещающихся вдоль разлома или относительно друг друга.
- Игнимбрит* — тип вулканического пепла, который падает на землю еще горячим и спекается в твердую породу.

Изверженная порода — горная порода, образовавшаяся при кристаллизации расплавленной жидкой магмы.

Кальдера — большая воронка, образующаяся вследствие обрушения вершины вулкана.

Кальцит — минерал кальциево-карбонатного состава, основной компонент известняка.

Каменная соль — минерал, хлорид натрия.

Карстовая воронка — отверстие или полость, обычно в известняковой толще, образовавшаяся в результате растворения пород водой.

Кварцит — прочная кристаллическая порода, состоящая в основном из кварца.

Конгломерат — осадочная порода, включающая округлые обломки не менее 1 см в поперечнике.

Кристаллический сланец — метаморфическая порода, легко подвергается смятию.

Лава — расплавленная жидкая или вязкая масса, вытекающая на поверхность при извержении вулканов.

Лапилли — вулканическая тефра размером от горошины до грецкого ореха.

Лёсс — мелкозернистые эоловые алевритовые осадки.

Магма — расплавленная огненно-жидкая масса, образующаяся в земной коре.

Мергель — осадочная порода смешанного глинисто-карбонатного состава.

Метаморфическая порода — порода, преобразованная под воздействием теплоты и (или) давления (без полного плавления) глубоко в недрах земли.

Монтмориллонит — разновидность глинистого минерала, способная впитывать огромные количества воды.

Морена — отложения ледникового происхождения.

Надвиг — разлом, в котором горизонтальное смещение пород преобладает над вертикальным.

Наклономер — прибор, позволяющий отмечать незначительные изменения в наклоне земной поверхности.

Озерная глина — глина, отложившаяся в озере.

Осадочная порода — горная порода, образовавшаяся вследствие накопления обломочного материала в водоемах или на поверхности земли.

Пегматит — преимущественно грубозернистая порода, обычно залегающая в магматических породах в форме жил, линз или гнезд.

Перигляциальный — относящийся к холодным условиям, при которых возникает вечная мерзлота и часто наблюдаются солифлюкция и оползни.

Риолит — очень вязкая вулканическая лава с высоким содержанием кремнезема.

Равнина — поверхность, разграничивающая коренные породы и перекрывающие их неуплотненные отложения.

Сейсмические пояса — зоны на земной поверхности, главным образом вдоль границ плит, где особенно часто происходят землетрясения.

Сейсмограф — прибор для обнаружения слабых колебаний грунта.

Серицит — рыхлый, легко подвергающийся смятию глиноподобный минерал; обычно образуется как продукт изменения изверженных или метаморфических пород.

Синклиналь — складка горных пород, обращенная выпуклостью вниз.

Сланцеватость — параллельная ориентировка пластинчатых минералов в кристаллических сланцах и других горных породах.

Солифлюкция — медленное, постоянное движение вниз по склону пород, насыщенных водой, но не способных к жидкому течению.

Тектонический — любая структура или процесс, связанные со значительными движениями земной коры.

Тефра — обломочный материал, образующийся при извержении вулкана и включающий вулканический пепел, лапилли, туфы и вулканические бомбы.

Туф — вулканическая тефра, представленная угловатыми обломками размером с песчинку и мельче.

Уплотнение — уменьшение объема осадков под воздействием нагрузки вышележащих толщ горных пород.

Фельзит — среднезернистая светлоокрашенная изверженная порода.

Филлит — мелкозернистая сланцеватая метаморфическая порода с шелковистым блеском.

Флювиогляциальный — отложившийся в результате деятельности водных потоков, связанных с ледниками.

Фумарола — выход горячего вулканического газа и пара из трещин или каналов на поверхности вулкана либо неостывшей лавы.

Цунами — огромная морская волна, возникающая во время землетрясений или извержений вулканов.

«Чувствительная» глина — глина, которая деформируется и даже разжижается, теряя прочность, при дислокациях или вибрации.

Штольня — почти горизонтальная горная выработка.

Эпицентр — точка на земной поверхности, расположенная непосредственно над фокусом землетрясения.

