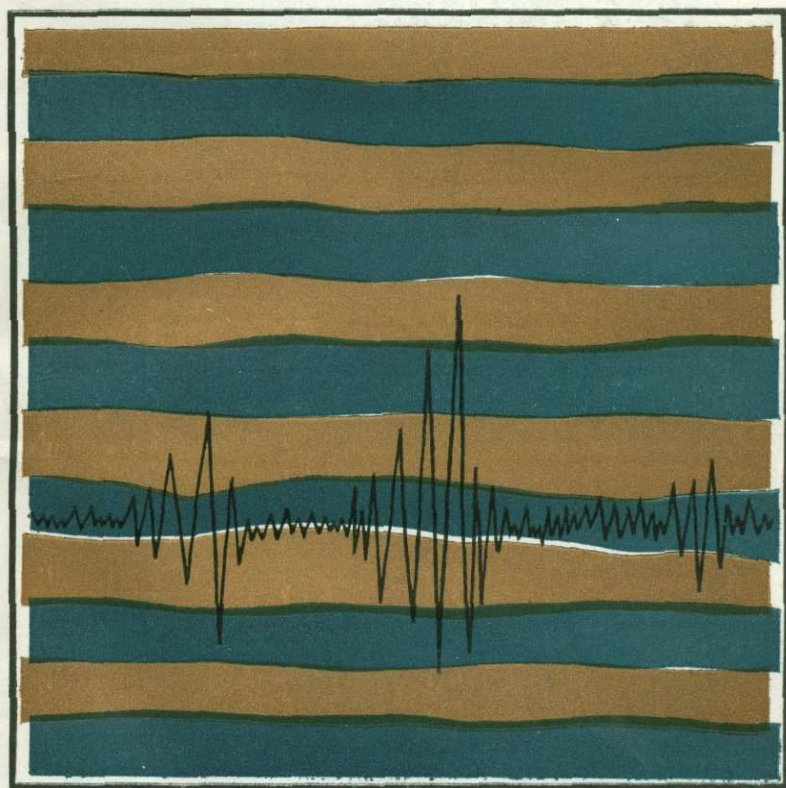


И. Г. КИССИН

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
И ПОДЗЕМНЫЕ
ВОДЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Серия
«Человек и окружающая среда»

И. Г. КИССИН

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
И ПОДЗЕМНЫЕ
ВОДЫ

3737



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1982

К 44 Киссин И. Г. Землетрясения и подземные воды.— М.: Наука, 1982.— 176 с., ил.— (Серия «Человек и окружающая среда»).

Природа землетрясений издавна привлекает внимание ученых. Специалистам-сейсмологам удалось установить, что в некоторых случаях землетрясения могут быть вызваны деятельностью человека. Книга посвящена одному из новых научных направлений, которое развивается на стыке гидрогеологии и сейсмологии. В ней рассматривается взаимосвязь и взаимозависимость подземных вод и землетрясений. Особое внимание уделяется проблеме прогноза землетрясений и использованию с этой целью данных об изменении режима подземных вод и газов.

19.3.2

Ответственный редактор

Член-корреспондент АН СССР

И. Е. ГУБИН

ВВЕДЕНИЕ

В недрах нашей планеты непрерывно происходят внутренние процессы, изменяющие лик Земли. Чаще всего эти изменения медленные, постепенные. Точные измерения показывают, что одни участки земной поверхности поднимаются, другие — опускаются. Не остаются постоянными даже расстояния между континентами. Иногда внутриземные процессы протекают бурно и грозная стихия землетрясений или вулканических извержений превращает в развалины города, опустошает целые районы.

Под угрозой землетрясений находятся обширные территории, многие густонаселенные области и даже целые страны, например Япония. Наибольшая опасность землетрясений заключается в их неожиданности и неотвратимости. Однако научные достижения последних лет открывают реальные возможности не только предсказывать землетрясения, но и влиять на их ход.

Известно много случаев, когда землетрясения были вызваны деятельностью человека. Выяснилось, что эффективным инструментом воздействия человека на природные сейсмические явления служит вода.

Книга эта — о связи землетрясений с подземными водами. Подземные воды повсеместно распространены в верхней части земной коры. Значение их как важнейшего полезного ископаемого трудно переоценить. Это — лучший источник водоснабжения. Минеральные воды незаменимы для лечения многих болезней, горячие (термальные) — один из немногих возобновляемых источников энергии, промышленные воды, содержащие ценные минеральные компоненты, используются как химическое сырье. Подземные воды — наиболее подвижная составная часть земной коры — принимают участие во многих геологических процессах, к числу которых относятся и сейсмические.

В наше время становится привычным тесное взаимо-

действие различных наук. Еще недавно сейсмология (наука о землетрясениях) и гидрогеология (наука о подземных водах) имели мало точек соприкосновения. Но в последние 10—15 лет выяснилось, что подземные воды могут влиять на процессы подготовки землетрясений, а некоторые изменения количественных и качественных характеристик подземных вод и газов служат предвестниками землетрясений.

Имеются и другие проявления связи подземных вод и землетрясений. В зависимости от уровня подземных вод изменяется интенсивность землетрясений. Например, разрушительный эффект сейсмического толчка гораздо сильнее на участке, где подземные воды находятся на глубине 1 м, чем на участке с уровнем вод на 10-метровой глубине. Сильные землетрясения оказывают большое влияние на подземные воды: появляются новые и исчезают существующие источники, изменяется расход и качество подземных вод.

Особая роль принадлежит подземным водам в механизме землетрясений, связанных с деятельностью человека. Известно много примеров, когда нарушение естественных равновесий приводит к неблагоприятному развитию природных процессов. Геологическая среда — все те объекты земной коры и земной поверхности, которые подвержены воздействию человека, — казалось бы, представляет собой наиболее устойчивую и прочную часть окружающей среды. Однако опыт показывает, что осуществляемое с небольшими энергетическими затратами вмешательство человека путем воздействия на водный режим способно вызвать сильные и даже разрушительные землетрясения.

Большинство вопросов, относящихся к связям землетрясений и подземных вод, возникло совсем недавно. Некоторые из этих вопросов находятся в начальной стадии разработки. Естественно поэтому, что не все положения, затронутые в настоящей книге, бесспорны. Видимо, это неизбежно, когда речь идет о новом направлении исследований, к которому относятся гидрогеологические методы в сейсмологии.

РАЗРУШИТЕЛЬНАЯ СТИХИЯ

Из летописи сильнейших землетрясений

4 апреля 1979 г. в Париже, в одном из залов штаб-квартиры ЮНЕСКО, демонстрировался фильм. Японские сейсмологи и кинодокументалисты собрали уникальные кадры, снятые во время сильнейших землетрясений XX в. Разваливаются здания, опрокидываются поезда, огромные волны накатываются на берег, смывая все на своем пути. В зале сидели участники Международного симпозиума по прогнозированию землетрясений. Среди них были крупнейшие сейсмологи из Японии, Советского Союза, США и многих других стран. Но даже эти люди, хорошо знакомые с последствиями сильных землетрясений, выходили из зала, пораженные буйством подземной стихии.

Землетрясения периодически происходят в разных частях земного шара и по своим разрушительным последствиям занимают главное место в ряду природных катастроф. Из исторических источников известны описания сильнейших землетрясений в бассейне Средиземного моря, в Китае, Японии и других странах.

Землетрясение на побережье Средиземного моря в 526 г. н. э. вызвало значительные разрушения, при этом погибло около 200 тыс. человек. В Китае, в провинции Шэньси в результате катастрофического землетрясения 23 января 1556 г. число человеческих жертв достигло 830 тыс. Крестьяне, жившие в пещерах, были погребены под толщей обрушившейся лёссовой породы. Много людей погибло также от голода и болезней, которые распространились в районе землетрясения.

Согласно статистическим сведениям с V в. н. э. население Японии страдало от землетрясений в среднем через 6,5 года. Причем большие опустошения были вызваны не столько подземными толчками на суше, сколько цунами — огромными волнами, возникающими при землетрясениях на дне моря. Происхождение цунами чаще

всего связывают с вертикальными подвижками участков морского дна — подъемом или опусканием расположенного над этими участками столба воды. В результате зарождаются волны, перемещающиеся с большой скоростью на огромные расстояния.

К числу сильнейших землетрясений, описанных в исторических хрониках, относится Лиссабонская катастрофа 1 ноября 1755 г. В этот день три подземных толчка, следовавшие друг за другом с небольшими интервалами времени, до основания разрушили прекрасный город с многочисленными дворцами и соборами. В городе начались пожары, которые невозможно было ликвидировать из-за многочисленных завалов и отсутствия воды. Во время второго толчка опустилась под воду каменная набережная с людьми, пытавшимися на ней спастись. После землетрясения глубина залива в этом месте достигала 200 м.

Образовавшаяся вследствие землетрясения гигантская волна цунами (высота ее, по отдельным источникам, достигла в Лиссабоне 26 м) опустошила прибрежную полосу; при этом погибло несколько десятков тысяч человек. На побережье Испании, в Кадисском заливе, волна эта имела высоту около 20 м, на Африканском берегу, у Танжера, — 6 м. От Лиссабонского землетрясения пострадали многие города Португалии и Испании. Последствия его были отмечены в ряде стран Западной Европы.

Разрушения и жертвы, вызванные землетрясениями, не всегда дают возможность судить о силе землетрясения. Ущерб этот зависит не только от интенсивности сейсмического толчка, но и от плотности населения в плейстосейстовой области, окружающей эпицентр землетрясения*, от характера построек, времени суток. Интенсивность землетрясения выражают в баллах. В СССР и ряде зарубежных стран принята 12-балльная шкала. Показателем энергетической характеристики землетрясения служит магнитуда, значение которой для землетрясений максимальной силы не превышает 9.

В каталогах землетрясений XX в. имеются данные о ряде крупных сейсмических катастроф. Разрушительные

* Область в недрах Земли, где зарождается сейсмический толчок, носит название очага землетрясения. Точка в центре очага — гипоцентр, а ее проекция на земную поверхность — эпицентр землетрясения. Плейстосейстовая область — это область наибольших разрушений.

землетрясения с магнитудой 8 и выше и силой 9—10 баллов происходили на всех континентах. Количество жертв, по некоторым источникам, составляет около 1,5 млн. человек.

США, Калифорния, 18 апреля 1906 г. В 5 час. 12 мин. ожил разлом Сан-Андреас. С этим гигантским разломом земной коры, протянувшимся на сотни километров вдоль побережья Тихого океана, связаны многочисленные сильные землетрясения, которые сопровождались смещением крыльев разлома друг относительно друга.

Подвижки по разлому Сан-Андреас произошли почти на протяжении 400 км. Максимальное горизонтальное смещение вдоль разлома, измеренное по разорванной изгороди, составило 6,4 м. Эпицентр находился вблизи города Сан-Франциско. Больше всего пострадали районы, где застройка производилась на слабых насыпных грунтах. Лучше сохранились здания, возведенные на твердых породах. Основной ущерб городу был нанесен вспыхнувшим пожаром, борьба с которым осложнилась из-за разрушений системы водоснабжения. Пожар бушевал трое суток, уничтожив почти всю деловую часть Сан-Франциско.

Калифорнийское землетрясение ощущалось на площади 780 тыс. км², его магнитуда достигала 8,2, а интенсивность в эпицентральной зоне — 11 баллов. Кроме Сан-Франциско, сильные разрушения произошли в городах Сан-Хосе, Пало-Альто, Санта-Роза и др. В результате погибло около 700 человек, осталось без крова 250 тыс.

Япония, Канто, 1 сентября 1923 г. Землетрясение в обширном районе на острове Хонсю имело магнитуду 8,2. Очаг землетрясения находился под дном залива Сагами. Огромные разрушения во многих городах на побережье залива были вызваны подземными толчками и сопутствующей волной цунами, высота которой достигала 10 м.

Землетрясением были разрушены Токио и Иокогама, расположенные соответственно в 90 и 65 км от эпицентра. В этих городах в результате подземных толчков и пожаров были уничтожены сотни тысяч домов. Землетрясение разразилось в полдень. Многие люди спасались в парках и на открытых площадях. Но и здесь их настигла огненная стихия. На одной из площадей в Токио около 40 тыс. человек погибло, задохнувшись в раскаленном воздухе, когда пожар охватил окружающие здания

[Ходжсон, 1966]. Были разрушены мосты и туннели, опрокинуты некоторые поезда между Токио и Йокогамой. От землетрясения погибло около 150 тыс. человек, а материальный ущерб оценивался в 3 млрд. долларов.

СССР, Ашхабад, 6 октября 1948 г. Землетрясение, разрушившее столицу Туркмении, произошло в 1 час 12 мин. без предварительных толчков (форшоков), которые нередко предшествуют главному сейсмическому удару и служат предостерегающим сигналом. Землетрясение имело магнитуду 7,3, сила его в эпицентре достигала 9—10 баллов. Смещение почвы в Москве от этого толчка составило 0,4 мм. Протяженность сейсмического разрыва, частично проявившегося на поверхности, превышала 70 км. Плейстосейстовая зона протягивалась вдоль предгорий Копет-Дага.

В Ашхабаде большинство строений было разрушено, обвалились многочисленные здания из кирпича-сырца. Подобные разрушения произошли и в окружающих населенных пунктах, а также в иранских городах Дерезез, Хакестер, Келат, Более 30 селений на иранской стороне были превращены в груды развалин [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР, 1977]. В районе Ашхабада толчок повредил железнодорожные сети. На поверхности Земли появилось множество трещин, в районе эпицентра некоторые из них имели ширину до 0,5 м. Как отмечает геофизик Г. П. Горшков, столь сильные землетрясения в данном районе ранее не были известны. Об этом свидетельствует хорошая сохранность мечети в Аннау, построенной в 1540 г., а также ряда других старинных памятников архитектуры.

Чили, 22 мая 1960 г. Землетрясение, охватившее огромную территорию в южной части Центрального Чили, принадлежит к числу крупнейших сейсмических катастроф XX в. По расчетам, основанным на данных различных сейсмостанций, магнитуда его составила 8,4—8,9. Чилийское землетрясение привлекло внимание многих ученых. Среди них был известный вулканолог Г. Тазиев, прибывший в Чили вскоре после землетрясения. Яркое описание катастрофы, частично использованное нами, содержится в его интересной книге [1968].

Первый толчок силой 8 баллов был зарегистрирован утром 21 мая. Эпицентр его находился южнее города Консепсьон, на полуострове Арауко. Многие здания в Консепсьоне и других городах разрушились. Вскоре по-

следовал второй толчок такой же силы, а затем ряд более слабых.

Основной удар произошел 22 мая в 15 час. 11 мин. За 15 мин. до него отмечались два сильных толчка, породившие сильную панику среди населения и заставившие его покинуть свои дома, это послужило спасительным сигналом для многих тысяч людей, которых катастрофа застала на улицах. Главное землетрясение интенсивностью 11 баллов разрушило города Вальдивию, Пуэрто-Монт, Кастро. Была опустошена полоса длиной около 600 км вдоль Тихоокеанского побережья, где полностью уничтожено свыше 50 тыс. домов. Эпицентр землетрясения находился между Консепсьоном и Вальдивией в пределах крупного разлома, протягивающегося в субмеридиональном направлении на сотни километров. Многочисленные повторные толчки (среди них были очень сильные, с магнитудой до 7) в течение длительного времени сотрясали район катастрофы.

Как отмечает в своей книге Г. Тазиев, масштабы разрушений в районах Чили, пострадавших от землетрясения, существенно различались в зависимости от грунтовых условий. Полностью были уничтожены здания, возведенные на засыпанных руслах рек, а также в местах, где застройка велась на слабых водонасыщенных грунтах. Именно здесь землетрясение проявилось с максимальной силой. В Вальдивии и Пуэрто-Монте в результате сотрясения разжижались водонасыщенные глины, которые вытекали в ближайшие понижения. При этом образовались просадки поверхности Земли, вызвавшие дополнительные разрушения. В значительно меньшей степени пострадали районы, сложенные прочными грунтами.

Чилийское землетрясение повлекло за собой опускание одних и поднятие других участков суши. Через двое суток после главного толчка началось сильное извержение вулкана Пуеуэ.

Следствием Чилийского землетрясения было огромное цунами, вызвавшее большие разрушения и жертвы. Вскоре после главного толчка море отступило, затем водяной вал высотой до 5 м обрушился на берег. Еще более значительными были последующие волны цунами: вторая имела высоту 8 м, третья — более 10 м. Им предшествовал стремительный отлив, обнаживший дно океана. Волны эти уничтожили портовые сооружения и дома в низ-

менных прибрежных районах. Погибло более тысячи человек.

Волны Чилийского цунами, двигаясь со скоростью около 700 км/ч, распространились по всему Тихому океану. На Гавайских островах 12-метровая волна обрушилась на город Хило и опустошила прибрежные районы. Здесь погибли многие жители, которые не эвакуировались, несмотря на своевременное предупреждение об угрозе цунами. Через 22 часа после сейсмического толчка гигантские волны достигли Тихоокеанского побережья японских островов Хонсю и Хоккайдо. В результате разрушений, причиненных цунами, на этих островах остались без крова десятки тысяч людей, сильно пострадали флот и портовые сооружения.

США, Аляска, 27 марта 1964 г. Залив Принс-Вильям, близ побережья которого находился эпицентр землетрясения, расположен на юге Аляски. Интенсивность землетрясения достигала 10—11 баллов, магнитуда 8,4—8,6. Землетрясение связано с движениями крупных блоков земной коры в зоне Алеутского глубоководного желоба, проходящего вдоль южного берега Аляски.

Сейсмический толчок вызвал большие разрушения на площади около 20 тыс. км². Сильно пострадал город Анкоридж, расположенный в 130 км к западу от эпицентра: многие здания были разрушены в результате порожденного сейсмическими колебаниями разжижения песчано-глинистых грунтов и развития оползней. На обширной территории землетрясение сопровождалось деформациями земной поверхности: поднятиями, опусканиями, крупными разрывами.

Районы южного побережья Аляски пострадали от цунами. Гигантские волны, обрушившиеся на берег, уничтожили доки и опустошили приморскую зону в городе Валдиз, в 70 км от эпицентра. Волны достигли побережий США, Гавайских островов и Японии. Особенно большой ущерб был нанесен городу Кресент-Сити в Калифорнии, прибрежная зона которого шириной 0,5 км была покрыта водой.

Землетрясения и ландшафт

Земная кора находится в постоянном движении. Различают медленные, или вековые, и быстрые (сейсмические) движения земной коры. И те и другие проявлялись

на протяжении всей геологической истории. Происходят они и в настоящее время.

Среди структур земной коры наиболее древние и устойчивые — щиты. В пределах щитов на поверхность выходят докембрийские кристаллические породы. Но даже в этих, самых стабильных, структурах наблюдаются современные тектонические движения. Так, занимающий обширную территорию на Скандинавском полуострове и на северо-западе нашей страны Балтийский щит поднимается. Скорость поднятия в центральной части щита достигает 8—9 мм в год, а суммарная амплитуда подъема за последние 7 тыс. лет превышает 100 м. Высокоточное повторное нивелирование показало, что район города Кандалякши поднимается в настоящее время со скоростью около 2 мм в год [Никонов, 1977]. Современные вертикальные движения со скоростью до 2—4 мм в год характерны для ряда районов Украинского щита.