Предметный указатель

- «Аква альта» (высокая вода) 158
Аллювий 151, 164
Ангидрит 143
Асмари, известняк 73
- Базальт 48, 81
Блэк-Риф, кварциты 169
Бутлеггер-Коув-Клей, глинистая толща 20, 21, 43, 96
- Взрывы 196, 197
Витватерсранд, осадочная серия 169
Водохранилища 122, 123
Воды грунтовые 154, 156, 167, 168
 дождевые 97
 подземные 180—185
 талые 51, 83
Волны сейсмические 11, 12
Воронки карстовые 165
Вулканы 44—70
 защита 70
 зоны распространения 62—64
 контроль 68, 69
 прогноз 62—69
 сопутствующие явления 46
 ущерб 56—62
- Гейзеры 51
Геофизика сейсмическая 187
Гилс 143, 164
Глина каолиновая 125
 третичная 91
 уплотнение 151
 чувствительная 21, 94
Градиенты гидравлические 121
Границы плит 15, 63, 64
- Дельты 150, 151
Дождь 83, 103, 111
Долины погребенные 185—189
Доломит 166, 169, 183—185
- Заливание 122, 123
Землетрясения 9—43
 афтершоки 11, 13
 волны 11
 защита 38—43
 магнитуда 12
 пояса 28
 предварительные толчки 34
 прогноз 34—38
 происхождение 13
 сила 12
 сопутствующие явления 19—28
- Известняк 73, 86, 122, 126, 142, 156, 163, 182, 183
Инклинометр 104
- Кару, серия 169, 170
Камнепады 72—79
Консолидация 150
Кора земная 13
Кукарача, свита 92
- Лава 44—46, 49, 58—62, 164
Лавины 24, 25
Леда, глина 94
Ледники 186, 190, 202
Лёсс 152
Лондон-Клей, глины 156
- Магма 44, 48, 49, 53, 67
Магнитуда 12
Мел 163, 164
Механика грунтов 90
Монтмориллонит 161
- Наводнения 111—141
Нефть, добыча 133, 156, 157
- Обвалы 80—83
Обезвоживание 72
Окала, известняки 156

Оползни 71—109
 вода 83—90
 механизмы 71, 72
 прогноз и контроль 102—109
Оползни в рыхлых породах 90—93
Оползни течения 93—102
Осадка неравномерная 153

Пеннант, песчаники 99
Пепел вулканический 50
Периоды ледниковые 186
Плотины 123—141
 обрушения 123—141
 фундаменты 123—139
Поймы 111, 112
Провалы 147
Проседание грунта 142—179
 горные выработки 173—178
 кавернозные известняки 163—173
 неконсолидированные осадки
 149—155
 перспективы 178—179
 прогноз 142, 178—179
 растворение пород 142—149
 удаление грунтовых жидкостей
 154—163
Проседание торфа 150
Пыль угольная 197

Разломы 191
Рихтера шкала 12
Рокхед 185

Сейсмографы 36
Сейши 22
Система оповещения о цунами 27
Системы гидроэнергетические 191
Сланцы аспидные 75
Солифлюкция 103
Соль каменная 142, 143
 добыча 144—149
Сульфат кальция 143

Тенслип, песчаники 81
Теория источника расширения 14
Теория упругого восстановления 13
Тэфра 50
Трещины 14, 19
Туннели 180—183, 187—189, 191—193

Уплотнение 150

Цунами 26

Шахты золоторудные 168, 169, 183—
 185, 194
 угольные 176, 196—202

Шумы в породах 104

Эдейл, сланцы 85
Эрозия 71, 126

Географический указатель

- Аберфан** * 98, 99, 101, 102, 109, 110
Авали, туннель 182
Австралия 114
Агадир 30
Аделаида-Майн, шахта 147
Алеутские острова 26, 27
Алжир 30, 81, 127, 131
Аляска 11, 19, 20, 27, 41, 43, 70, 96
Анатолийского разлома зона 16—18, 35
Англия
 землетрясения 5, 30
 оползни 81, 84, 91
 подземные аварии 182, 186, 198
 проседание грунта 150—152, 164, 174, 178
Анкоридж 20, 21, 43, 96
Антрим 81
Аппалачи, горы 167

Бад-Франкенхаузен 143
Бангладеш 113
Бартон 91
Безымянный 66
Бейлайз 151
Бери-Сент-Эдмендс, см. Жаклин-Клоуз 175, 179
Бирехиганга, долина реки 76
Бирма 19
Бирмингем (Алабама) 166
Блэк-Хок 74
Болдуин-Хиллс, водохранилище 132, 134
Болдуин-Хиллс, плотина 137
Брахмапутра, река 113
Брисбейн, река 114
Бристоль 151, 164, 166
Британские острова 30
Буффало-Крик 109, 110

Ваггиталь, гидротехнический канал 186
Вайонт, плотина 85, 86, 88—90, 104, 109

Вайссенштайн, туннель 186
Валдиз 20, 41
Вандерфонтейн, долина 168, 170—173, 183
Ван-Норман, водохранилище 32, 115
Ватнайёкюдль 5, 45, 51
Везувий 45—48, 59, 64, 68, 97
Венесуэла 13
Венеция 142, 157—159, 160
Вердаль, долина 95
Вестманнаэйяр 56—59

Гавайи 27, 44, 49, 59, 60, 63, 65, 68—70, 193
Ганг, река 12, 43
Гандлова 91, 106
Ганьсу 23, 96
Гвадалентин, река 126
Гвадалупе 62
Гватемала 9
Гекла 50, 51
Геркуланум 47, 48, 50, 97
Гётеборг 95
Гималаи 15, 35, 76
Гималаи—Средиземноморье, сейсмический пояс 15, 16, 28—30
Гольдау 84
Гонконг 83, 84
Грехенберг, туннель 183
Гримсвёти 51
Гро-Вентр, долина реки 81—84

Дейл-Дайк 126
Денвер (Колорадо) 37, 38
Джонстаун 111
Дин-У-Дэвис, водохранилище 122
Долгаррог 123, 124

Жаклин-Клоуз, Бери-Сент-Эдмендс 175, 179

Загрос, горы 73, 74
Замбия 194
Зелёнка, угольный рудник 199

* Жирным шрифтом выделены катастрофы, рассмотренные в книге более подробно.

Инглвуд, разлом 133, 134, 136
Индия 12, 26, 83, 113, 144, 199
Индонезия 61, 65
Иокогама 9, 15
Иран 72, 73
Ирландия 30, 121
Исландия 45, 46, 50, 51, 56, 57, 64,
70, 164
Испания 113, 126
Италия 19, 23, 29, 30, 39, 44, 46, 49,
59, 72
Кабир-Кух 72, 74
Кайфын 117, 118
Калабрия 19, 23, 29
Калифорния
землетрясения 13, 14, 16, 18, 23,
27, 31, 35, 38, 40—42
наводнения 127, 129, 132
оползни 72, 74, 96, 103, 105
подземные аварии 182, 197
проседание грунта 150, 152, 154
Канада 71, 78, 91, 93, 95, 105, 144,
151, 191
Капохо 59, 61, 68
Каракас 13
Карлсруэ 141
Карлтонвилль 169—172
Каскадные горы 61, 65, 71
Катла 51
Катмай, гора 70
Квиншей, железнодорожный туннель
191
Келуд 61, 65
Кемано, туннель 191
Килауэа 59, 61, 65, 68, 69
Киркефедль 57, 58, 60, 61, 70
Китай 23, 32—34, 96, 112, 117, 127,
156, 197
Койна, водохранилище 37
Колорадо, река (Техас) 120—122
Колумбийское плато 49
Колчестер 31
Консепсьон 27
Коудти, водохранилище 123, 124
Кракатау 44, 49, 52, 64
Кратер, озеро 144
Кресент-Сити (Калифорния) 27, 28
Лаки 45, 46, 48
Ламартин, плотина 30
Ламингтон, гора 45, 56, 66, 70
Лемонтайм, туннель 191
Лётшберг, туннель 187—190, 203, 204
Ле-Шерфа, плотина 131, 132, 137, 140
Ливан 182
Линмут 116, 117
Лиссабон 9, 28, 29, 35
Лоен, озеро 83
Лонгароне 88

Лонг-Бич 157
Лос-Анджелес 18, 31, 32, 37, 40, 41, 90,
115, 128, 129, 132, 134, 156, 160, 197
Лофтхауз, угольный рудник 199