По разлому Сан-Андреас в Калифорнии горизонтальное смещение происходило в течение длительных геологических периодов. По данным американского геолога М. Хилла, величина такого смещения в послемеловое время превысила 500 км, а начиная с плейстоцена стороны разлома сместились почти на 1,6 км. На геодинамических полигонах Средней Азии, согласно А. А. Никонову, современные вертикальные движения, не имеющие непосредственной связи с землетрясениями, происходят со скоростью от десятых долей до первых миллиметров в год, а в зонах активных разломов — от нескольких миллиметров до первых десятков миллиметров в год.

Понятно, что вековые движения земной коры не могут резко изменить ландшафт. Совершенно иной эффект быстрых движений, связанных с землетрясениями. В результате сильных сейсмических толчков возникают крупные трещины, поднимаются или опускаются большие участки суши или морского дна, случаются обвалы и оползни, образуются новые озера.

18 февраля 1911 г. в горах Памира произошло землетрясение с магнитудой около 7,4. Оно вызвало грандиозный обвал, перегородивший реку Мургаб, что повлекло за собой формирование Сарезского озера. Об этой катастрофе в труднодоступном и малонаселенном районе в течение длительного времени поступали лишь отрывочные сведения. Только осенью 1913 г. район озера был достаточно детально обследован экспедицией начальника Па-

мирского района Г. А. Шпилько, составившего карту нового озера и описавшего катастрофу. Вследствие сейсмического толчка в долину реки рухнула часть горы. Под грудой камней был погребен кишлак Усой с 54 жителями. Усойский обвал считают самым крупным из известных в историческое время: масса обрушившейся породы составила около 7 млрд. т, высота плотины 600—800 м. Уровень воды в перегороженной долине Мургаба быстро повышался, и озеро вскоре затопило кишлак Сарез. Осенью 1918 г., по данным Г. А. Шпилько, озеро имело длину 26 км. В настоящее время длина озера около 75 км, площадь 88 км², а максимальная глубина превышает 500 м.

Интересно, что вначале некоторые сейсмологи считали, что грандиозный обвал был причиной, а не следствием Усойского землетрясения. Образованием подпруженных озер из-за обвалов или оползней сопровождалось и некоторые другие сильные землетрясения. В августе 1959 г. оползень перекрыл каньон реки Мэдисон в штате Монтана (США) и возникло озеро Квейк. Чтобы не допустить прорыва плотины и затопления нижележащих районов, срочно прорыли канал, который позволил контролировать режим озера.

В результате землетрясения Канто (Япония) в 1923 г. произошли значительные горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности. Повторные геодезические съемки показали, что берег залива Сагами местами поднялся на 1,5—2 м. Весь район землетрясения переместился к юго-востоку. Максимальная величина горизонтального смещения достигла 4,5 м. В заливе Сагами отмечались очень большие изменения рельефа дна — опускания и поднятия на разных участках до 100—250 м. Для объяснения необычайных даже для самого сильного землетрясения величин вертикального перемещения дна на площади около 1300 км² японские ученые выдвигали различные причины: подводные оползни, уплотнение осадков, подвижки блоков земной коры. Однако это явление так и осталось недостаточно выясненным.

Уникальные по своим масштабам воздействия на земную поверхность были вызваны Гоби-Алтайским землетрясением 4 декабря 1957 г. (магнитуда 8,1, интенсивность 11—12 баллов), которое произошло на юге Монгольской Народной Республики. Последствия его были изучены Советско-Монгольской экспедицией под руко-

водством чл.-кор. АН СССР Н. А. Флоренсова и В. П. Солоненко [Гоби-Алтайское землетрясение, 1963].

По сообщениям очевидцев, во время землетрясения по земле шли волны. Наличие подобных волн нередко отмечалось и при других сильных толчках. Однако ученые обычно скептически относились к достоверности таких свидетельств, ибо после землетрясения на участках, где наблюдались волны, не оставалось трещин и каких-либо следов деформаций. Полагают, что эффект волн может быть связан с физиологическим воздействием сильных сотрясений на зрение наблюдателей или с волновыми колебаниями в атмосфере в момент сейсмического толчка.

При Гоби-Алтайском землетрясении возникали видимые земляные волны, которые, судя по сохранившимся следам деформаций, проходили с запада на восток и перпендикулярно главным разрывам. В. П. Солоненко описывает обратимые и необратимые волновые дислокации. Первые оставили после себя сеть трещин. Их положение указывает, что волны были крутыми и имели длину несколько метров. Необратимые волновые дислокации на отдельных участках сохранились в рельефе. Они имели длину — от 5—7 до 280 м.

Плейстосейстовая область Гоби-Алтайского землетрясения имела площадь около 7 тыс. км² и протягивалась в виде полосы длиной 300 км с северо-запада на юго-восток. Как отмечает В. П. Солоненко, здесь образовались почти все типы тектонических разрывов, известные в структурной геологии. Вдоль всей плейстосейстовой области простираются системы трещин. Местами они усложняются и образуют несколько трещинных зон.

Среди разрывных структур есть трещины с большим смещением по горизонтали и вертикали. По системам трещин, протягивающимся на большое расстояние вдоль плейстосейстовой зоны, амплитуда сдвига, южное крыло которого переместилось к востоку, достигает 2—3 м, а местами даже 6—8 м. Величины вертикального смещения также измеряются несколькими метрами, чаще всего не более 4—5 м. На участках, где действовали растягивающие усилия, образовались висячие трещины шириной до 2—2,5, а в отдельных случаях до 10—25 м.

В центре плейстосейстовой области расположена структура Битут, где сейсмические дислокации и обрушения проявились в особенно крупных масштабах. Вследствие землетрясения по системе сбросов опустился огром-

ный массив. Максимальная амплитуда опускания достигла 328 м, горизонтальное смещение оценивается в несколько десятков метров. Здесь встречены трещины-провалы шириной до 12 м и глубиной 4—5 м. В пределах этой структуры обрушились вершины гор, на крутых склонах возникли обвалы. Недалеко от структуры Битут, в ущелье Улясутай, обвалилась гора, перекрыв русло реки. При этом образовались два озера.

Вследствие Чилийского землетрясения 1960 г. на огромной территории значительно изменился рельеф. В северной части плейстосейстовой области прибрежная зона поднялась почти на 1,5 м. В районе города Вальдивии и на острове Чилоэ прибрежная полоса протяженностью около 500 км и шириной до 20—30 км опустилась, что вызвало наводнение. Г. Тазиев, обследовавший эти районы, писал [1968]: «Мой разум отказывается признать реальность того поразительного факта, что огромная часть континента в одну минуту погрузилась на 2 м» (с. 44). Обширные районы в горах к востоку и к юго-востоку от Вальдивии пострадали от оползней и обвалов. В некоторых случаях значительные массы пород перемещались на пологих склонах, что могло произойти только вследствие сильного сотрясения.

Землетрясение 1964 г. на Аляске повлекло за собой деформации земной коры на территории протяженностью почти 1000 км. Зона, проходящая через остров Кадьяк, полуостров Кенай и далее к востоку от Анкориджа, местами опустилась до 2 м (рис. 1). С юго-востока к ней примыкает обширная зона поднятия, к которой относятся шельф и сопредельная полоса континентального склона, а также прибрежные районы залива Принс-Вильям. На отдельных участках этой зоны амплитуда поднятия достигает 11 м.

Землетрясение вызвало многочисленные оползни и обвалы. Один из крупных оползней в горной области привел к перемещению около 23 млн. м³ породы. При этом маломощный слой породы покрыл большую площадь слабо наклоненной поверхности ледника. Подобный эффект пытались объяснить скольжением оползневых масс на воздушной подушке. Обширные оползни в районе Анкориджа, как уже отмечалось, происходили вследствие разжижения песчано-глинистых пород, вызванного сейсмическими сотрясениями.

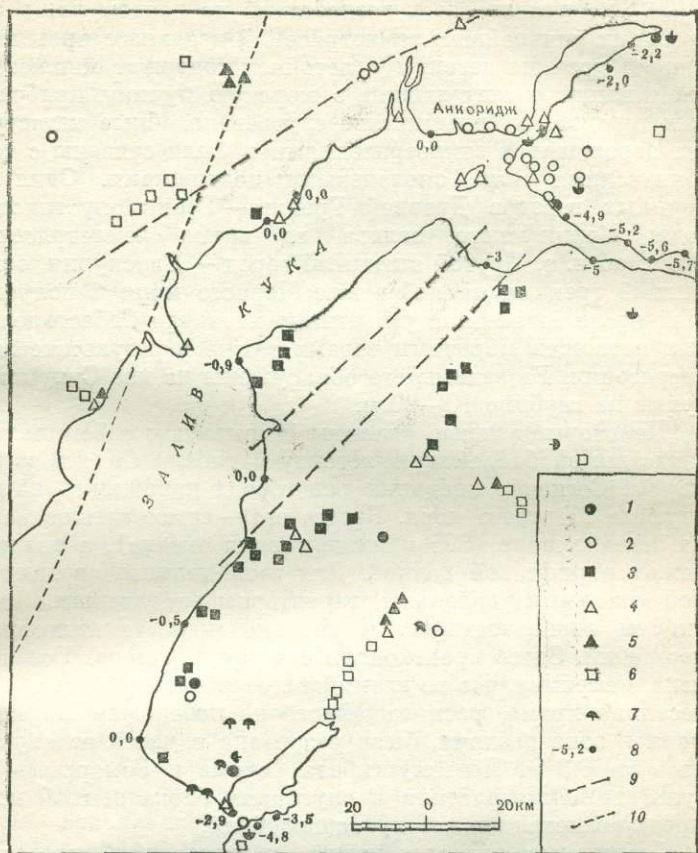


Рис. 1. Схема деформаций земной поверхности в районе Анкориджа в результате землетрясения на Аляске 27 марта 1964 г. (по Фостеру и Карлstromу)

1 — извержения грунтовых вод с песком по трещинам; 2 — трещины в грунте; 3 — трещины или выпирание грунта в торфяных болотах; 4 — трещины, связанные с оседанием пород; 5 — трещины с выделением песка; 6 — нарушения грунта в песчаных и гравийных отложениях долин; 7 — оползни; 8 — опускания или поднятия земной поверхности, цифры в футах (1 фут=30,5 см); 9 — предполагаемые разрывы; 10 — нулевая линия изменения уровня земной поверхности

Мы коснулись здесь воздействий на рельеф лишь нескольких сильнейших землетрясений недавнего прошлого. Однако древние легенды и летописи содержат множество упоминаний о погружении в морскую пучину прибрежных городов. В большинстве случаев подобные катастрофы порождались землетрясениями и были связаны с тектоническими или оползновыми подвижками. Один из крупных городов Древней Греции — Гелик опустился в воды Коринфского залива во время землетрясения 373 г. до н. э. Другой античный город — Диоскурия, основанный греками на побережье Черного моря и получивший после завоевания римлянами название Себастопольс, был поглощен морскими водами также в результате землетрясения. Развалины его обнаружены на дне Сухумской бухты на глубине 10—20 м.

Некоторые ученые склонны связывать с сейсмической катастрофой библейскую легенду о гибели Содома и Гоморры. Согласно преданию эти города находились на побережье Мертвого моря. Берега его — самое низкое место на земном шаре (395 м ниже уровня океана), а впадина лежит в рифтовой долине. Для этой долины, ограниченной молодыми разломами, характерны значительные амплитуды горизонтальных и вертикальных тектонических движений. Здесь происходили смещения блоков. Установлено, например, что во время землетрясения в 31 г. до н. э. лестница храма, расположенного на побережье Мертвого моря в зоне разлома, была разорвана и часть ее опустилась на 0,3 м. Поэтому гибель Содома и Гоморры в результате землетрясения и опускания блока земной коры представляется вполне правдоподобной.

Подводные археологические исследования, проведенные в последние годы на высокогорном озере Титикака в Андах, на границе Перу и Боливии, обнаружили на глубине 15—20 м руины древнего города. Озеро Титикака занимает впадину тектонического происхождения, и город, очевидно, погрузился на дно озера вследствие сильного землетрясения.

До недавнего времени информация о воздействии землетрясений на земную поверхность была очень ограниченной. Специалисты сейсмологи и геологи не придавали большого значения сейсмическим дислокациям. Более того, они зачастую не верили в возможность современных катастрофических изменений лика Земли. В. П. Солоненко отмечал, что в сводку видного американского сейсмо-

лога Ч. Рихтера включены сведения лишь о 55 сильных землетрясениях, сопровождавшихся разрывами земной коры, которые проявились на поверхности.

Чтобы предотвратить или по крайней мере существенно уменьшить ущерб, наносимый землетрясениями, надо знать, где они возможны и какова их вероятная интенсивность. С этой целью изучают землетрясения, происходившие в том или ином районе ранее. Однако сильные землетрясения в определенной местности случаются довольно редко, и сведения о них, полученные по инструментальным наблюдениям или из исторических источников, не всегда достаточно надежны для сейсмического районирования. Изучение древних сейсмических дислокаций позволяет привлечь с этой целью дополнительную информацию.

Исследования древних сейсмодислокаций в широких масштабах впервые были проведены на территории Монголо-Байкальского сейсмического пояса. В. П. Солоненко, А. А. Тресков, Н. А. Флоренсов установили, что характер и масштабы сейсмодислокаций и сопутствующих явлений позволяют судить о силе землетрясения и его некоторых особенностях. В. П. Солоненко разработал следующую шкалу сейсмических дислокаций [1970].

При 8-балльных землетрясениях проявления сейсмодислокаций на поверхности Земли обычно малы и не сохраняются длительное время. Эпицентральная зона таких землетрясений иногда может быть обнаружена по сейсмогравитационным нарушениям — обвалам и оползням.

9-балльные землетрясения сопровождаются возникновением зон трещин протяженностью 2—3 км, реже 10—12 км, а также обвалов, оползней, селевых (грязекаменных) потоков. Поверхностные проявления сейсмодислокаций могут сохраняться десятки и сотни лет.

10-балльные землетрясения вызывают перемещение крупных блоков земной коры площадью до 250—300 км². Опускания этих блоков на 8 и даже 12—15 м привели к образованию новых заливов на Байкале. Возникают разрывы длиной 15—25 км, а в случае горизонтальных подвижек зона трещин может протягиваться на 100 км. 10-балльные землетрясения сопровождаются массовыми обвалами и оползнями. Вибрация, обусловленная сейсмическими колебаниями, порождает особые условия движения сейсмогенных обвалов и оползней, их перемещение на огромные расстояния, что невозможно для гравитацион-

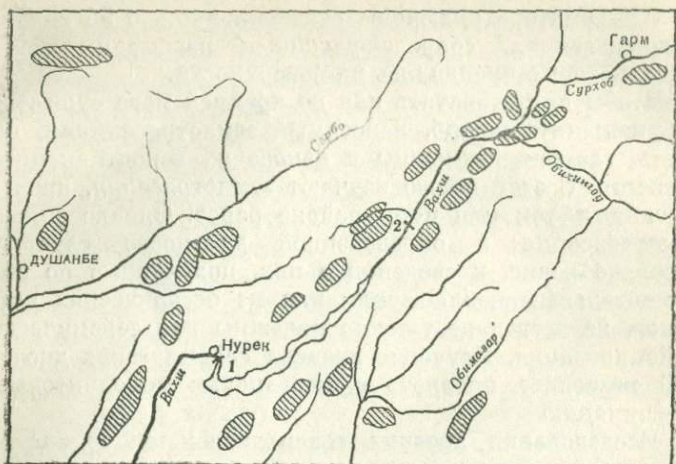


Рис. 2. Схема эпицентральных зон древних сильных землетрясений в окрестностях Нурекской (1) и Рогунской (2) ГЭС на реке Вахш (Таджикистан) (по А. А. Никонову)

ных обвалов или оползней, не связанных с землетрясениями. В. П. Солоненко указывает на гигантские сейсмогенные обвалы в Заалайском хребте, где массы грунта прошли путь до 30 км.

Большая амплитуда горизонтальных и вертикальных смещений характерна для разрывов, порожденных 11-балльными землетрясениями. В случае сдвиговых деформаций протяженность зон разломов достигает 350 км и более.

В результате 12-балльных землетрясений рельеф изменяется на обширных территориях, приподнимаются или опускаются крупные блоки земной коры, образуются обширные сейсмогравитационные деформации, срываются вершины гор, возникают зияющие трещины. Примером могут служить описанные выше изменения во время Гоби-Алтайского землетрясения.

Указанные масштабы сейсмодислокаций характерны преимущественно для Монголо-Байкальского пояса. В других сейсмоактивных регионах они могут быть несколько иными. А. А. Никонов приводит сравнительные данные о длине поверхностных разрывов в результате землетрясений разной магнитуды. Длина разрывов для землетрясений с магнитудой 6,5—7,5 в Калифорнии и

Неваде от 6 до 80 км, в Средней Азии от 1,5 до 20 км. Для землетрясений с магнитудой 7,5 и выше длина разрывов в Калифорнии и Неваде 80—500 км, в Средней Азии 20—50 км. Таким образом, в зависимости от сеймотектонических условий размеры поверхностных дислокаций могут быть различны. Этот факт, а также сглаживание денудационными процессами следов землетрясений в рельефе затрудняют использование палеосейсмологического метода.

Изучение древних сейсмодислокаций, проводимое на Кавказе, в Средней Азии и других регионах, показывает, что сильные землетрясения значительно влияют на рельеф. Аэровизуальные обследования, выполненные на Кавказе В. П. Солоненко и В. С. Хромовских, позволили обнаружить палеосейсмодислокации, которые, по их мнению, соответствуют землетрясениям с магнитудой 6,5—7,5 и силой 9—10 баллов. Разнообразные следы древних землетрясений найдены в Средней Азии А. А. Никоновым [1979]. Он выявил эпицентры древних сильных землетрясений в районе, где начато строительство Рогунской ГЭС на реке Вахш, что важно для оценки сейсмической опасности территории этого крупнейшего гидроузла (рис. 2).

Где происходят землетрясения

Вечером 4 марта 1977 г. в Москве ощущалось землетрясение. Качались люстры, звенела посуда. Некоторые люди, встревоженные, выходили из домов. Землетрясение с магнитудой 7 произошло на расстоянии около 1400 км от столицы, в горах Вранча, на востоке Румынии. В эпицентре сила его достигала 8 баллов. Землетрясение это вызвало многочисленные жертвы и разрушения в ряде районов Румынии.

Район Вранча, расположенный в Восточных Карпатах, неоднократно подвергался разрушительным землетрясениям. Они происходили в 1802, 1829, 1838, 1908, 1940, 1977 гг. Толчок 4 марта 1977 г. вызвал сотрясения в Молдавии силой 6—7 баллов, на Украине — 3—6 баллов, в Белоруссии — 3—4 балла, в Ленинграде и Петрозаводске — 3 балла.

Землетрясения в районе Вранча происходят на глубинах 100—200 км и ощущаются на огромной территории. Такова особенность землетрясений с большой глубиной очага. Мелкофокусные землетрясения, напротив, отличаются

Таблица 1

Сильные землетрясения с 1897 по 1970 г.

Магнитуда	Нормальные	Промежуточные	Глубокие
8,6 и выше	23	5	—
7,9—8,5	138	23	9
7,0—7,8	724*	310	98

* Данные за 1918—1970 гг.

ся малой площадью плейстосейстовой области. Так, при Ташкентском землетрясении 26 апреля 1966 г. с очагом на глубине 8 км 8-балльная зона захватила лишь центр города, а на окраинах ощущался толчок силой 5—6 баллов. Для землетрясений определенной магнитуды интенсивность в эпицентре уменьшается с увеличением глубины очага.

Распределение землетрясений в различных частях земного шара по глубинам и магнитудам, а также особенности сейсмичности разных регионов рассмотрены американскими сейсмологами Б. Гутенбергом и Ч. Рихтером в 1941 г. Их книга была переведена на русский язык в 1948 г. Многие положения и оценки, содержащиеся в ней, до сих пор не утратили своего значения.

В зависимости от глубины очага различают три типа землетрясений: неглубокие, или нормальные (до 70 км); промежуточные (70—300 км); глубокие (300—720 км). На глубинах более 720 км землетрясения не происходят. В табл. 1 приведены данные о количестве сильных землетрясений с разной глубиной очага.

Шведский сейсмолог С. Дуда составил каталог сильных землетрясений земного шара с 1897 по 1964 г. Дуда придерживается несколько иной классификации землетрясений по глубине: нормальные — до 65 км, промежуточные — 66—450 км, глубокие — 451—720 км. Согласно его данным всего за указанный период произошло 1263 землетрясения с магнитудой 7 и выше, в том числе нормальных 889, промежуточных 321 и глубоких 53. Сейсмическая энергия, выделившаяся во время этих землетрясений, составляет $3,9 \cdot 10^{24}$ эрг*. 82% энергии при-

* Сейсмическая энергия E (в эргах) определяется из формулы $\lg E = 11,8 + 1,5M$, где M — магнитуда. При очень сильном землетрясении с $M = 8,2$ выделяется энергия, равная 10^{24} эрг, что

ходится на долю нормальных землетрясений. Таким образом, неглубокие землетрясения, очаг которых находится в литосфере, распространены наиболее широко и выделяют преобладающую часть всей сейсмической энергии.

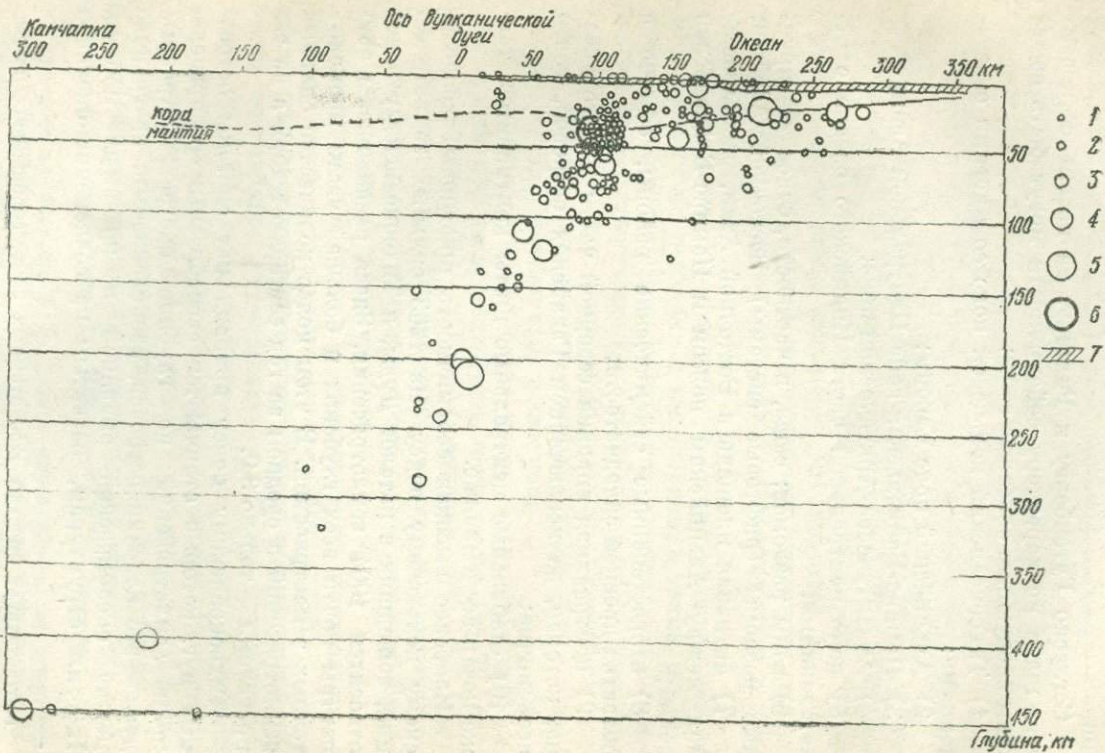
Согласно Гутенбергу и Рихтеру, на поверхности земного шара по характеру сейсмичности могут быть выделены следующие основные зоны:

- 1) Тихоокеанский кольцевой пояс со многими ответвлениями;
- 2) Альпийский пояс Европы;
- 3) Памиро-Байкальская зона Центральной Азии;
- 4) Атлантическо-Арктический пояс;
- 5) пояс центральной части Индийского океана с ответвлениями;
- 6) зоны разломов; сюда, в частности, относятся крупные разломы (рифтовые системы) Восточной Африки;
- 7) активная площадь в Восточной Азии, расположенная между Альпийским поясом и Памиро-Байкальской зоной;
- 8) второстепенные сейсмические районы, обычно в областях древней складчатости;
- 9) центральная впадина северной части Тихого океана, которая, за исключением Гавайских островов, почти асейсмична;
- 10) стабильные центральные щиты континентов, также почти асейсмичные.

Наиболее высокая сейсмичность присуща Тихоокеанскому кольцевому поясу. Из 1263 сильных землетрясений, вошедших в каталог Дуды, к Тихоокеанскому поясу относятся 1004 землетрясения. Здесь расположены эпицентры почти всех глубоких и большей части промежуточных землетрясений. В этом поясе количество сильных землетрясений в среднем за год составляет 15,6, а за его пределами — только 3,9.

Тихоокеанскому поясу принадлежат системы островных дуг, которые отличаются своеобразным распределением землетрясений по глубине очагов. Островные дуги — это цепочки островов, расположенных на границе между океанической впадиной и краевыми морями. К этим структурам, развитым на сочленении океана и

соответствует энергии 1250 атомных бомб, сброшенных на Хиросиму.



континента, приурочены сильнейшие землетрясения и многочисленные действующие вулканы.

По современным представлениям, чрезвычайно высокая сейсмическая активность островных дуг связана с поддвиганием океанической земной коры под континент. Впервые идею о возможности такого поддвигания выдвинул известный советский геолог А. Н. Заварицкий. Американский сейсмолог Г. Беньоф установил, что очаги глубоких землетрясений локализуются в сравнительно тонких зонах, погружающихся под континенты или краевые моря. Эти зоны получили название зон Заварицкого—Беньофа.

Многочисленные очаги землетрясений с внешней стороны островных дуг располагаются на небольших глубинах. По мере приближения к континенту глубина очагов возрастает. Так, на Курило-Камчатской дуге под дном Тихого океана находятся очаги нормальных землетрясений, далее к северо-западу они сменяются промежуточными, а в Охотском море зарегистрированы преимущественно глубокофокусные землетрясения. Здесь по мере удаления от Тихого океана наблюдается погружение фокальной плоскости под углом примерно $40-50^\circ$ (рис. 3).

Аналогичное распределение землетрясений с разной глубиной очага отмечено и на других островных дугах, окаймляющих Тихий океан с запада. На Тихоокеанском побережье Центральной и Южной Америки глубина очагов возрастает в глубь континента.

За пределами Тихоокеанского сейсмического пояса наибольшее количество сильных землетрясений приурочено к Альпийскому поясу и Памиро-Байкальской зоне. К молодым горным сооружениям Европы и Азии, возникшим в период последней (альпийской) фазы складчатости, относятся многие сейсмоактивные структуры Бирмы, Гималаев, Белуджистана, Ирана, Копет-Дага, Анатолии, а также Кавказа, Крыма, Балкан, Карпат, Альп, Апеннин и Пиренеев. В большинстве этих структур происходят неглубокие землетрясения. В Бирме, Гиндукуше, Восточ-

Рис. 3. Вертикальный разрез вулканической дуги через южную часть Камчатки с очагами землетрясений, происшедших в 1972 г.

(по С. А. Федотову и др.)

1—6 — очаги землетрясений энергетических классов: 4—9; 2—10; 3—11; 4—12; 5—13; 6—14; 7 — вода

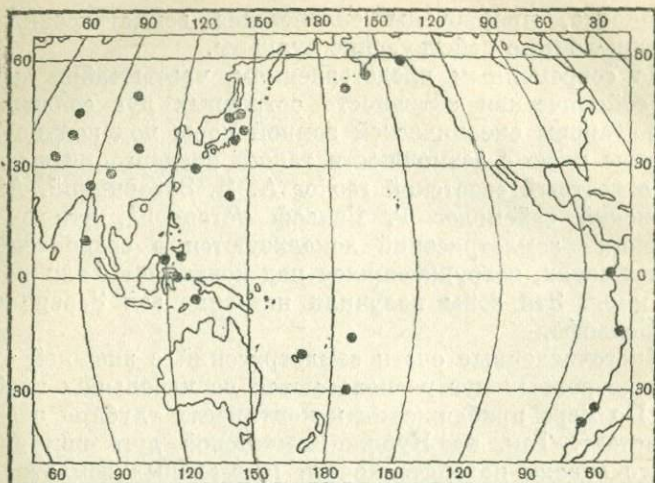


Рис. 4. Расположение эпицентров сильнейших землетрясений (с магнитудой 8,6 и выше) за 1897—1975 гг.

ных Карпатах (район Вранча) многие землетрясения имеют промежуточную глубину очага. Для Памиро-Байкальской зоны характерны неглубокие землетрясения.

Наиболее протяженный сейсмический пояс, расположенный преимущественно под ложем океанов, приурочен к системе рифтов Земли. Расскажем о них подробнее. Рифт — это тектоническая структура в виде рва, ширина которого обычно десятки километров, а длина — сотни и даже тысячи километров. Представления о глобальной системе рифтов, сыгравшие важнейшую роль в развитии геологической мысли, сформировались недавно — около двух десятилетий назад, и рифтовые системы не вошли в перечень главных сейсмогенных зон Гутенберга и Рихтера. На континентах к рифтовым структурам относятся глубокие узкие депрессии, например впадины Байкала и Мертвого моря. В ложе Мирового океана глубокие рифтовые ущелья проходят в осевой зоне срединно-океанических хребтов, которые протягиваются вдоль центральных частей Северного Ледовитого, Атлантического, Индийского и восточной части Тихого океанов. Общая длина хребтов свыше 60 тыс. км.

Рифтовые системы на континентах и в океанах отличаются высокой сейсмичностью. В океанах они хорошо

прослеживаются в виде узкой зоны, где концентрируются эпицентры землетрясений. Эта зона контрастно выступает на фоне асейсмичных площадей океанического ложа. Интересно отметить, что подобное линейное расположение эпицентров явилось одним из доказательств существования рифтовых систем.

На рис. 4 показано расположение эпицентров сильнейших землетрясений с 1897 по 1975 г. Как видно из схемы, все они произошли в Тихоокеанском сейсмическом поясе и в Центральной Азии. За указанный период на земном шаре было 28 сейсмических катастроф.

Существует корреляционная зависимость между количеством землетрясений в определенной сейсмической области и их энергетическим классом*: по мере возрастания энергетического класса (или магнитуды) землетрясений их частота закономерно уменьшается. Однако в некоторых районах сильные землетрясения повторялись неоднократно.

Мы уже упоминали о землетрясениях в горах Вранча. На Кавказе особенно часты сильные землетрясения в районе города Шемахи (Азербайджан). По данным Ф. Т. Кулиева и Н. В. Шебалина, за последние три века здесь произошло 11 разрушительных землетрясений: в 1667 г. — 9—10 баллов, 4 января 1669 г. — 9 баллов, 1—2 января 1671 г. — 8—9 баллов, 1 февраля 1671 г. — 8 баллов, 9 августа 1828 г. — 8 баллов, 23 июля 1856 г. — 7—8 баллов, 11 июня 1859 г. — 9 баллов, 2 сентября 1869 г. — 8 баллов, 28 января 1872 г. — 8—9 баллов, 7 августа 1875 г. — 7—8 баллов, 13 февраля 1902 г. — 8—9 баллов. Однако велика сила традиции — каждый раз город отстраивался заново. Впрочем, теперь это уже не столь опасно: люди научились возводить сейсмостойкие дома. Специальные конструкции зданий предохраняют их от разрушения даже в случае 9—10-балльных толчков.

До сих пор мы рассматривали области, где происходят лишь сильные землетрясения. Но землетрясения случаются и в так называемых асейсмичных областях, только здесь они довольно редки и имеют невысокую интенсивность.

В ночь с 28 на 29 июля 1956 г. многие жители городов Перми и Кунгура были разбужены толчком, сила ко-

* Энергетический класс землетрясения (K) — это логарифм сейсмической энергии (в джоулях).

торого достигала 4—5 баллов. Этот толчок ощущался в большом районе. По данным Л. А. Шимановского, после толчка уровень воды в озере Андроновской ледяной пещеры повысился на 30 см, видимо в результате нарушения системы трещин.

Слабая сейсмичность характерна для обширной территории европейской части СССР, за исключением Кавказа, Крыма, Молдавии и Западной Украины. Однако имеются исторические данные о землетрясениях в этом регионе. Согласно свидетельствам древних летописей, собранным В. Поповым [1939], о землетрясении в Москве впервые упоминается в 1446 г.: «...тая потрясися град Москва, Кремль и весь посад, и храми поколебашася». В Нижнем Новгороде землетрясение было в 1596 г., на побережье Белого моря — в 1626 г.

Каталог землетрясений Русской равнины и Урала был составлен в Институте физики Земли АН СССР И. В. Ананьиним. На западе Русской равнины ощущаются карпатские землетрясения, на юге — крымские и кавказские. Зарегистрирован и ряд местных очагов. Наибольшее их количество известно на Среднем Урале, а также в средних течениях Дона и Северного Донца, где были толчки силой до 6 баллов. Редкие землетрясения до 4—5 баллов происходили и в центральных областях России.

Понятно, что области слабой сейсмичности не привлекают особого внимания сейсмологов. Основные исследования проводятся на территориях, подверженных сильным землетрясениям. Чтобы выделить области, где возможны такие землетрясения и необходимы соответствующие антисейсмические мероприятия, осуществляется сейсмическое районирование. По мере совершенствования его методов и получения новых данных уточняются карты сейсмического районирования, которые входят в число нормативных документов, определяющих условия строительства на территориях, подверженных землетрясениям.

Новая карта сейсмического районирования СССР была составлена большим коллективом ученых Института физики Земли АН СССР и институтов республиканских академий наук [Сейсмическое районирование территории СССР, 1980]. Карта эта дает обширную информацию о сейсмичности нашей страны: зонах возможного возникновения очагов землетрясений разной магнитуды и с различной глубиной очагов, интенсивности землетрясений, степени вероятности землетрясений определенной силы.

Районы вероятных разрушительных землетрясений (8 баллов и выше) занимают в СССР площадь 1319 тыс. км², что составляет около 6% территории. Это — юго-запад Молдавии, юг Крыма, Кавказ, Камчатка и Курильские острова, частично Средняя Азия и Казахстан, Сибирь. В данных районах с многочисленным населением находятся столицы союзных республик, крупные города и мощные гидроэлектростанции. Поэтому трудно переоценить значение работ, направленных на уменьшение сейсмической опасности.

ОЧАГ И ПРОЦЕССЫ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Что такое очаг землетрясения

В предыдущем разделе неоднократно упоминалось об очагах тектонических землетрясений*. Сделаем некоторые пояснения. Очаг землетрясения, как уже известно, — это область внутри земной коры или мантии, где происходит сейсмический удар. Такое определение, конечно, не отражает всей сложности данного понятия.

Сейсмическая энергия, которая накопилась в определенном объеме среды, выделяется при ее деформации в очаге землетрясения. Чем больше энергия землетрясения, тем крупнее очаг. Н. В. Шебалин вывел следующую зависимость между протяженностью очага l и магнитудой землетрясения M :

$$\lg l \text{ (км)} = 0,5 M - 1,8.$$

Протяженность очаговых зон землетрясений с магнитудой 8 исчисляется сотнями километров. О больших размерах очагов сильных землетрясений свидетельствуют деформации на земной поверхности, примеры которых приводились выше.

Детально изучен очаг Ташкентского землетрясения 26 апреля 1966 г., вызвавшего значительные разрушения в городе. Сила землетрясения достигала 8 баллов, магнитуда 5,3. Очаг находился под центром Ташкента. По дан-

* В книге не рассматриваются землетрясения иной природы — вулканические и обвальные, распространение которых ограничено, а разрушительный эффект невелик.

ным В. И. Уломова [1974], заведующего Ташкентской сейсмологической обсерваторией, землетрясение произошло в результате разрыва, образовавшегося под действием горизонтального сжатия и расщепившего антиклинальную складку (рис. 5). Разрыв начался на глубине 8 км и распространился вверх до глубины 3 км. Область очага имела форму трехосного эллипсоида, внутри его породы деформировались и подверглись дроблению. Северо-восточное крыло разрыва переместилось почти вертикально вверх. Величина смещения на глубине 6 км достигла

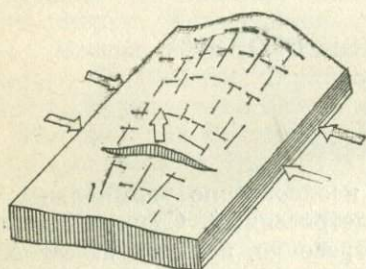


Рис. 5. Схема образования разрыва в очаге Ташкентского землетрясения (по В. И. Уломову)

0,5 м. При этом земная поверхность оказалась приподнятой на 3,5 см (рис. 6). В. И. Уломов оценивает объем горных пород, деформированных в области очага, величиной 100 км³.

После образования главного разрыва, в очаге землетрясения, у верхнего и нижнего краев разрыва возникли сильные напряжения, разрядка которых вызвала большое количество повторных толчков. Среди множества афтершоков, отмечавшихся до 1969 г., были довольно сильные, 7-балльные толчки. Миграция афтершоков указывала на перераспределение напряжений и продолжающееся деформирование пород в очаговой области.

Природа очага землетрясения — один из коренных вопросов современной сейсмологии. Посредством инструментальных наблюдений изучаются очаги землетрясений по записям упругих волн, регистрируемых сейсмическими станциями. Записи сейсмограмм, полученные на разных станциях, позволяют установить моменты так называемых первых вступлений упругих волн. По ним можно определить координаты точки, откуда началось излучение таких волн. Эта точка — инструментальный гипотенус землетрясения.

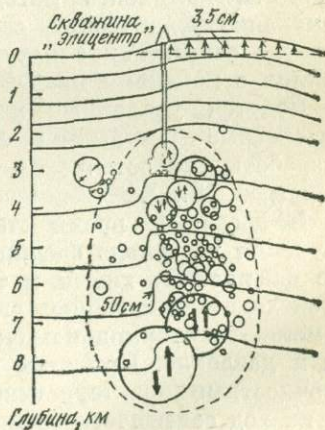
В результате исследований советских и японских сейсмологов (А. В. Введенская, Х. Хонда и др.) появилась возможность определять механизм очага — распространение в нем разрыва — по наблюдениям над упругими волнами. Анализ, выполненный А. В. Введенской, показал, что в подавляющем большинстве случаев землетрясений очаг представляет собой разрыв, в плоскости которого происходит скольжение [1969]. Для того чтобы произошел такой разрыв, должны существовать определенные скалывающие напряжения. Было установлено, что в тех или иных сейсмоактивных зонах действующие напряжения имеют различную ориентацию. Например, в Тихоокеанском сейсмическом поясе господствует одностороннее горизонтальное сжатие, а в Прибайкалье — горизонтальное растяжение.