Макмиллан, водохранилище 123
Мальпассе 137, 139, 140
Мам-Тор 84, 85
Манагуа 9, 41
Мангла, плотина 122
Мартиника 54
Матлок 80, 174
Мауна-Лоа 49, 60, 61, 69
Маунт-Ток 86—89, 104
Мексика 44, 70, 120
Мерапи 64
Мерсей, туннель 181
Мехико 157, 160—163
Мид 37, 122
Миссисипи 19, 20, 115, 151
Михара 59
Мовуазен 187
Мон-Пеле 52, 54—56, 62, 64, 66
Монте-Конто 76
Мурадие 17
Мургаб, долина реки 76
Муфулира, рудник 194, 195

Непал 5, 83
Нингата 21, 22, 39, 156
Никарагуа 16, 41
Николе 93—95, 109, 110
Новая Гвинея 45, 56, 66, 70
Новая Зеландия 70, 97
Нокшиннох-Касл, угольный рудник
199—204
Норвегия 83, 95, 105, 191, 193
Нортуич 145, 147, 149

Окленд 19, 42, 43
Орлеанвиль 30, 127
Остин, плотина 123, 125
Ост-Индия 15, 56, 64, 70

Пакистан 122
Палмдейл, лавовый купол 37
Памир 76
Панамский канал 92
Парикутин, вулкан 44
Перу 15, 23—25, 44, 183
Пиза, падающая башня 152—154
Платтенберг 75
Плёр 76
Польша 199
Помпеи 47, 50, 51
Понтеба, плотина 127
Порт-Ройал 10, 19
Португалия 28
Принс-Вильям, залив 20
Пуеуе 66

- Пуэнтес, плотина 126
 Пьяве, река 85, 88, 89
 Ранд 168, 169, 183
 Ранраирка 24—26
 Рейн, река 76, 141
 Рейнир, вулкан 50
 Рифт-Велли, система 63
 Россберг 80
 Руапеху, вулкан 97
 Рундж 144
 Сагами, залив 23
 Саидмаррех 72, 73
 Сакраменто, дельта реки 150
 Сан-Андреас, разлом 18, 31, 35, 37, 38, 40—43, 91, 127
 Сангай 65
 Санта-Моника 96, 103
 Санторин 52—54
 Сантус 83
 Сан-Фернандо 23, 31, 32, 40, 115, 129, 197
 Сан-Франциско 9, 11, 12, 14, 18, 19, 22, 23, 31, 34, 41, 42, 91, 96, 127
 Сан-Хасинто, туннель 182
 Сан-Хаокин, долина 154, 155
 Саут-Форк, плотина 111, 124
 Сахель 120
 Северн, туннель 182
 Сейкан, туннель 181, 203, 204
 Селби, месторождение угля 176, 177
 Сен-Готтард, туннель 187
 Сен-Жан-Вьянней 95, 110
 Сен-Пьер 54—56, 62, 66
 Сент-Франсис, плотина и озеро (Арканзас) 20, 127, 129—131, 137, 140
 Сиань 33
 Силфинидд 99, 102
 Симплонский туннель 192, 194
 Синфэндзян, плотина 127
 Скай, остров 81
 Скогн, туннель 193
 Скопье 9, 30, 39
 Советский Союз 36, 143
 Соединенные Штаты Америки
 вулканы 49, 50, 51, 61, 65, 68, 69
 землетрясения 14, 15, 23, 37
 наводнения 112, 114, 120—123, 140
 оползни 76, 81, 92, 109
 проседание грунта 143, 150, 151, 157
 Солтон-Си 120
 Срединный Атлантический хребет 63, 64
 Сток-он-Трент 30, 31
 Стонтон (Виргиния) 168
 Стромболи 44
 Суматра 52
 Сумбава 56
 Сурте 95
 Суфрнер, гора 62, 66
 Тааль 64, 67
 Тайвань 33
 Тамбора 56
 Таина, туннель 180, 192
 Таншань 33
 Тарбелла, плотина 122
 Тасмания 103, 191
 Тёрнегейн-Хайтс 20, 21, 43
 Титон, плотина 140, 141
 Тихий океан 9, 14, 20, 24, 27, 28, 33, 91
 Токио 9, 15, 39, 41, 59, 156, 180, 192
 Трент, река 151
 Тристан-да-Кунья 62, 68
 Турция 16, 17, 35
 Уайтхорс 91
 Уарас 24, 25
 Уаскаран 24, 77
 Уз, река 177
 Уилмингтон, месторождение нефти 157
 Уилсон, туннель 193
 Уиттон, провал 147
 Уоркингтон, угольный рудник 198
 Уэльс 30, 98, 99, 123, 126, 127, 145, 168, 182, 183, 197
 Уэст-Драйфонтейн, прииск 170, 173, 183, 184
 Федеративная Республика Германии 143
 Филиппины 16, 64, 67
 Флоренция 114
 Фолкстон-Уоррен 106
 Форт-Пек, плотина 97
 Франк (Канада) 77—80, 109, 110
 Франция 91, 122, 125, 138, 164
 Фрежюс 137, 138
 Фриули 30
 Хебген, озеро 23, 77
 Хеймаэй 57, 58
 Херши, долина 167, 168
 Хигатура 56, 70
 Хидден-Ривер-Кейв, река подземная 121, 122
 Хило 27, 28, 60, 61, 69
 Хоккайдо 39, 181
 Холлистер 14, 35
 Хонкейко, угольный рудник 197
 Хоп (Канада) 71
 Хрустальный грот (Калифорния) 13
 Хуанхэ, река 23, 117—119
 Хувер, плотина 122
 Цзюмун 83
 Часнала, угольный рудник 199
 Чехословакия 80, 91, 106
 Чешир 145, 146, 149