Итак, успехи, достигнутые сейсмологией в изучении очагов землетрясений, позволили сделать вывод, что в очаге идет деформация разрыва со сдвигом. Лишь для глубоких землетрясений допускается иной механизм очага (к этому вопросу мы еще вернемся). Однако традиционные методы сейсмологии не дают возможности определить, как подготавливается разрыв, какие процессы протекают в будущем очаге перед землетрясением. Поэтому в последнее десятилетие широко развернулись исследования по физике очага.

Физика процессов разрушения — не новая отрасль науки. Она достигла значительных успехов в изучении прочностных свойств металлов и различных строительных материалов. Но при изучении физических процессов в очаге возникли серьезные трудности, связанные с неоднородностью внутриземной среды, влиянием на ее прочностные

Рис. 6. Разрез через очаговую область Ташкентского землетрясения (по В. И. Улому)

Пунктирная линия — область очагов главного толчка и афтершоков. Очаги толчков показаны окружностями, диаметр которых соответствует мощности толчков. Двойные стрелки — направления подвижек в очагах



свойства высоких температур и давлений, а также некоторых других факторов.

Исследования по физике очага в Советском Союзе и за рубежом, главным образом в США и Японии, развиваются в нескольких направлениях. Это лабораторное изучение процессов, предшествующих и сопутствующих разрушению различных горных пород и имитирующих материалов. Такие эксперименты проводят в условиях сложного напряженного состояния, нередко с водонасыщенными образцами, где учитывается также давление воды. В результате экспериментов определяют не только прочностные свойства пород, но и изменение электрических, магнитных показателей, скорости прохождения упругих волн в породах на разных стадиях деформирования образцов, предшествующих их разрушению.

Особый интерес представляют крупномасштабные эксперименты, которые проводятся на большом прессе Института физики высоких давлений АН СССР. Этот гидравлический пресс развивает усилие до 50 тыс. т. На нем уже были выполнены опыты по разрушению бетонной призмы, имеющей квадратное основание со стороной 0,55 м и высоту 0,65 м [Семерчан и др., 1980]. Развитие подобных экспериментов с различными материалами и горными породами даст возможность моделировать с наибольшим приближением к реальным условиям процессы, развивающиеся в земной коре перед землетрясениями.

Натурное изучение процессов подготовки землетрясений осуществляется в сейсмоактивных районах с использованием комплекса методов, позволяющих определить изменение физических свойств среды в зоне предполагаемого очага. Такие натурные исследования тесно смыкаются с поисками предвестников землетрясений.

Ведутся усиленные исследования и уже получены интересные результаты еще в одном направлении — разработке теоретических моделей очага землетрясения [Костров, 1975].

В последнее время становится ясной необходимость изучения не только физики очага землетрясения, но также физической химии и термодинамики очага. В очаге происходит выделение огромного количества энергии, изменяются термодинамические параметры — температура и давление. При этом могут изменяться состояние и прочностные характеристики среды, что неизбежно повлияет на ход сейсмического процесса. Изменение термодина-

мических параметров в недрах является причиной фазовых превращений минерального вещества — выделения или поглощения воды, перехода одних минералов в другие. Такие фазовые превращения сопровождаются изменением объема и прочностных свойств вещества.

Советские геофизики Л. Д. Лившиц и Ю. Н. Рябинин [1970] обратили внимание на двойную роль фазовых превращений в сейсмическом очаге. Изменение объема глубинного вещества соответственно влияет на тектонические напряжения, что может повлечь за собой образование разрывов. С другой стороны, повышение температуры до уровня, когда происходят фазовые превращения, и даже в случаях, когда этот уровень не достигается, может снизить прочность вещества. Если прочность на сдвиг уменьшится до предела, отвечающего величине действующих напряжений, этот сдвиг произойдет без дополнительного роста напряжений. Таким образом, изменение термодинамических параметров в определенных условиях может послужить причиной землетрясения в результате роста напряжений или вследствие уменьшения прочности минерального вещества. Подобный механизм допускается в настоящее время для глубоких землетрясений, очаги которых находятся в условиях высоких температур и давлений.

Исследования очагов землетрясений привлекают внимание и геологов. По образному выражению акад. Б. Б. Голицына, землетрясение — это фонарь, на мгновение освещающий недра Земли. Достаточно напомнить, что одно из важных направлений современной геологии — новая глобальная тектоника, или тектоника плит, в значительной степени базируется на данных о локализации очагов землетрясений. Размещение очагов на земном шаре показывает, где расположены подвижные, активизированные зоны, обозначающие границы крупнейших тектонических элементов нашей планеты.

Как соотносятся очаги землетрясений с основными структурами земной коры, какие структуры наиболее опасны в сейсмическом отношении, где следует ожидать сильные землетрясения — вот лишь часть вопросов, которые геологи исследуют совместно с сейсмологами.

Земная кора не монолитна, она рассекается множеством трещин, наиболее крупные из них — глубинные разломы — разграничивают большие блоки земной коры. Далеко не все разломы сейсмически активны. В ряде

районов наблюдаются современные движения земной коры — поднятия или опускания. Но такие движения с довольно большой амплитудой могут происходить и в районах с низкой сейсмичностью. Установлено, что очаги землетрясений часто приурочены к узлам пересечения крупных разломов, к зонам сочленения блоков земной коры, имеющих различные направления современных тектонических движений. Имеются и другие геологические признаки сейсмической опасности.

На стыке сейсмологии и тектоники — науки о строении земной коры — возникло пограничное научное направление — сейсмотектоника. Сейсмотектоника изучает связь землетрясений с тектоническим строением различных районов. Сейсмотектонические исследования позволяют выделить активные разломы, проследить по локализации очагов распространение этих разломов на больших глубинах, выяснить характер относительных смещений блоков земной коры и в конечном счете — геологические условия очаговых зон.

Интересен сейсмотектонический анализ, выполненный итальянскими и советскими геологами применительно к району землетрясений Фриули в Северной Италии. 6 мая и 15 сентября 1976 г. здесь произошли два сильных толчка, сопровождавшиеся многочисленными афтершоками. Интенсивность землетрясений достигала 10 баллов по 12-балльной шкале, магнитуда 6,2 и 6,8. Область очагов совпадает с пересечением субширотных надвигов с поперечными разрывами. Сейсмотектонические исследования показали, что очаги этих землетрясений, по всей вероятности, связаны с горизонтальными и вертикальными подвижками, которые являются следствием современного надвигания Карнийских Альп в южном направлении [Физические процессы в очагах землетрясений, 1980].

Наступление на тайны очага землетрясения ведется широким фронтом, с использованием различных научных методов. Однако основное внимание ученых в последние годы было сконцентрировано на изучении физических процессов подготовки землетрясений.

Подготовка землетрясений

Подготовка землетрясений — длительный процесс, завершающийся тектоническим разрывом и сопутствующим сейсмическим толчком. Условия развития тектонических деформаций изучает тектонофизика — новое научное на-

правление, зародившееся в нашей стране. Основоположник тектонофизики М. В. Гзовский в 1960 г. выделил стадии формирования тектонических разрывов [1975]:

1) зарождение и разрастание многочисленных изолированных трещин, которое сопровождается слабыми землетрясениями;

2) лавинообразное разрушение перемычек между трещинами и их слияние в общий разрыв. Если при этом образуется крупный разрыв, случается сильное землетрясение;

3) концентрация напряжений у концов образовавшегося разрыва, в результате чего происходит растрескивание и фиксируются вторичные толчки;

4) продолжающееся смещение бортов разрыва, что вызывает появление мелких трещин и слабые толчки;

5) залечивание полости разрыва минеральными новообразованиями.

Таким образом, сплошность земной коры восстанавливается. Если в данном районе уровень тектонических напряжений вновь нарастает до определенного предела, цикл повторяется.

Дальнейшее изучение стадий формирования разрывов, и в частности статистический анализ сетей трещин, провели М. В. Рац и др. В последние полтора десятилетия исследования процессов подготовки землетрясений активизировались главным образом в связи с разработкой методов прогноза землетрясений. Ведь понимание того, как готовится землетрясение, позволит установить признаки, предшествующие сейсмическому толчку, и, следовательно, найти подход к его предсказанию. С другой стороны, предвестники землетрясений, обнаруженные в тех или иных районах, дают возможность проследить этапы подготовки землетрясений. Предложено несколько гипотез, трактующих процессы подготовки землетрясений. На их основе разрабатываются модели подготовки землетрясений. Мы коснемся лишь двух моделей подготовки землетрясений, получивших более детальное обоснование.

Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ-модель) разработана в Институте физики Земли АН СССР (В. Н. Мячкин, В. В. Костров, Г. А. Соболев, О. Г. Шамина). Согласно этой модели [Мячкин, 1978(1)] на разных стадиях подготовки землетрясения происходит изменение количества, размеров и ориентации трещин (рис. 7).

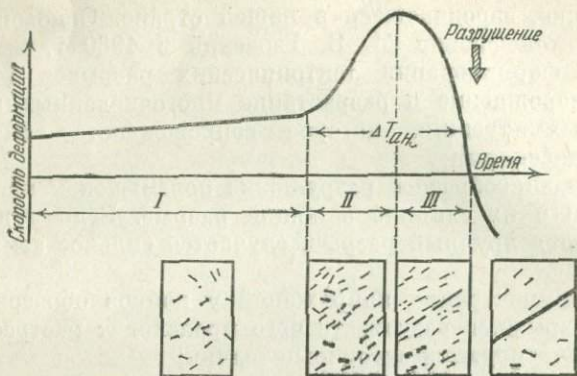


Рис. 7. Схема развития деформаций при подготовке землетрясений согласно модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (по В. И. Мячкину)
 I, II, III — стадии подготовки землетрясений; $\Delta T_{ан}$ — период аномального развития деформаций. В прямоугольниках показано развитие трещин на разных стадиях

Под действием возрастающих тектонических напряжений начинается равномерное растрескивание горной породы. Постепенное увеличение числа и размеров трещин приводит к их взаимодействию. Наступает вторая, лавинная стадия подготовки землетрясения, когда благоприятно расположенные трещины за счет разрушения перемычек сливаются, образуя более крупные разрывы. Опыты, проведенные на различных материалах и горных породах, показывают, что существует зависимость между размерами трещин и их критической плотностью, т. е. той плотностью, при которой начинается лавинное взаимодействие и слияние. Чем крупнее трещины, тем меньшее их количество требуется, чтобы наступила эта стадия развития трещин.

На третьей, последней стадии в результате объединения трещин образуется небольшое число более крупных разрывов. Они сливаются в основной разрыв, приводящий к землетрясению. Эту стадию авторы ЛНТ-модели назвали стадией неустойчивой деформации, потому что происходит концентрирование деформаций в зоне основного разрыва и их ослабление за ее пределами. Таким образом, область подготовки землетрясения разделяется на две части. В первой, прилегающей к зоне разрыва, развиваются неупругие деформации, во второй, периферийной, деформа-

ции имеют упругий характер, т. е. они уменьшаются по мере ослабления напряжений и образовавшиеся ранее трещины закрываются.

Указанная модель подготовки землетрясений позволяет объяснить природу некоторых предвестников землетрясений. Модель эта применима для сухих и водонасыщенных пород. Однако, как отмечает один из авторов ЛНТ-модели — геофизик Г. А. Соболев, предшествующие землетрясениям эффекты изменения электрического сопротивления и скоростей сейсмических волн не получают объяснения, если не учитывать водонасыщенность пород.

Дилатантно-диффузионная модель подготовки землетрясения (ДД-модель) разработана американскими специалистами (Нур, Андерсон, Виткомб, Шольц и др.). Дилатансия — это увеличение объема горных пород при сдвиговых деформациях. Такое явление, связанное с образованием открытых трещин, хорошо изучено экспериментальным путем для различных горных пород. Если образец породы в условиях всестороннего давления подвергается дополнительному сжатию в одном направлении, объем его увеличится. При этом развиваются многочисленные микротрещины, в результате чего возрастает пористость породы. Дилатантно-диффузионной моделью предусматривается, что породы насыщены водой и в процессе развития деформации происходит перемещение (диффузия) воды.

Согласно ДД-модели на первой стадии подготовки землетрясения напряжения возрастают, однако величина их недостаточна для образования или раскрытия трещин. Когда напряжения достигают определенного уровня, наступает вторая стадия — дилатансии. При этом появляются открытые трещины.

Роль воды, насыщающей горные породы, как фактора, который влияет на их прочность, будет рассмотрена ниже. Пока лишь заметим, что прочность водонасыщенной породы меньше, чем сухой, и эта разница увеличивается с повышением давления воды в порах и трещинах пород. Подобное влияние воды на прочностные свойства пород служит важным элементом ДД-модели. Растрескивание пород на стадии дилатансии обуславливает увеличение общего объема пустот. Давление воды в трещинах падает, и некоторые трещины могут осушаться, что сопровождается повышением прочности пород. Такое повышение прочности называют дилатантным упрочнением.

Снижение порового давления воды в зоне дилатансии и одновременное увеличение проницаемости пород вследствие растрескивания приводят к тому, что в эту зону устремляется вода из соседних участков массива. В результате поровое давление вновь повышается, а прочность пород падает. Начавшееся разрушение пород соответствует наступлению третьей стадии подготовки землетрясения. Когда прочность снизится до уровня возрастающих тектонических напряжений, происходит магистральный разрыв, вызывающий землетрясение (рис. 8).

Таким образом, основу дилатантно-диффузионной модели составляет изменяющееся в процессе подготовки землетрясения соотношение между количеством и объемом образовавшихся трещин и поступлением воды в эти трещины, что соответственно изменяет прочность пород.

ДД-модель облегчает понимание некоторых предвестников землетрясений, например аномалий скоростей сейсмических волн и электрического сопротивления. Однако советские сейсмологи (Г. А. Соболев и др.) указывают на то, что ДД-модель не позволяет удовлетворительно объяснить, каким образом мелкие дилатантные трещины преобразуются в главный сейсмический разрыв.

Мы не касаемся здесь ряда других особенностей упомянутых моделей подготовки землетрясений. Модели эти совершенствуются, и их можно рассматривать как важные этапы на пути создания общей теории подготовки землетрясений.

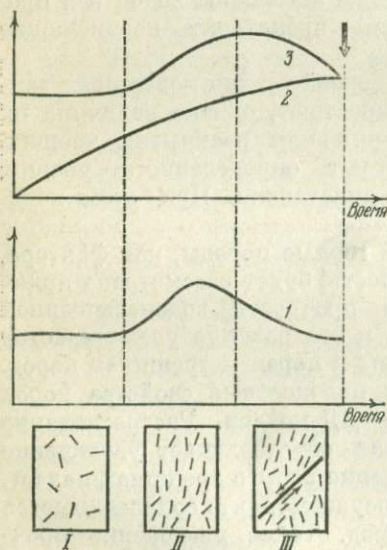


Рис. 8. Схема дилатантно-диффузионной модели подготовки землетрясений (по Г. А. Соболеву)

I, II, III — стадии подготовки землетрясений; 1 — скорость деформаций; 2 — тектоническое напряжение; 3 — прочность породы. В прямоугольниках показано развитие процесса трещинообразования. Жирная стрелка — момент главного разрыва.

ВОДА В НЕДРАХ ЗЕМЛИ

Современные представления о воде в горных породах были заложены советским ученым А. Ф. Лебедевым. Различают следующие виды воды в горных породах: свободную, в форме пара, в твердом состоянии, связанную.

Свободная вода может быть двух разновидностей — капиллярная и гравитационная. Первая передвигается за счет капиллярных сил, действующих в узких порах пород. Гравитационная вода воспринимает гидростатическое давление и двигается под влиянием силы тяжести. При неполном насыщении пор и трещин пород вода просачивается вниз до уровня грунтовых вод.

Вода в форме пара занимает поры и трещины, не заполненные жидкой водой, и перемещается за счет разной величины упругости пара или с потоком воздуха. При отрицательных температурах вода в твердом состоянии содержится в горных породах в виде льда.

Известно несколько разновидностей связанной воды. Сорбированная вода удерживается частицами пород под влиянием сил, возникающих при взаимодействии молекул воды с поверхностью этих частиц и с обменными катионами. В породах, сложенных мельчайшими минеральными частицами, обладающими высокой поверхностной энергией, например в глинах, содержится большое количество прочносвязанной воды. Такая вода частично сохраняется в глинах даже при отпрессовывании под действием больших давлений. Ее можно удалить из глин лишь при высокой температуре. Слабее удерживается поверхностью минеральных частиц рыхлосвязанная, или пленочная, вода.

Химически связанная вода участвует в строении кристаллических решеток некоторых минералов. Кристаллизационная вода входит в состав кристаллической решетки в виде молекулы H_2O . Конституционная вода находится в минералах в виде ионов гидроксила или водорода. Ее можно удалить лишь при разрушении молекулы минерального соединения под действием высокой температуры. Для некоторых подобных минералов температура дегидратации превышает $1000^{\circ}C$.

Советский гидролог М. И. Львович оценивает количество подземных вод в верхней части земной коры величиной 60 млн. км³, что составляет 4,12% от всего объема гидросферы. Однако сюда входит только свободная вода.

Акад. В. И. Вернадский указывал, что общее количество воды в земной коре до глубины 16 км достигает 450—500 млн. км³. Для нашего дальнейшего изложения представляет особый интерес следующее заключение В. И. Вернадского. Он писал, что вода в земной коре до глубины 20 км «не спускается ниже 8% по весу, и едва можно видеть признаки уменьшения ее количества для дальнейших глубоких частей земной коры — примерно до 60 км»*. Надо, однако, отметить, что существующие оценки количества воды в недрах нашей планеты довольно разноречивы.

Горные породы — коллекторы подземных вод

Подземные воды обычно встречаются на глубинах от первых метров до нескольких десятков метров от дневной поверхности. Ниже уровня подземных вод практически все поры и трещины в горных породах заполнены водой. Лишь на локальных участках нефтяных и газовых залежей порово-трещинное пространство занято нефтью или газом. Таким образом, распределение воды в земной коре зависит в основном от пористости и трещиноватости горных пород. Количество химически связанной воды (кристаллизационной и конституционной) определяется не объемом пустот, а наличием минералов, содержащих воду.

Пористость породы зависит от размера, формы и расположения минеральных зерен, наличия цемента, связующего эти зерна. Процессы, происходящие в горных породах, могут приводить к уменьшению или увеличению пористости. Горные породы испытывают давление вышележащих толщ, что способствует сближению минеральных зерен, их перекристаллизации. Из растворов, заполняющих поры, при определенных условиях (изменение температуры, давления, состава раствора) могут выпадать растворенные вещества, которые заполняют промежутки между зернами, цементируют их. Противоположное явление называют выщелачиванием породы. При этом под действием растворов разрушаются минеральные зерна или цемент, растворенное вещество выносится из породы, пористость ее увеличивается.

* Вернадский В. И. Избр. соч.: В 5-ти т. М.: Изд-во АН СССР, 1960, т. 4, кн. 2, с. 33.

Значения пористости горных пород изменяются в широких пределах — от долей процента до 90%. Пористость глинистых илов, образующихся на дне моря, достигает 75—90%. Высокую пористость имеют хорошо отсортированные пески (40—45%) и песчаники (25—30%). Еще более значительна пористость (до 50—60%) у некоторых вулканических пород — пемзы, туфа. Низкой пористостью (в среднем 1—4%) обладают метаморфические породы — сланцы, гнейсы, мрамор. У большинства изверженных пород, таких, как граниты, базальты, пористость менее 1%.

Еще одним показателем пустотности пород является их трещиноватость. Трещины образуются под действием напряжений, возникающих при сжатии и растяжении земной коры, а также при остывании магматических пород. В поверхностных условиях трещины развиваются в результате выветривания пород, под влиянием воды, атмосферы, перепадов температур. Причинами возникновения трещин могут быть и некоторые другие геологические процессы. Трещиноватость образуется не только в плотных, скальных породах, но и в пластичных породах — глинах.

Трещиноватость пород, как и их пористость, изменяется под действием вторичных процессов, приводящих к расширению ранее образовавшихся трещин или к их закупорке, заполнению минеральным веществом. Общая пустотность породы равна суммарному объему пор и трещин.

Движение воды в горных породах зависит от их водопроницаемости. Последняя определяется размерами и количеством сообщающихся пор и трещин, физико-химическими свойствами пород и фильтрующейся воды. К наиболее проницаемым породам относятся галечники, крупнозернистые пески, скальные породы с крупными трещинами и пустотами. Низкой проницаемостью обладают нетрещиноватые скальные породы, а также глины. Эта особенность глин, имеющих высокую пористость, обусловлена структурой глинистых минералов и преимущественным содержанием в глинах связанной воды, которая, будучи малоподвижной, препятствует фильтрации свободной воды.

Генетические типы подземных вод

Подземные воды — составная часть литосферы, и их формирование тесно связано с образованием горных пород и минералов. Вместе с тем в силу своей подвижности вода может относительно быстро (в масштабах геологического времени) перемещаться в различных зонах литосферы и принимать участие в протекающих там геологических процессах.

Подземные воды полигенетичны, они могут возникнуть разными путями. По происхождению различают следующие основные типы подземных вод: инфильтрационные, седиментационные, возрожденные и магматические.

Инфильтрационные воды образуются за счет атмосферных осадков или талых вод, просачивающихся в горные породы (рис. 9, а). Другим источником питания инфильтрационных вод служит поступление в породы поверхностных вод суши, например во время речных паводков. Инфильтрационные воды широко распространены в верхних горизонтах земной коры, где происходит интенсивный водообмен. В условиях слабого водообмена, обычно на значительной глубине, могут сохраняться и древние инфильтрационные воды.

Происхождение вод седиментационного типа связано с отложением (седиментацией) морских осадков (рис. 9, б). Влажность морских илов в придонных слоях достигает 80%. Уплотняясь по мере погружения под тяжестью вновь накапливающихся осадков, илы теряют часть воды. Эволюция седиментационных вод тесно связана с преобразованием морских осадков в горную породу — с литификацией осадков. В процессе литификации изменяется не только минералогический состав осадков, но и химический состав взаимодействующей с ними воды. Поэтому химический состав вод седиментационного генезиса чаще всего существенно отличается от состава исходных морских вод.

Древние седиментационные воды сохраняются в толще горных пород после отступления моря, если в условиях затрудненного водообмена они не были замещены водами инфильтрационного происхождения. Седиментационные воды нередко встречаются в континентальных областях на значительном расстоянии от побережья; здесь был древний морской бассейн.

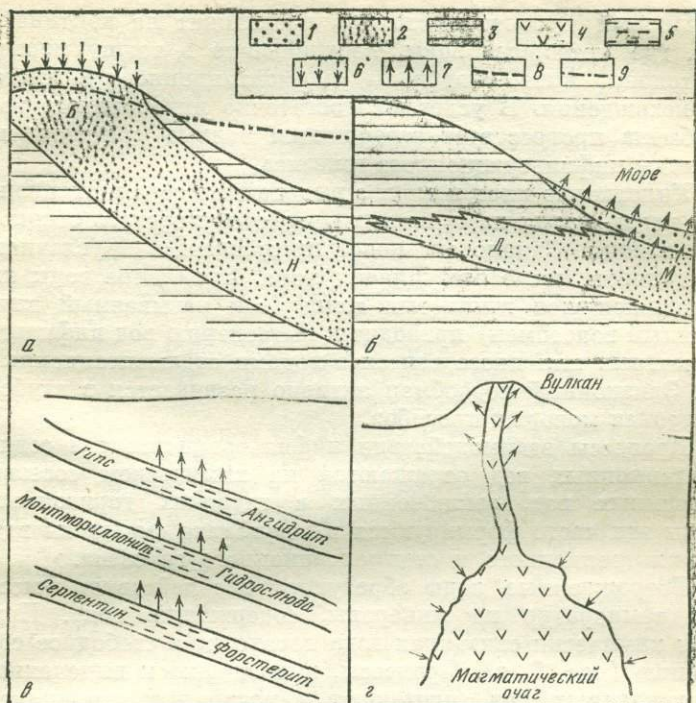


Рис. 9. Основные генетические типы подземных вод

а — инфильтрационные воды: Б — безнапорные, Н — напорные; б — седиментационные воды: М — молодые, Д — древние; в — возрожденные воды; г — магматические воды. 1 — илы; 2 — проницаемые породы; 3 — слабопроницаемые породы; 4 — магма; 5 — зона дегидратации водных минералов; 6 — инфильтрация атмосферных осадков; 7 — пути движения подземных вод; 8 — свободный уровень безнапорных вод; 9 — пьезометрический уровень напорных вод

Воды седиментационного и инфильтрационного происхождения составляют основную массу подземных вод, заключенных в верхних горизонтах земной коры. Соотношение вод этих типов в том или ином районе зависит от геологической истории района, характера гидрогеологических структур, условий водообмена. Такое соотношение определяется результатами воздействия двух противоположных процессов — инфильтрации атмосферных осадков и выделения воды из уплотняющихся глинистых толщ.

Первый процесс постоянно происходит на континентах, где метеорные воды, поступающие в толщу пород, постепенно вытесняют воды седиментационного и иного происхождения. В условиях достаточно интенсивного водообмена процесс этот завершается полным замещением на воды инфильтрационного генезиса.

Уплотнение илов и глин с выделением седиментационной воды — один из основных процессов морского осадко-накопления. Однако он может продолжаться в условиях континента, после отступления моря. Выделение воды из уплотняющихся глинистых толщ (так называемый элизионный водообмен) приводит к вытеснению вод инфильтрационных или иного генезиса водами седиментационными. Элизионный водообмен активно развивается в глубоких зонах молодых прогибов.

Процессы взаимодействия инфильтрационных и седиментационных вод отражаются на химическом составе подземных вод, заключенных в глубоких горизонтах. Воды эти часто формируются в результате смешения вод инфильтрационного и седиментационного генезиса.

Возрожденные воды образуются под действием высоких температур на минералы, содержащие воду. При этом химически связанная вода переходит в свободное состояние (рис. 9, в). Процессы, приводящие к выделению возрожденных вод, протекают в различных термодинамических зонах земной коры. Уже при температурах 80—90° С начинает терять воду гипс, который превращается в безводный ангидрит. При полном превращении гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в ангидрит CaSO_4 из каждой тонны гипса выделится около 210 кг воды. Дегидратация гипса происходит также при повышенном давлении, поскольку объем его гораздо больше, чем объем ангидрита.

По данным чл.-кор. АН СССР Н. И. Хитарова и В. А. Пугина, на глубинах от 2 до 6 км (в зависимости от температуры и давления) преобразуются глинистые минералы с переходом монтмориллонита, содержащего 12—24% воды, в гидрослюды, в которых обычно до 10% воды. При этом высвобождается большое количество так называемой межслоевой воды, заключенной в кристаллической решетке монтмориллонита. В глубоких высокотемпературных зонах литосферы происходит дегидратация серпентина, включающего около 13% воды. Подобные процессы характерны и для других водных минералов.

Выделение связанной воды, заключенной в минералах,

является следствием метаморфизма пород, погружающихся в высокотемпературную зону. Освобождающаяся при этом возрожденная вода начинает свое движение к поверхности Земли и становится активным участником геологических процессов.

Происхождение магматических вод связано с их выделением из расплавленной магмы (рис. 9, з). Эксперименты, проведенные Н. И. Хитаровым и др., показали, что магматический расплав способен растворять, ассимилировать воду при высоком давлении и выделять ее по мере снижения давления. Следовательно, магма на больших глубинах поглощает воду из пород, с которыми она контактирует, а поднимаясь по вулканическому каналу в зону пониженных давлений, освобождается от избыточной воды. Известно, что при вулканических извержениях выделяется огромное количество газов, в составе которых основное место занимают пары воды.

Содержание воды в подкоровом магматическом расплаве, по данным большинства исследователей, составляет 1—2% по весу. Однако растворимость воды в расплаве значительно выше, что определяет возможность обогащения расплава водой в соответствующих условиях. Действительно, в некоторых магматических породах, образовавшихся на большой глубине, при высоких давлениях, количество связанной воды достигает 4—5%.

Большой интерес вызывают представления о магмах, существенно обогащенных водой. Акад. Д. С. Коржинский разработал теорию трансмагматических растворов, которые поднимаются из глубоких подкоровых слоев и принимают участие в рудообразовании. По расчетам советского вулканолога В. В. Аверьева, вынос тепла в длительно действующих гидротермальных системах вулканических районов столь велик, что не может быть обеспечен только за счет остывания масс магматического материала. Он полагал, что стабильный тепловой режим гидротермальных систем связан с поступлением водосодержащей магмы, которая выделяет эндогенный пар, или водный флюид.

Таким образом, магматические воды могут быть неоднородны по своему происхождению. Наряду с водами, изначально находившимися в магме при ее образовании, магма может ассимилировать из окружающих пород воды инфильтрационного или седиментационного генезиса, а также воды, возрожденные, выделяющиеся при дегидратации минералов.

Физические свойства и химический состав подземных вод

По своим физическим свойствам вода существенно отличается от большинства природных соединений. При плавлении вода не расширяется, как почти все остальные вещества, а сжимается. Плотность воды растет с повышением температуры от 0 до 4°С и лишь при более высоких температурах начинает уменьшаться. Вода отличается от других веществ необычайно высокими величинами удельной теплоемкости, удельной теплоты плавления и кипения. Известны и другие аномалии физических свойств воды. Все они объясняются особенностями строения молекулы воды и характером межмолекулярных связей.

Физические свойства подземных вод зависят от вида воды, состава и концентрации растворенных веществ, температуры и давления. Если пресные подземные воды имеют плотность, близкую к 1 г/см³, то плотность концентрированных рассолов достигает 1,3—1,4 г/см³.

Температура и давление в недрах возрастают с глубиной. В среднем на каждые 100 м глубины рост температуры составляет 3°С. Гидростатическое давление подземных вод увеличивается на 1 ат на каждые 10 м глубины. Для более плотных рассолов этот градиент соответственно повышается. В определенных условиях воды глубоких горизонтов воспринимают геостатическое давление вышележащих толщ пород. При этом давление подземных вод возрастает на 2,3 ат с углублением на 10 м.

Повышение температуры приводит к снижению плотности подземных вод. Плотность пресной воды при 100°С равна 0,958 г/см³, при 250°С — 0,799 г/см³. С ростом давления плотность воды увеличивается. Коэффициент сжимаемости пресной воды равен $5 \cdot 10^{-5}$ 1/ат. Это значит, например, что при давлении 200 ат вода сжимается на 1% и соответственно повышается ее плотность. Упругие свойства воды играют важную роль в подземной гидродинамике. Повышение температуры сопровождается значительным уменьшением вязкости подземных вод, что облегчает их фильтрацию через мельчайшие поры и трещины.

От подземных вод, находящихся в свободном состоянии, резко отличаются по своим физическим свойствам

связанные воды. Плотность сорбированной воды зависит от влажности породы и может достигать 2 г/см^3 . Поэтому переход такой воды в свободную сопровождается увеличением объема. Прочносвязанная вода характеризуется высокой вязкостью, температура ее замерзания -78°С .

При температуре выше критической, которая для пресной воды равна 374° , а для водных растворов $400-450^\circ \text{С}$, исчезают различия физических свойств жидкости и пара. Вода в таком надкритическом состоянии обладает более низкими плотностью и вязкостью, чем жидкая вода. Низкая вязкость надкритической воды улучшает ее способность к миграции.

Соприкасаясь на путях своего движения с разнообразными горными породами, подземные воды обогащаются многими химическими соединениями. Подземные воды являются сложными природными растворами, в которых содержатся ионы, молекулы разных солей, коллоидные соединения, газы.

Содержание в подземных водах твердых веществ в растворенном виде (общая минерализация подземных вод) изменяется в очень широких пределах. Принято различать подземные воды по минерализации: пресные до 1 г/л , солоноватые $1-3 \text{ г/л}$, соленые $3-35 \text{ г/л}$. Воды с минерализацией более высокой, чем морская (35 г/л), относятся к рассолам. Наиболее концентрированные рассолы имеют минерализацию до 600 г/л и выше. Такие рассолы встречаются в древних соленосных отложениях Восточной Сибири и в других регионах. Так, рассол из Омолойской скважины содержит в 1 л 626 г солей — хлоридов кальция и магния. В таком рассоле солей по весу почти столько же, сколько и воды-растворителя. Встречаются подземные воды с чрезвычайно низкой минерализацией — до $0,1 \text{ г/л}$. Они распространены преимущественно в высокогорных областях.

В большинстве случаев подземные воды содержат определенный набор ионов: кальция, натрия, магния, хлора, сульфата, гидрокарбоната. Сочетание преобладающих в растворе ионов определяет химический тип подземных вод. Среди пресных вод чаще всего встречаются гидрокарбонатно-кальциевые. Рассолы средней концентрации обычно относятся к хлоридно-натриевому типу, а крепкие рассолы — хлоридные, кальциевые и магниевые.

Существуют два основных источника накопления солей в подземных водах. Первый — выщелачивание горных пород. Второй — испарение и концентрация. Наиболее интенсивная испарительная концентрация происходит при неглубоком залегании подземных вод в засушливых областях.

Помимо упомянутых главных компонентов ионного состава, подземные воды содержат целый ряд растворенных соединений. В зависимости от концентрации их относят к второстепенным компонентам, микрокомпонентам и рассеянным компонентам. К второстепенным компонентам принадлежат железо, кремний, калий, карбонаты, нитраты. В определенных условиях они могут иметь повышенную концентрацию и даже служить преобладающим компонентом подземных вод. Например, в северных районах кремниевая кислота нередко занимает основное место в составе грунтовых вод с очень низкой минерализацией. Карбонатный ион (CO_3^{2-}) встречается только в водах, имеющих щелочную реакцию.

Широко распространены в подземных водах бром, йод, фтор, бор, стронций, барий и другие элементы. Содержание их в глубоких горизонтах нередко достигает десятков и сотен миллиграммов в литре. Тяжелые металлы обычно имеются в водах в очень малых концентрациях — сотые и тысячные доли миллиграмма на литр. Однако в водах некоторых рудных месторождений их количество резко возрастает.

Повсеместно содержатся в подземных водах органические вещества. Концентрация их обычно составляет десятки и сотни миллиграммов на литр. Различные органические соединения (углеводороды, органические кислоты и др.) поступают в подземные воды при взаимодействии с залежами нефти, выщелачивании горных пород или под влиянием биохимических процессов.

Подземные воды содержат также в растворенном состоянии различные газы: углекислоту, азот, кислород, водород, метан, сероводород, гелий, радон и др. Газы эти могут иметь воздушное происхождение, они образуются также вследствие биохимических реакций, метаморфических или магматических процессов. Гелий и радон выделяются при радиоактивном распаде.

Известно, что растворимость газов растет с повышением давления и уменьшается с повышением температуры. В подземных водах растворимость газов увеличивает-

ся с глубиной, поскольку рост давления дает больший эффект, чем рост температуры. Воды глубоких горизонтов нередко содержат в растворенном состоянии в литре несколько сот кубических сантиметров газа (в расчете на нормальные условия). Газовый и ионный составы подземных вод тесно связаны друг с другом. Повышение концентрации растворенных солей приводит к снижению растворимости газов, а дегазация воды влияет на растворимость солей и может способствовать их выпадению в осадок.

Формирование химического состава подземных вод происходит в результате воздействия сложного комплекса различных природных факторов и процессов. Происхождение подземных вод, скорость их движения, характер водовмещающих пород, температура и давление, а также ряд других условий отражаются на составе подземных вод. Обычно наблюдается достаточно четкая вертикальная гидрохимическая зональность: с глубиной повышается общая минерализация подземных вод и изменяется их химический состав. В некоторых гидрогеологических структурах, где в глубоких горизонтах происходит интенсивный водообмен, эти горизонты лучше промыты и содержат менее минерализованные воды, чем вышележащие слои.

Химический состав подземных вод находится в тесной зависимости от различных геологических процессов, в том числе от процессов сейсмических. Поэтому концентрация определенных компонентов в водах может изменяться в результате землетрясений или служить индикатором подготовки землетрясений.

Современные представления о воде в различных зонах земной коры и верхней мантии

Наука располагает богатым арсеналом средств для изучения недр Земли, состава и состояния вещества на различных глубинах. Наиболее полную информацию дает бурение, которое позволяет непосредственно изучать пробы горных пород, жидкостей и газов, приуроченные к определенным участкам геологического разреза, измерять температуру и давление на разных глубинах. Благодаря геофизическим методам фиксируются характеристики горных пород, вскрытых скважиной.

В связи с тем что запасы полезных ископаемых, залегающих близ поверхности, быстро истощаются, глубина бурения непрерывно растет. Нефть и газ уже добывают с глубин до 7—8 км. До 1979 г. самой глубокой в мире (9590 м) была скважина 1-Берта Роджерс в США. Этот рекорд был перекрыт сверхглубокой скважиной на Кольском полуострове, которая в конце 1981 г. достигла отметки 11 тыс. м. Бурение Кольской сверхглубокой скважины продолжается, но уже полученные данные о породах, залегающих в глубоких горизонтах Балтийского щита, наличии там водных растворов и газов, неожиданно высоких температурах имеют первостепенное научное значение.

Обширная информация о глубоких недрах Земли получена с помощью геофизических методов исследований. Именно эти методы позволили выяснить строение и характер мантии и ядра нашей планеты. Изучение продуктов вулканических извержений, которые выносят магму с глубин в несколько десятков километров, дает возможность определить состав мантийных пород. Посредством экспериментов удается воссоздать условия некоторых глубинных процессов, что важно для характеристики вещества верхней мантии и глубоких зон земной коры.

Состояние воды, так же как и других компонентов вещества земных недр, определяется термодинамическими параметрами — температурой и давлением.

Температурные характеристики верхних частей земной коры изучены достаточно хорошо. Повышение температуры горных пород с глубиной (геотермический градиент) неодинаково для разных геологических структур. Наиболее высокий градиент отмечен в районах современной вулканической и гидротермальной деятельности. Так, на Паужетском месторождении термальных вод (Камчатка) температура 80—100°C зафиксирована местами на глубине 1 м. В геотермальном районе Солтон-Си (Калифорния, США) изотерма 300°C расположена на глубинах 1, 2—3 км.