Чили 27, 34, 66, 70
Чимботе 24, 25

Шанхай 156
Швейцария 75, 76, 80, 183, 186, 187,
190, 192
Швеция 95
Шотландия 30, 81, 199, 200, 202
Шэньси 33

Эйджайо, плотина 123, 124, 126
Эквадор 51, 65
Электрон, грязевой поток 50

Эльм, Швейцария 75
Этна 49, 60, 64, 65

Югославия 30, 122
Южная Африка 168, 177, 178
Юнгай 25, 26, 77

Ява 52, 56, 64
Якутат, залив 14
Ямайка 10, 19
Янцзы 112, 113
Япония 15, 22, 23, 26, 27, 39, 49, 67,
68, 104, 156, 181, 192, 203

Оглавление

От редактора	5
Предисловие	7
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ	9
Сейсмические волны и движения земной поверхности	11
Разломы и землетрясения	13
Сопутствующие явления: оползни, погружение земной коры и цунами	19
Сейсмические пояса и устойчивые участки	28
Прогноз землетрясений	34
Защита от землетрясений	38
Будущее	42
ВУЛКАНЫ	44
Природа вулканической деятельности	45
Сила вулканических извержений	52
Ущерб, наносимый извержениями	56
Прогноз вулканических извержений	62
Будущее	69
ОПОЛЗНИ	71
Камнепады	72
Обвалы	80
Вода в оползнях	83
Оползни в рыхлых породах	90
Оползни течения	93
Контроль над оползнями и их прогноз	102
Будущее	109
НАВОДНЕНИЯ	111
Пойменные наводнения	112
Опасности при мероприятиях по водоснабжению	120
Геологические проблемы при закладке плотин	123
Будущее	140
ПРОСЕДАНИЕ ГРУНТА	142
Проседание при растворении пород	—
Проседание в неконсолидированных осадках	149
Проседание при удалении грунтовых жидкостей	154
Проседание и обрушение в кавернозных известняках	163
Обрушение и проседание над горными выработками	173
Будущее	178

ПОДЗЕМНЫЕ АВАРИИ	180
Опасное воздействие подземных вод	—
Угроза погребенных долин	185
Проблемы горных работ в породах со сложной структурой	190
Проблемы при разработке месторождений угля	196
Будущее	203
Список литературы	205
Толковый словарь	213
Предметный указатель	216
Географический указатель	218

ТОНИ УОЛТХЭМ

КАТАСТРОФЫ: неистовая Земля

* * *

Редактор издательства *Л. Г. Ермолаева*
Переплет художника *В. Т. Левченко*
Технический редактор *И. Г. Сидорова*
Корректор *Н. Д. Баримова*

ИБ № 4785

Сдано в набор 25.03.82. Подписано в печать 17.08.82.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1 и мелованная.
Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл.
печ. л. 16,00. Уч.-изд. л. 17,79. Усл. кр.-отт. 16,00.
Тираж 20 000 экз. Заказ 103/614. Цена 1 р. 30 к.

Ордена «Знак Почета»
издательство «Недра». Ленинградское отделение.
193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового
Красного Знамени Ленинградского объединения
«Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете
СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли.
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10.

3790