На территориях, где вулканическая деятельность не проявляется, высокие геотермические градиенты (4—4,5°C/100 м) отмечены на молодых платформах и в краевых прогибах, низкие градиенты (1—1,5°C/100 м и менее) — на древних кристаллических щитах. На Медведковской площади в Азово-Кубанском прогибе темпе-

ратура на глубине 6319 м 223°С, в скважине 1-Бенавадес в Примексиканской впадине на глубине 7266 м 291°С. На Кольском полуострове (Балтийский щит) в пределах первого километра наблюдались очень низкие температуры — по скважине в Печенгском районе на глубине 800 м всего около 10°С. В Кольской сверхглубокой скважине температура на глубине 7200 м достигла 120°С, что указывает на заметное увеличение геотермического градиента с глубиной. Существенные различия температурного поля в разнородных геологических структурах обусловлены неодинаковыми величинами теплового потока — количества тепла, проходящего в единицу времени через определенную площадь.

Как же изменяется температура в глубоких частях земного шара? По оценкам акад. В. А. Магницкого [1965], температура на различных глубинах под континентами и океанами распределяется следующим образом:

Глубина, км	Континент			Океан		
	20	40	50	11	40	50
Температура, °С	380	650	700	130	850	1100

В. А. Магницкий полагает, что в более глубоких зонах температуры под континентами и океанами выравниваются и составляют на глубинах: 100 км 1100—1300°С, 400 км 1400—1700°С, 2900 км (граница ядра) 2200—4700°С.

Различия температурного поля, присущие тем или иным геологическим структурам, по-видимому, распространяются на всю земную кору. По данным геофизика Е. А. Любимовой, температура в основании земной коры, на разделе Мохоровичича в пределах Восточной Европы, изменяется от 400 до 1200°С. Наиболее низкая температура характерна для Балтийского и Украинского щитов и Русской платформы, наиболее высокая — для молодых складчатых сооружений Кавказа.

Давление в недрах нашей планеты равно весу вышележащих пород и изменяется от глубины, плотности пород и ускорения силы тяжести. По расчетам геофизика В. Н. Жаркова [1978], давление в основании земной коры находится в пределах 2,2—9,7 кбар, а на границе мантии и ядра 1354 кбар.

В зависимости от термодинамических условий изменяются внутренняя структура воды и ее свойства, определяющие характер взаимодействия подземных вод с горными породами и роль воды в различных геологичес-

ких процессах. Советские гидрогеологи В. И. Кононов и В. А. Ильин выделили в подземной гидросфере несколько гидрофизических зон, разграниченных термодинамическими рубежами.

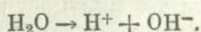
Зона твердой воды, молекулы которой образуют кристаллическую решетку льда, приурочена к верхней части земной коры в тех областях, где господствуют отрицательные температуры и сохраняется многолетняя мерзлота. Мощность этой зоны достигает нескольких сот метров, а в некоторых районах — 1 км и более.

Зона жидкой воды занимает область положительных докритических температур. Структурные связи между молекулами воды здесь изменяются в зависимости от температуры и давления. Нижняя граница зоны соответствует положению изотермы критических температур для водных растворов (400—450°С). В соответствии с особенностями температурного поля эта зона на щитах и платформах распространяется на всю земную кору, а в складчатых областях и молодых прогибах занимает лишь верхнюю часть коры.

Зона уплотненного надкритического флюида приурочена к интервалу температур 450—700°С; структурные связи между молекулами разрываются, и вода переходит в газообразное состояние. Однако в условиях высоких давлений на больших глубинах возникают нестойкие группировки молекул и плотность флюида увеличивается.

Зона мономерных молекул воды располагается в области температур 700—1100°С, при которых структурные связи отсутствуют и группировки молекул исчезают. Вода в этой зоне находится в газообразном состоянии, обладает высокой летучестью и принимает активное участие в процессах геохимической миграции элементов.

Зона диссоциированной воды находится глубже изотермы 1100°С. Здесь молекула воды распадается на ионы водорода и гидроксила:



При температурах, превышающих 1500°С, происходит диссоциация гидроксила на ионы кислорода и водорода.

Количество свободной воды в земной коре, как уже отмечалось, определяется пористостью и трещиноватостью пород. От наличия сообщающихся пор и трещин зависят условия движения подземных вод. В породах, липенных сообщающихся каналов, миграция воды су-

щественно затруднена и может происходить только за счет диффузионного проникновения, преимущественно вдоль границ минеральных зерен.

В целом для земной коры характерно прогрессирующее уплотнение пород с глубиной, сокращение их пористости и трещиноватости. Среди осадочных пород в наибольшей степени уплотняются глины (рис. 10) и значительно меньше — пески. Однако воздействие ряда процессов и факторов способствует сохранению сравнительно хороших коллекторов в глубоких зонах. Высокотемпературные водные растворы, циркулирующие в таких зонах, могут обладать повышенной способностью к выщелачиванию пород. Высокое давление воды и действующие напряжения препятствуют смыканию трещин. Преобразование глинистых пород в глубинных условиях создает возможность для развития трещин и пор, повышения проницаемости.

Опыт глубокого бурения, а также эксплуатации нефтяных и газовых месторождений свидетельствует о том, что в пределах максимальных глубин, достигнутых скважинами, встречаются породы с достаточно высокой пустотностью (поры или трещины) и проницаемостью. На второй Всесоюзной конференции по проблеме «Коллекторы нефти и газа на больших глубинах» в январе 1979 г. было показано, что во многих районах Советского Союза на глубине до 6—7 км имеются высокопродуктивные породы — коллекторы. Породы с пористостью около 5% обнаружены в Прикаспийской впадине на глубине 6660 м (Аралсорская скважина). В Восточно-Кубанской впадине породы с пористостью до 12,6% встречены на глубинах более 5 км. По данным глубокого бурения в США установлено, что не наблюдается существенного ухудшения пористости и проницаемости известняков на глубинах до 6 км. Значительный приток газа — свыше 70 тыс. м³/сут — получен из скважины Летбеттер-1 с интервала глубин 7140—8083 м. Следовательно, на этих глубинах породы обладают высокими коллекторскими свойствами.

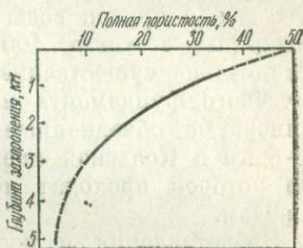


Рис. 10. Типовой график уплотнения глин с глубиной (по Н. Б. Вассоевичу)

Водонасыщенность и проницаемость кристаллических пород на больших глубинах обусловлены развитием тектонической трещиноватости. В Татарской АССР, близ села Миннибаева, пробурена скважина до глубины 5099 м, которая на протяжении более 3 км проходит по породам докембрийского кристаллического фундамента. В толще фундамента обнаружены трещиноватые проницаемые зоны, причем наблюдается увеличение трещиноватости с глубиной. Из этих зон получены притоки минерализованных вод, а приток воды из нижней, 400-метровой части скважины достигал 100 м³/сут. Таким образом, была установлена существенная обводненность пород кристаллического фундамента на значительных глубинах. Трещиноватые обводненные породы вскрыты на глубинах 7—8 км и Кольской сверхглубокой скважиной, весь разрез которой проходит по древнейшим кристаллическим породам.

Представления о коллекторских свойствах пород в более глубоких частях земной коры, не вскрытых бурением, остаются в значительной степени гипотетичными. Однако имеются достаточные основания полагать, что проницаемые обводненные породы распространены на глубинах, значительно превышающих достигнутые ныне скважинами. Н. И. Хитаров указывает, что поры и трещины закрываются при переходе породы в пластическое состояние при температурах, близких к точке плавления породы.

Подземные воды — наиболее подвижный компонент земной коры. Условия движения подземных вод в тех или иных зонах земной коры существенно различны. Скорости движения подземных вод изменяются в очень широких пределах — от довольно высоких, сопоставимых со скоростями поверхностных потоков (например, в подземных реках, что текут в крупных карстовых полостях), до ничтожных, когда перемещение частиц воды осуществляется в масштабах геологического времени. В зависимости от энергетической обстановки, определяющей условия миграции подземных вод, автор выделяет три типа гидродинамического режима: инфильтрационный, эливионный и глубинный.

В условиях инфильтрационного режима движение подземных вод происходит за счет разности напоров в зоне современной инфильтрации и формирования напора и в зоне разгрузки. Запасы подземных вод пополняются

путем поступления атмосферных осадков или поверхностных вод. Пластовое давление подземных вод не может быть выше, чем давление столба воды, заключенного между пластом и его выходами на поверхность в области питания.

При элизионном режиме движение подземных вод осуществляется в результате их выжимания из пород, уплотняющихся под действием геостатического давления или тектонических напряжений. Наиболее значительно уплотнение в толщах глинистых пород. Напор вод в условиях элизионного режима гораздо выше, чем при инфильтрационном, а пластовые давления могут приближаться к величине геостатической нагрузки покрывающей толщи пород. Если уплотнение пород происходит под действием тектонических напряжений, пластовые давления могут даже превышать величину геостатической нагрузки. Например, в Пакистане, у подножия Главного Гималайского хребта, в скважине на глубине 630 м было зафиксировано пластовое давление 167 ат, которое на 20% превышает величину геостатического и связано с воздействием мощных тектонических напряжений.

Элизионный режим, обусловленный выделением воды из глинистых толщ при их погружении на большую глубину, характерен для формирующихся или недавно образовавшихся прогибов. В таких прогибах, обрамляющих молодые горные сооружения Юга СССР и сопредельных стран (Карпаты, Крым, Кавказ, Копет-Даг и др.), часто встречаются аномально высокие пластовые давления. При бурении скважины на Галюгаевской площади, в осевой части Терско-Каспийского прогиба, пластовое давление на глубине 5330 м превышало 810 ат.

В глубоких частях водонасыщенной зоны земной коры, изолированных от поверхностных областей питания и разгрузки, распространен режим глубинного типа. Здесь под действием высоких температур и давлений перерабатывается минеральное вещество, начинается метаморфизация осадочных пород. При этом пористость пород сокращается вследствие цементации и перекристаллизации, а в результате обезвоживания минералов выделяется свободная вода. Сокращение пористости и выделение дополнительных количеств воды создают в глубинных водонапорных системах чрезвычайно высокие давления воды, близкие к величине геостатической нагрузки и даже превышающие эту величину.

Таким образом, в условиях элизионного и глубинного режимов основной причиной движения вод служит воздействие на них геостатического давления и тектонических напряжений. Инфильтрационный режим, распространенный в верхних частях земной коры, на более значительных глубинах сменяется элизионным или глубинным. Нижняя граница инфильтрационного режима, где намечается резкое увеличение давлений подземных вод, судя по имеющимся данным, проходит на глубинах от 1 до 6—7 км, а в некоторых районах, вероятно, ниже. Положение этой границы определяется геологическим строением и историей развития района. В древних стабильных структурах граница расположена глубже, в структурах, испытавших недавнее погружение, она повышается.

Существенное различие указанных типов гидродинамического режима заключается в том, что отношение пластового (порового) давления подземных вод к геостатическому давлению вышележащей толщи пород составляет в зоне действия инфильтрационного режима 0,43—0,48. В зонах элизионного или глубинного режима это отношение может приближаться к 1 и в некоторых случаях (при воздействии тектонических напряжений) даже превышать 1. Это весьма важно, ибо при высоком (близком к геостатическому) давлении подземных вод может резко возрастать их роль в процессах деформирования горных пород.

Выше уже указывалось на неоднородное содержание воды в земной коре и верхней мантии. Такая неоднородность наблюдается и в плане, и в вертикальном разрезе. Горизонтальная неоднородность обусловлена тем, что для различных геологических структур характерны породы с определенными коллекторскими свойствами. Если рассматривать горизонтальный срез на определенной глубине, то наиболее высокими коллекторскими показателями и, следовательно, обводненностью обладают структуры, сложенные обломочными породами, наименьшей обводненностью — кристаллические массивы. По-видимому, можно говорить о сильно- и слабообводненных блоках земной коры. К первым относятся блоки, испытавшие значительное погружение, — прогибы, заполненные осадочными отложениями (рис. 11, а). В глубоких прогибах кристаллический фундамент залегает на глубине 10—15 км.

Блоки земной коры, характеризующиеся длительной тенденцией к воздыманию, — кристаллические массивы —

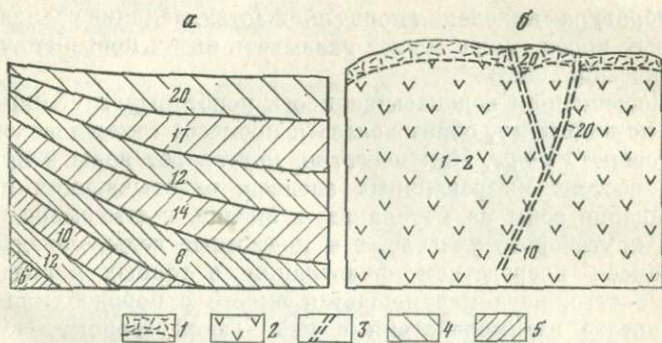


Рис. 11. Различная обводненность блоков земной коры

а — сильнообводненный блок (прогиб осадочной толщи); *б* — слабообводненный блок (кристаллический массив); 1 — верхний трещиноватый горизонт и его граница; 2 — кристаллические породы с низкой трещиноватостью; 3 — обводненная зона тектонического нарушения; 4, 5 — осадочные породы с различной водонасыщенностью. Цифры указывают общую пористость (трещиноватость) пород и их водонасыщенность в процентах, характерные для верхней 5-километровой толщи земной коры

обводнены слабо. За пределами верхнего горизонта выветривания, который простирается на глубину несколько десятков метров, водоносность кристаллических массивов связана с зонами тектонического дробления, занимающими лишь небольшую часть в объеме всего массива (рис. 11, б).

В вертикальном разрезе общей тенденцией служит снижение обводненности пород с глубиной. Однако на этом фоне нередко встречается обратное явление, когда с глубиной пустотность и обводненность пород увеличиваются.

В глубоких зонах земной коры, а также в верхней мантии, по-видимому, имеются слои с повышенным содержанием воды. Геофизическими методами во многих районах обнаружены аномалии скоростей сейсмических волн и электрического сопротивления. Слои пониженных скоростей и сопротивлений встречены на различных глубинах, чаще всего в интервале 10—30 км, в Прибайкалье, на Карпатах, Урале, Тянь-Шане, Памире, а также в платформенных областях Восточной Европы и Сибири. Природа слоев пониженных скоростей недостаточно ясна, однако в числе возможных причин их образования называют частичное расплавление пород или обогащение их водными растворами. Поскольку в присутствии воды

температура плавления пород снижается, наличие расплавленных пород также может указывать на их повышенную водонасыщенность.

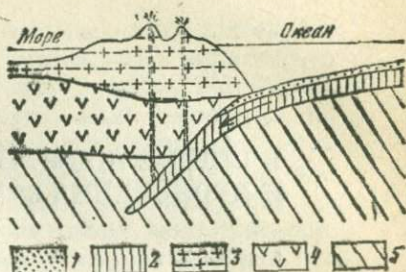
Повышенная водонасыщенность некоторых глубинных зон, по-видимому, образовалась в процессе геологического круговорота воды. Как известно, круговорот воды в природе состоит из различных звеньев, охватывающих перемещение воды на материках, в океане, в атмосфере. В этом круговороте участвуют и подземные воды, передвигающиеся посредством фильтрации в горных породах. Кроме того, вода перемещается вместе с породой или в результате взаимодействия с ней. Такой геологический круговорот воды приобретает различные формы и отличается большой длительностью, которая обычно исчисляется масштабами геологического времени. Однако известны и довольно быстрые процессы, например движение воды, растворенной в магме, или в составе грязевой массы по каналам магматических или грязевых вулканов.

Проблема геологического круговорота воды находится в начальной стадии разработки. Сложность ее заключается в том, что она тесно переплетается с многими коренными проблемами современной геологии, еще не получившими окончательного решения, например с происхождением океанов, тектоникой плит и др. В геологическом круговороте воды следует различать две основные ветви — нисходящую и восходящую. В нисходящей ветви при погружении водосодержащих пород происходит их дегидратация: удаление избыточной свободной, а на больших глубинах — связанной воды. В восходящей ветви вода, выделившаяся из пород, перемещается в зону меньших глубин. Приведем некоторые примеры.

Осадки, формирующиеся в морских бассейнах, имеют высокую влажность (до 80%). По мере уплотнения глинистые илы теряют часть воды. Обезвоживание продолжается и после преобразования ила в глинистую породу. Глины, содержащие связанную воду, теряют ее при погружении в более глубокие зоны земной коры до тех пор, пока глина не метаморфизуется в сланец. Таким образом, процесс преобразования первичного осадка в глину и затем в сланец сопровождается дегидратацией. При этом высвобождающаяся вода вовлекается в фильтрационный поток, а оставшаяся в породе вода перемещается вместе с ней. Если процесс погружения глин происходит

Рис. 12. Схема поддвигания океанической земной коры на островных дугах (по О. Г. Сорохтину и др.)

1 — донные осадки; 2 — океаническая кора; 3 — осадочные и вулканогенные породы; 4 — континентальная кора; 5 — верхняя мантия



быстро, например в молодых прогибах, и условия оттока воды затруднены, глины сохраняют аномально высокую (для данной глубины) влажность.

Выделение физически связанной воды характерно не только для глин, но и для других мелкозернистых осадочных пород по мере их погружения в глубокие зоны, где эти породы испытывают воздействие высоких температур и давлений. В условиях высоких температур происходит дегидратация минералов, содержащих химически связанную воду. Эта возрожденная вода, перейдя в свободное состояние, начинает свое движение к поверхности.

Под дном океанов интенсивный геологический круговорот воды, по-видимому, связан с процессами серпентинизации и десерпентинизации, которые протекают соответственно с поглощением или выделением воды.

Образование серпентина, входящего в состав океанической земной коры, требует значительных количеств воды. В соответствии с представлениями американского ученого Г. Хесса, советского океанолога О. Г. Сорохтина и других сторонников тектоники плит, при поддвигании океанической земной коры под континентальную на островных дугах породы океанической коры поступают в область высоких температур, где осуществляется дегидратация серпентина и других водосодержащих минералов. Одна молекула серпентина $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ при этом выделяет две молекулы H_2O . При дегидратации каолина $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ образуются четыре молекулы воды. Под влиянием высоких температур также обезвоживаются донные осадки, покрывающие базальты океанической коры. Подобным образом ряд исследователей объясняют интенсивную гидротермальную деятельность на островных дугах, где огромное количество воды выделяется при вулканических извержениях и из многочисленных термальных источников (рис. 12).

ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПОДГОТОВКУ И ПРОЯВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Мы уже отмечали, что разрыв в очаге землетрясения происходит, когда величина тектонических напряжений превышает прочность среды. Это условие может быть выполнено в трех случаях: 1) уровень напряжений возрастает при неизменной прочности среды; 2) прочность среды снижается до постоянного уровня напряжений; 3) одновременно растут напряжения и снижается прочность. Следовательно, роль воды, так же как и любого другого фактора, в процессах подготовки землетрясения нужно рассматривать с позиций влияния на прочностные характеристики и воздействия на величину напряжений.

Неоднородное содержание воды и различное ее состояние в тех или иных зонах коры и верхней мантии, очевидно, сказываются и на степени участия воды в сейсмических процессах. Можно полагать, что такое участие более существенно для верхних частей земной коры, где содержание воды выше. Поэтому полезно еще раз вернуться к распределению очагов землетрясений по глубине.

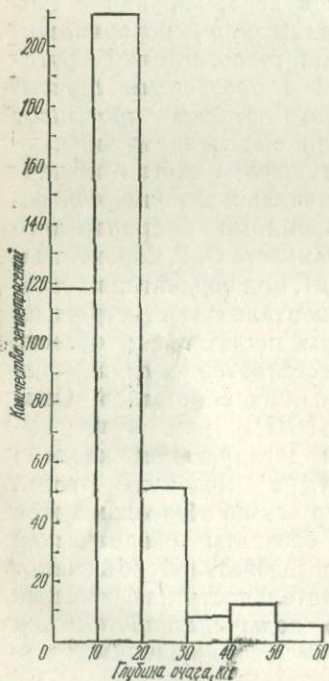


Рис. 13. Распределение глубины землетрясений Средней Азии и Казахстана с очагами в земной коре и магнитудой 4 и выше за 1920—1975 гг.

Напомним, что на долю нормальных землетрясений с очагами преимущественно в земной коре приходится преобладающая часть сейсмической энергии. Во многих областях, которым присущи нормальные землетрясения, большая часть очагов локализуется в верхних горизонтах земной коры, на глубинах до 20—30 км. Например, для сейсмичных областей Средней Азии и Казахстана, где происходят главным образом нормальные землетрясения, основное количество очагов находится на глубине до 20 км.

Как видно на рис. 13, из 394 нормальных землетрясений (с магнитудой более 4) 118 было на глубине до 10 км, а 211 — в интервале 10—20 км. Еще меньшие глубины землетрясений характерны для Италии, где около 90% очагов располагалось не глубже 8 км. Можно, таким образом, считать, что значительная часть очагов землетрясений принадлежит к глубинам, где сохраняются открытые поры и трещины, заполненные водой.

Гидрогеологические особенности пород в очаговых зонах почти совсем не изучены. Поскольку очаговые зоны чаще всего связаны с крупными разломами или узлами их пересечения, эти зоны должны отличаться повышенной обводненностью от соседних менее нарушенных участков. Подвижность сейсмогенных трещин препятствует их заживанию. Следует ожидать, что подобные трещины обводнены на особенно больших глубинах в тех районах, где действуют растягивающие напряжения.

Вода и механические процессы в очаге землетрясения

Сейчас уже не подлежит сомнению, что по крайней мере для неглубоких землетрясений вода должна рассматриваться как составная часть среды, где формируются очаги. Деформации в водонасыщенной породе происходят иначе, чем в такой же породе, лишенной воды. Присутствие воды отражается на сопротивлении горных пород сдвигу, влияет на характер развития трещин.

Американские ученые М. Хубберт и В. Раби в серии статей, опубликованных в 1959—1965 гг., обратили внимание на роль подземных вод в формировании крупных покровных надвигов. Это тектонические разрывы, по которым огромные массивы горных пород перемещены по горизонтальной или очень пологой поверхности на де-

сятки и даже на первые сотни километров. Образование таких надвигов, встречающихся во многих горно-складчатых областях, трудно было объяснить с точки зрения механики, ибо усилия для преодоления трения и перемещения покрова столь велики, что горные породы не выдержат сжатия и разрушатся.

Хубберт и Раби, выполнив расчеты и проведя эксперименты, показали, что высокое давление поровых вод нейтрализует геостатическую нагрузку покрывающей толщи пород и снижает трение в основании надвига при его передвижении. Напряжение сдвига, необходимое чтобы переместить массу породы, определяется уравнением

$$\tau = c + (\sigma - p)f,$$

где τ — напряжение сдвига; c — сцепление горных пород; σ — нормальное напряжение, равное геостатической нагрузке; p — давление поровой воды; f — коэффициент трения.

Если поровое давление достигает величины нагрузки покрова надвига на его основание, трение снижается до нуля. Подобная зависимость наглядно подтверждается в опытах с тяжелыми блоками бетона. Блоки эти скользили по пористому бетону, помещенному в непроницаемый ящик, где создавалось повышенное давление воды (рис. 14).

Когда давление воды достигало определенной величины, трение уменьшалось настолько, что блоки можно было передвигать легким усилием руки.

Хубберт и Раби вычислили размеры покровов, которые могут быть перемещены при определенном отношении давления поровых вод в основании покрова к нагрузке пород, слагающих покров. Выяснилось, что при величине этого отношения 0,60 возможно передвижение на горизонтальной поверхности покровной плиты мощностью 6 км и протяженностью 37 км, а при отношении 0,95 — плиты той же мощности протяженностью 222 км.

Прочность различных пород на скалывающие деформации возрастает с увеличением всестороннего давления. Согласно опытам американского геофизика Дж. Хэндина, прочность известняка при всестороннем давлении 10 кбар равна 1000 кгс/см², а при давлении 30 кбар —

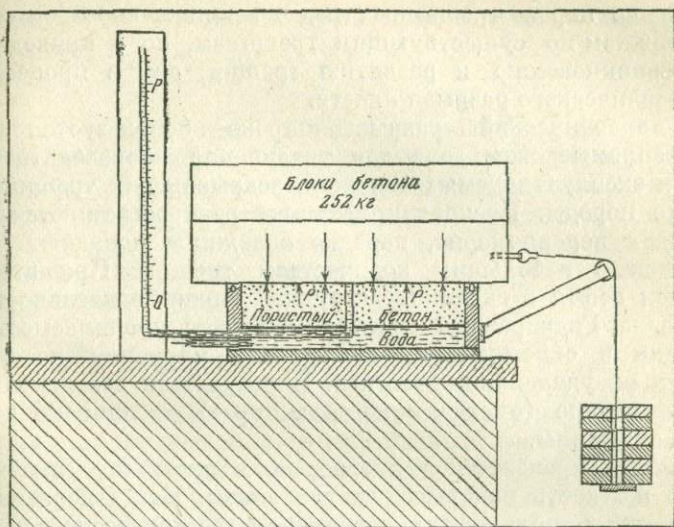


Рис. 14. Опыты М. Хубберта и В. Раби с бетонными блоками

5700 кгс/см². Для базальта при таких же величинах всестороннего давления прочность увеличивается соответственно от 2900 до 13 000 кгс/см². Если частично нейтрализовать всестороннее давление и снизить его с 30 до 10 кбар путем повышения порового давления жидкости, прочность на скалывание уменьшится для известняка в 5,7 раза, а для базальта в 4,5 раза.

Теоретические и экспериментальные данные о роли порового давления воды в деформациях скалывания привлекли внимание сейсмологов, изучающих физику очага землетрясения. Применительно к очагу напряжение, необходимое для сдвиговой деформации, зависит от давления поровой воды. Чем выше это давление, тем меньше трение на плоскости сдвига и, следовательно, ниже величина напряжения, при которой осуществляется сейсмический разрыв. Такой механизм воздействия воды принимается дилатантно-диффузионной моделью очага. В ней на разных стадиях подготовки землетрясения прочность пород и сопротивление их сдвигу изменяются в зависимости от величины порового давления. Высокое

давление порово-трещинных вод не только способствует подвижкам по существующим трещинам, но и приводит к возникновению и развитию трещин, как в процессе гидравлического разрыва пласта.

Гидравлический разрыв широко используется в нефтепромысловом деле для увеличения производительности эксплуатируемых скважин, вскрывающих трещиноватые породы. Поскольку трещины распространяются в породах неравномерно, нередко скважины попадают на участок с небольшим количеством трещин. При этом приток нефти в скважину затруднен и производительность ее низка. Гидроразрыв позволяет повысить проницаемость трещин в окрестностях скважины и улучшить доступ нефти из удаленных участков. В результате достигается существенное (иногда в несколько раз) увеличение дебита скважины.

Чтобы произвести гидроразрыв, в скважину закачивают жидкость под высоким давлением. Когда давление жидкости приближается к величине геостатической нагрузки (т. е. веса вышележащей толщи пород), происходит разрыв — расширяются существующие трещины и возникают новые. Затем в скважину вместе с жидкостью закачивают крупнозернистый песок, который попадает в открытые трещины и препятствует их смыканию после того, как давление будет снижено.

Может ли гидроразрыв произойти в естественных условиях? Да, может, отвечает на этот вопрос американский ученый Д. Секор, изучавший условия образования трещин растяжения в земной коре под действием флюидов. Если давление жидкости приближается к нагрузке вышележащей толщи пород, начинается процесс развития трещин. Он состоит из многочисленных коротких эпизодов распространения трещин, чередующихся с более длительными периодами, когда поровая жидкость из окружающих пород просачивается в трещину и раскрывает ее. Секор полагает, что в большинстве случаев породы содержат достаточно поровой жидкости, чтобы в них образовались трещины.

По-видимому, существует еще одна особенность развития трещин при повышенном давлении подземных вод. В процессе растрескивания массива пород сокращается общая площадь ненарушенных связей (перемычек между трещинами). При этом возрастают напряжения сдвига по площади сохранившихся связей, что выражается от-

ношением, известным из механики скальных пород:

$$\frac{\tau' - \tau}{\tau} = \frac{m}{1 - m} \left(1 - f \frac{\sigma}{\tau} \right),$$

где τ' — новое напряжение сохранившихся связей на сдвиг; m — коэффициент, характеризующий долю рабочей площади сечения, затронутую трещинами. Остальные обозначения те же, что и в формуле, приведенной выше.

Это отношение справедливо для сухих пород. Если трещины заполнены жидкостью, его нужно изменить следующим образом:

$$\frac{\tau' - \tau}{\tau} = \frac{m}{1 - m} \left(1 - f \frac{\sigma - p}{\tau} \right).$$

Из последней формулы видно, что при увеличении давления жидкости p относительный рост напряжений сдвига по площади сохранившихся связей также увеличится. Следовательно, возрастание давления воды способствует более быстрому растрескиванию массива не только в случае, если это давление близко к геостатическому (что приведет к гидроразрыву), но и при меньших величинах давления воды.

Таким образом, при повышении давления порово-трещинных вод в зоне будущего очага землетрясения уменьшается фрикционное сопротивление сдвигу, облегчается растрескивание пород. Когда величина давления достигает определенного предела, дальнейшее развитие трещин происходит под действием гидравлического разрыва. Кроме того, на ход деформаций влияют и физико-химические процессы, которые будут рассмотрены ниже.

Вернемся к моделям подготовки очага землетрясений. Заметим, что ДД-модель не учитывает важных особенностей воздействия воды на развитие деформаций в очаге. Дело в том, что для тех или иных очаговых зон в зависимости от их глубины, водонасыщенности, фильтрационных показателей пород процессы заполнения водой образовавшихся трещин и изменения давления воды будут протекать по-разному. Вследствие большого разнообразия гидрогеологических условий скорость и интенсивность указанных процессов должны изменяться в очень широких пределах, а в некоторых случаях эффекты, предусмотренные ДД-моделью, не смогут осуществиться.

Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования не учитывает различия характера деформаций в сухой и

водонасыщенной породах. Однако при участии воды деформации, предусмотренные этой моделью, при прочих равных условиях, должны развиваться быстрее и при меньших напряжениях, чем в сухой породе. Образование трещин разных масштабов и разрушение перемычек между трещинами будут облегчаться по мере роста давления воды.

Итак, повышение давления порово-трещинных вод может оказывать существенное воздействие на перераспределение напряжений и развитие деформаций в очаге. Это подтверждается на примере землетрясений, вызванных закачкой воды в глубокие скважины. Возможно ли такое воздействие в естественных условиях?

Все рассмотренные выше эффекты определяются не абсолютной величиной давления порово-трещинных вод, а соотношением этого давления и геостатической нагрузки. В предыдущем разделе говорилось о таком соотношении для зон с различными гидродинамическими режимами. Высокие, приближающиеся к 1, величины отношения давления подземных вод к геостатической нагрузке в некоторых районах встречаются уже на глубинах первых километров, а глубже 10 км, по-видимому, становятся закономерными. Значит, и в естественных условиях существуют возможности для участия воды в развитии деформации при подготовке землетрясения.

Для реализации таких возможностей нужно, чтобы давление воды в зоне будущего очага повышалось. Это происходит под действием разных причин. На давление подземных вод может влиять инфильтрация атмосферных осадков и талых вод, повышение уровня поверхностных вод. Давление вод также возрастает в случае сокращения пористости или трещиноватости водовмещающих пород, поступления в водоносный горизонт дополнительных порций воды в результате дегидратации пород. Непосредственно в зоне будущего очага землетрясения давление воды может повыситься при наличии сжимающих напряжений, приводящих к сокращению пористости или трещиноватости.

Надо полагать, что к повышению давления воды окажутся более чувствительными те сейсмогенные зоны, в которых исходное (фоновое) отношение давления подземных вод к геостатической нагрузке более высокое. Подобные условия характерны для районов так называемых гидродинамических аномалий. Крупный пояс гидродина-

мических аномалий, включающий молодые геологические структуры с недавними проявлениями тектонической активности, выделен автором на юге нашей страны. К этому поясу относятся гидродинамические аномалии в артезианских бассейнах Предкарпатья, Крыма, Северного Кавказа, Закавказья, Средней Азии. Близость пояса гидродинамических аномалий к высокосейсмичным областям, как видно, не случайна. Вопрос этот требует детальных исследований, но уже сейчас ясно, что и высокие давления подземных вод, и сейсмическая деятельность обусловлены общей причиной — современной тектонической активностью указанных областей. Возможно, что высокие давления подземных вод в этих областях влияют на их сейсмический режим.

Участие эффекта Ребиндера и других физико-химических явлений в подготовке землетрясений

Явление адсорбционного понижения прочности твердых тел, находящихся в контакте с некоторыми жидкостями или газами, было открыто акад. П. А. Ребиндером и получило название «эффекта Ребиндера». Исследование процессов, развивающихся на контакте твердых тел с различными средами, и влияния этих процессов на прочностные свойства материалов служит объектом физико-химической механики [Ребиндер, 1957].

Прочность хрупких твердых тел, в частности металлов и горных пород, зависит от так называемой поверхностной энергии. Эта энергия существенно снижается под действием поверхностно-активных веществ, которые адсорбируются на поверхности твердых тел и уменьшают их прочность. Многочисленными экспериментами установлены важные особенности проявления эффекта Ребиндера [Ребиндер, Щукин, 1972]. Прочностные свойства твердого тела могут быть резко ослаблены при воздействии ничтожных количеств поверхностно-активных веществ. Это снижение прочности нередко происходит довольно быстро, и вскоре после того, как поверхностно-активное вещество попадает на деталь, находящуюся под нагрузкой, деталь способна разрушиться. Под влиянием поверхностно-активных веществ изменяется характер деформации: пластичные деформации переходят в хрупкие, что ускоряет разрушение.

Адсорбционное снижение прочности различных твердых тел достигается при их контакте с расплавами солей, металлов или горных пород, водой и определенными водными растворами, а также с некоторыми другими жидкостями и парами.

Наиболее изучен эффект понижения прочности металлов. Если, например, цинковую проволоку покрыть тонким слоем ртути, сопротивление ее на разрыв уменьшится в 25—50 раз. Снижение прочности происходит вследствие ускоренного роста трещин. Если в сухом металле трещины при небольших нагрузках не растут, то под действием расплава рост трещин осуществляется при тех же нагрузках за счет ослабления межатомных связей, по мере поступления расплава в вершину трещины.

Как указывали П. А. Ребиндер и Е. Д. Щукин, отличительная особенность адсорбционных эффектов состоит в том, что они проявляются при совместном действии среды и определенных механических напряжений. Чтобы активная среда проникала в зародышевые трещины, необходимо наличие растягивающих напряжений. Сжимающие напряжения препятствуют адсорбционному понижению прочности.

Скорость развития трещины зависит от поступления жидкости к вершине трещины. Физикохимики Б. Д. Сумм и Ю. В. Горюнов отмечают, что прочность твердых тел резко уменьшается при условии, когда активная жидкость хорошо смачивает их поверхность и быстро растекается внутри трещин. Если жидкость плохо смачивает стенки трещины или поглощается ими, рост трещины прекратится.

При повышении температуры до определенного предела рост узких трещин ускоряется из-за снижения вязкости жидкости, которая быстрее заполняет трещину. Однако с дальнейшим возрастанием температуры металл становится пластичным, прекращается образование микротрещин, происходит их залечивание и адсорбционный эффект ослабляется или даже исчезает. П. А. Ребиндер и Е. Д. Щукин обратили внимание и на другие формы влияния температуры на адсорбционный эффект: при низких температурах твердое тело обладает большой хрупкостью и эффект не проявляется, при высоких температурах уменьшается адсорбция активного компонента, что ослабляет эффект. Таким образом, существует определенный интервал температур, где адсорбционный

эффект наиболее значителен. Эффект исчезает также при больших скоростях деформации, когда вследствие быстрого роста трещины жидкость не успевает достигнуть ее вершины.

Основные особенности адсорбционного понижения прочности, установленные для металлов, относятся и к горным породам. Эффект Ребиндера используется в технике для понижения твердости горных пород при бурении и для тонкого измельчения пород.

Понизители твердости в бурении были разработаны П. А. Ребиндером и его коллегами в 40-х годах. Внедрение понизителей твердости в тот период, когда было мало твердосплавных и алмазных инструментов, позволило существенно повысить производительность бурения. Действие понизителей твердости заключается в том, что активная жидкость проникает в микротрещины, раздвигает их и затрудняет залечивание, облегчая разрушение породы. В качестве понизителей твердости использовались растворы хлористого натрия, соды и некоторых других солей.

Опыты советских физикохимиков показали, что даже очень малые добавки воды (0,04%) заметно повышают скорость измельчения кварцевого песка по сравнению с сухим дроблением. Для мрамора снижение прочности достигало 13% с дистиллированной водой и 19% с раствором, близким по составу к глубинным подземным водам. При воздействии активными растворами горные породы измельчаются быстрее, чем в сухом виде.

В последнее время адсорбционный эффект привлекает внимание ученых и применительно к естественным процессам разрушения горных пород. Н. В. Перцов, Б. С. Коган и др. показали, что в условиях больших глубин, где породы подвергаются высокому всестороннему давлению, существующие в земной коре и в верхней мантии напряжения недостаточны для образования зияющих трещин без участия жидкости. Между тем геологи часто встречаются с трещинами различных размеров, по которым внедрилась магма.

Согласно опытам Н. В. Перцова, Б. С. Когана и др. в образцах базальта под действием расплавленных солей и окислов прочность может снижаться до 4 раз. На основе этого был сделан вывод, что трещинные внедрения магмы образуются при участии эффекта Ребиндера, когда адсорбционно-активная расплавленная порода способ-

ствуем развитию трещин при сравнительно невысоких напряжениях. Таким образом, еще один тектонофизический парадокс (вспомним гипотезу Хубберта и Раби относительно механизма образования крупных надвигов) может быть объяснен, если учитывать влияние жидкости. В данном случае роль жидкости играет расплавленная магма. Но нас интересует прежде всего вода.

Н. В. Перцов и другие специалисты рассматривают механизмы разрушения горных пород при участии воды и водных растворов. Ссылаясь на проведенные эксперименты, они указывают, что вода может влиять на разрушение ионных соединений так же, как и расплавы, — путем снижения поверхностной энергии, т. е. благодаря эффекту Ребиндера. Для соединений кремния — силикатов, к которым, в частности, относятся многие горные породы, считают возможным и участие воды в химических реакциях, приводящих к разрыву связей в силикатной молекуле и к росту трещин.

Касаясь роли адсорбционного понижения прочности пород при воздействии подземных вод в очагах землетрясений, нужно отметить, что адсорбционный эффект способен проявляться в наибольшей степени при развитии деформаций, предшествующих главному разрыву в очаге.

Если исходить из существующих моделей подготовки очага землетрясения, можно сделать вывод, что при наличии воды адсорбционный эффект способствует хрупкому разрушению горных пород, ускоряет развитие трещин, формирование которых не связано с участием воды (согласно ЛНТ-модели) или происходит при механическом воздействии воды (в соответствии с ДД-моделью). Однако условия проявления адсорбционного эффекта, а также других видов физико-химического и химического воздействий на процессы подготовки очага остаются почти совсем неизученными.

Относительная роль адсорбционного эффекта среди других процессов, влияющих на деформации при подготовке землетрясений, очевидно, неодинакова для различных очагов и изменяется на разных стадиях подготовки землетрясения. Роль эта зависит от количества воды, характера и скорости деформаций, температуры и других факторов.

Для проявления адсорбционного эффекта требуется, чтобы в вершину растущей трещины проникал очень тонкий слой жидкости. При этом жидкость может лишь

растекаться по стенкам трещины, не заполняя весь ее объем. В условиях малой водонасыщенности, когда воды недостаточно, чтобы заполнить развивающиеся трещины и создать в них высокое давление, адсорбционный эффект будет проявляться при отсутствии механического воздействия воды, зависящего от ее давления. Поэтому при низкой водонасыщенности роль этого эффекта возрастает.

Существенного воздействия адсорбционного эффекта на подготовку очага можно ожидать в зонах, подверженных растяжению. Это воздействие происходит на стадиях медленного развития трещин. На лавинной стадии, если трещины растут быстрее, чем продвигается жидкость, действие эффекта прекратится.

Как уже отмечалось, существует температурный рубеж, за пределами которого эффект Ребиндера исчезает. Поэтому нижняя граница глубины адсорбционного воздействия воды на процессы подготовки очага, по-видимому, определяется не только минимальным содержанием воды, но и термодинамическими условиями в зоне очага.

На больших глубинах адсорбционный эффект может быть связан не с водными растворами, а с магматическими расплавами, которые либо имелись в зоне очага, либо образовались при выделении большого количества тепла во время сейсмических подвижек. Еще акад. В. И. Вернадский указывал, что в процессе тектонических движений выделяется значительное количество тепла, что может вызвать нагревание и даже плавление горных пород. Чл.-кор. АН СССР П. Н. Кропоткин и др. считают, что преобладающая часть энергии, высвобождающейся при землетрясениях, превращается в механическую работу и в конечном счете — в теплоту трения в зоне очага.

Можно полагать, что в определенных условиях воздействие эффекта Ребиндера в очаговых зонах стимулируется начавшимися сейсмическими толчками. Толчки эти приводят к образованию и раскрытию трещин и активизируют движение воды в области очага. Упругие волны, распространяющиеся от очага, вызывают попеременное расширение и сужение трещин, что способствует движению воды к вершинам трещин и проявлению адсорбционного эффекта.

Сильные землетрясения сопровождаются более или менее длительной серией афтершоков — многочисленными толчками, преимущественно слабыми. Быть может, особенности сейсмического режима после неглубоких

сильных землетрясений — распределение во времени и пространстве последующих разрывов и вызванных ими афтершоков — нужно в какой-то степени связывать с усилившимся после главного толчка воздействием воды на прочность горных пород?

Проявление эффекта Ребиндера в очаговых зонах зависит и от химического состава подземных вод. Как уже отмечалось, отдельные опыты показали, что растворы, близкие по составу к подземным водам, в большей степени снижают твердость пород, чем дистиллированная вода. Ю. В. Горюнов, Н. В. Перцов и Б. Д. Сумм указывают, что наибольший эффект достигается при воздействии на породу растворов слабой концентрации, содержащих те же ионы, что и слагающие породу минералы. Это значит, что глубинные подземные воды, в составе которых имеются хлориды натрия, кальция и магния, будут в большей степени снижать прочность пород, содержащих те же элементы, например известняков, базальтов, гранитов и др. Однако высокая концентрация солей в глубинных водах, возможно, снизит их адсорбционный эффект.

Помимо адсорбционного понижения прочности горных пород, на развитие напряжений и деформаций при подготовке землетрясений могут повлиять гидратация и дегидратация, кристаллизация и другие упоминавшиеся выше физико-химические процессы, протекающие с участием воды. Гидратация и дегидратация минералов — поглощение или выделение воды — сопровождаются изменением их объема. При этом изменяется также прочность пород и величина напряжения. Например, прочность гипса при дегидратации в условиях высокого давления снижается в 10 раз. Опыты, проведенные в Институте физики Земли, показали, что дегидратация приводит к перераспределению напряжений и может даже протекать бурно, вызывая ударные явления.

В Центральной Японии, близ города Мацусиро, в 1965—1967 гг. наблюдалась повышенная сейсмичность — здесь происходили довольно сильные толчки и было зарегистрировано большое количество слабых землетрясений. В этот же период геодезические съемки зафиксировали значительное поднятие земной поверхности, превышающее 70 см. Было высказано предположение, что землетрясения в районе Мацусиро обусловлены увеличением объема пород в результате реакции гидратации

на глубине 3—10 км, при температурах 400—500° С и наличии достаточного количества воды (в этом районе известны многочисленные горячие источники).

Связь сейсмичности с режимом подземных вод

Конец мая 1977 г. на юге Киргизии, в Ошской области, был необычайно дождливым. В течение нескольких дней в горах Алайского и Ферганского хребтов не прекращались сильные ливни. Такого количества осадков за короткий период времени здесь не выпадало в последние 50 лет. По долинам ручейков и небольших речек с гор хлынули огромные массы воды. Смывая грунт, они образовали сели, сметающие все на своем пути. Наводнения и сели нанесли ущерб ряду районов Ошской области. Особенно пострадал городок Кизыл-Кия. 3 июня 1977 г. в 7 час. утра западнее Кизыл-Кия, в районе Баткен—Хайдаркен, произошло сильное землетрясение. Интенсивность его в эпицентре достигала 7 баллов.

Землетрясения после сильных дождей или наводнений случались и ранее. Такая последовательность была установлена в разных сейсмоактивных областях. По данным индийских ученых, количество слабых сейсмических толчков увеличивалось во время половодий на некоторых реках. Согласно наблюдениям в Северо-Восточной Индии сильные предмуссонные дожди предшествовали землетрясениям с магнитудой 7 и более.

Американский сейсмолог Мак-Гиннис обнаружил четкую зависимость между суммарным количеством сейсмической энергии, выделяемой при землетрясениях в долине среднего течения реки Миссисипи, и уровнем реки: повышение сейсмичности приурочено к паводкам. В Южной Калифорнии за последние 90 лет произошло 12 сильных землетрясений (с магнитудой 6 и более), из них 9 после необычайно обильных осадков, которым предшествовал четырех-, пятилетний период засухи. Землетрясения следовали после максимума осадков с запозданием от двух месяцев до двух лет. В трех случаях перед сильными землетрясениями были аналогичные, но слабее выраженные аномалии осадков. Корреляция сейсмической активности с атмосферными осадками наблюдалась также в Японии, на острове Хонсю, и в других странах.

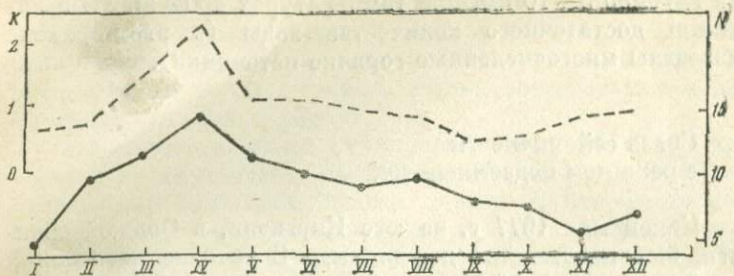


Рис. 15. Сопоставление сейсмичности и режима подземных вод Украинских Карпат (по М. В. Комаровой и Е. С. Штенгелову)

Штриховая линия — осредненный график годового хода уровней и расходов подземных вод (отношения среднемесячных значений к среднегодовым — K); сплошная линия — график помесячного распределения землетрясений с энергетическим классом 8 и выше за 1962—1974 гг.; N — количество землетрясений

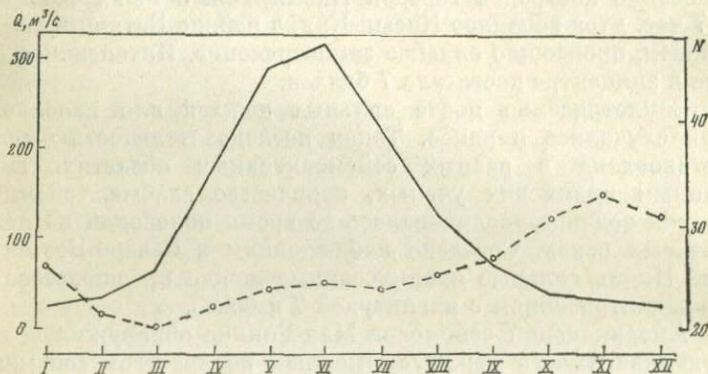


Рис. 16. Сопоставление сейсмичности Таджикской депрессии с расходом реки Кафирниган (по Е. С. Штенгелову)

Сплошная линия — среднемноголетний график годового хода расходов реки Кафирниган в кишлаке Чинар; штриховая линия — помесячное распределение землетрясений с энергетическим классом 9 и выше за 1964—1974 гг.

Интересные исследования зависимостей сейсмичности от режима атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод были выполнены гидрогеологом Е. С. Штенгеловым. По его данным, существуют два вида связи между водным и сейсмическим режимами: в одних районах сейсмичность усиливается в периоды с высокими

уровнями поверхностных и подземных вод (прямая связь), в других — в периоды низких уровней вод (обратная связь) [Комарова, Штенгелов, 1980]. Прямая связь между водным и сейсмическим режимами установлена для Украинских Карпат, Сахалина, некоторых районов Средней Азии. Так, на Карпатах графики изменения уровней и расходов подземных вод в течение года и месячного распределения сейсмических толчков сходны (рис. 15). Максимальное количество толчков приходится на весенний период, когда уровень подземных вод наиболее высокий. В многолетнем плане связь эта не столь четкая: максимумы сейсмичности либо совпадают с годами повышенной водности, либо следуют за ними с запозданием на год.

На Сахалине один максимум сейсмических толчков приходится на весну, а другой, менее четкий — на осень, что совпадает с ходом уровней поверхностных и подземных вод. В период с 1950 по 1974 г. максимумы годовых количеств сильных землетрясений следуют с запозданием на год за максимумами уровней и расходов подземных вод.

Примером обратной связи между водным и сейсмическим режимами, по Е. С. Штенгелову, служит соотношение между расходом реки Кафирниган и месячным распределением землетрясений в Таджикской депрессии (рис. 16). Максимум толчков здесь приходится на осень и начало зимы, когда уровень реки наиболее низкий. Аналогичная картина наблюдается в Крыму. Обратная связь между водным режимом и сейсмичностью обнаружена Е. С. Штенгеловым и в других районах.

Гидрогеолог А. О. Гриневский совместно с автором книги сопоставил количество месячных атмосферных осадков (в процентах от нормы) с землетрясениями с магнитудой 4 и выше для некоторых районов Средней Азии и Кавказа. За период с 1926 по 1970 г. на территории Ферганской долины 13 землетрясений было приурочено к максимумам и 9 — к минимумам атмосферных осадков. Не были получены четкие зависимости землетрясений от атмосферных осадков и для Джавахетского нагорья (Кавказ), где такое сопоставление проводилось с 1960 по 1970 г.

Приведенные примеры показывают, что связь сейсмичности с водным режимом проявляется по-разному: в одних случаях она выражена достаточно четко, в дру-

гих — менее четко или даже отсутствует, в третьих — как будто наблюдаются обратные зависимости. В чем же причина? Быть может, такой связи не существует? Попробуем разобраться в этом непростом вопросе.

Изменение водного режима воздействует на сейсмичность двояко. Повышение уровня поверхностных и подземных вод приводит к увеличению веса водной толщи и гравитационной нагрузки на земную кору. Это же повышение уровня может повлечь за собой возрастание давления порово-трещинных вод. При изучении механизма возбужденных землетрясений, связанных с деятельностью человека, было установлено, что изменение гравитационной нагрузки не оказывает определяющего влияния на сейсмичность. Более существенна роль давления порово-трещинных вод. Как же оно изменяется?

Гидрогеологи добились больших успехов в изучении режима подземных вод — изменения во времени их уровней, напоров, дебита, температуры. Основные закономерности режима грунтовых вод, залегающих на небольшой глубине, во многих районах страны хорошо изучены. Уровни грунтовых вод в течение года обычно изменяются в пределах 1—2 м, однако в трещиноватых породах или в породах, содержащих карстовые пустоты, амплитуда изменения уровней иногда достигает десятков метров. Заметим, что в горных областях, к которым относится большая часть сейсмичных территорий, преобладают трещиноватые породы. Следовательно, изменения уровня грунтовых вод здесь значительны.

Амплитуда изменений уровня подземных вод уменьшается по мере увеличения глубины их залегания. Кроме того, эти изменения для глубоких напорных вод могут происходить с большим запозданием — через месяцы или даже годы после соответствующих изменений уровня поверхностных вод. Уровни глубоких вод, как правило, изменяются в небольших пределах, и эти изменения не всегда увязываются с режимом атмосферных осадков или поверхностных вод. Но в тех случаях, когда воды циркулируют в системах трещин, проникающих на большую глубину и имеющих хорошую гидравлическую связь с верхними горизонтами, колебания уровня грунтовых или поверхностных вод способны привести к существенному и достаточно быстрому изменению давления порово-трещинных вод, залегающих на довольно большой глубине.

Таким образом, становятся понятными различные зависимости между сейсмическим и гидрологическим режимами. Зависимости эти определяются характером гидравлической связи поверхностных и грунтовых вод с порово-трещинными водами, циркулирующими в очаговых зонах. Конечно, было бы гораздо проще сопоставлять изменения сейсмичности с режимом глубинных порово-трещинных вод. Однако материалы наблюдений глубинных вод, за редким исключением, отсутствуют.

Трудно объяснить причины обратной связи между водным и сейсмическим режимом — увеличение числа землетрясений в периоды с минимальными значениями показателей водного режима. Поскольку давление глубоководных подземных вод изменяется с определенным запозданием после соответствующих изменений уровней поверхностных и грунтовых вод, такая обратная связь, очевидно, кажущаяся. Например, график зависимости сейсмичности Таджикской депрессии от расхода Кафирнигана (см. рис. 16) можно истолковать и как прямую связь между количеством толчков и уровнем реки: сейсмическая активность усиливается через пять месяцев после максимума расхода.

Итак, можно считать, что вариации водного режима (поскольку от них зависит давление подземных вод) оказывают определенное влияние на сейсмичность. Это влияние, по принципу спускового механизма землетрясений, особенно четко проявляется при так называемых возбужденных землетрясениях. Но в землетрясениях естественных роль спускового механизма могут играть и другие факторы, в частности земные приливы и солнечная активность.

Хорошо известно, что силы притяжения Луны и Солнца вызывают не только приливные колебания уровня моря, но и деформации твердого тела Земли, а также изменения атмосферного давления. Луна влияет на приливообразующие силы в 2,16 раза больше, чем Солнце. Вследствие приливов в твердом теле Земли, или земных приливов, происходят периодические деформации горных пород — их расширение и сжатие.

Геофизик В. В. Ламакин установил, что долгопериодный лунный приливный цикл продолжительностью 18,6 года четко проявляется в периодичности сильных байкальских землетрясений. Чл.-кор. АН СССР С. А. Федотов совместно с В. А. Широковым выявил подобную

периодичность сильных землетрясений в сейсмическом поясе северо-западной части Тихого океана, в частности на Камчатке и Курильских островах.

По данным геофизика А. Д. Сытинского, общая сейсмичность Земли зависит от 11-летнего цикла солнечной активности. Наибольшее количество сильных землетрясений приходится на периоды максимума и минимума солнечного цикла, что А. Д. Сытинский связывает с характером циркуляции атмосферы и перестройкой поля атмосферного давления. Например, в Курило-Камчатской зоне многие сильные землетрясения происходят после резкого падения атмосферного давления.

Воздействия приливных деформаций, перепадов атмосферного давления и других явлений, обусловленных влиянием Солнца и Луны, служат, таким образом, спусковым механизмом землетрясений. Можно предполагать, что воздействие на сейсмичность указанных 18,6-летнего и 11-летнего циклов в какой-то степени связано также с соответствующими изменениями режима подземных вод. Известно, что циклические колебания уровней подземных вод зависят от земных приливов и солнечной активности. Большой интерес представляют изменения давления глубоких подземных вод, обусловленные 18,6-летним лунным циклом, и влияние этих изменений на сейсмичность. К сожалению, данных наблюдений гидрогеологического эффекта этого цикла пока очень мало.

Сейчас еще нельзя дать ответ на вопрос, какой из рассмотренных факторов (вариации давления подземных вод, солнечной активности или земные приливы) имеет наибольшее значение как спусковой механизм землетрясений. По всей вероятности, подобный механизм представляет собой результат совокупного воздействия нескольких факторов, причем относительная роль каждого из них может быть неодинаковой для разных сейсмоактивных районов.

Влияние подземных вод на интенсивность и последствия землетрясений

Опыт изучения последствий землетрясений показал, что разрушительный эффект сильных землетрясений зависит от характера грунтов и гидрогеологических условий приповерхностных горизонтов — глубины залегания грун-

товых вод, влажности пород. Различия в интенсивности сейсмических воздействий могут достигать 1—2 баллов. Это весьма существенно, если учесть, что, например, при 6-балльном толчке кирпичные дома остаются нетронутыми и лишь в отдельных случаях испытывают слабые повреждения, а при 8-балльном землетрясении в таких домах образуются крупные трещины и возможно частичное разрушение.

В настоящее время накоплены многочисленные данные о влиянии уровня грунтовых вод на интенсивность землетрясений. Приведем некоторые примеры, заимствованные из работ сейсмологов С. В. Медведева, И. А. Ершова и Е. В. Поповой.

Интенсивность землетрясения 1948 г. в Ашхабаде на участках с глубиной уровня грунтовых вод от 4 до 10 м была на 0,5 балла выше, чем на участках с залеганием грунтовых вод глубже 10 м. При Ленинабадском землетрясении в марте 1972 г. интенсивность сотрясений возрасла на 1 балл в местах с близким (до 5 м) залеганием грунтовых вод. Во время 8—9-балльного землетрясения на Курильских островах в ноябре 1958 г. в поймах рек, где глубина грунтовых вод 0,5 м, отмечалось приращение на 1 балл по сравнению с участками, где уровень грунтовых вод 3—5 м. При слабых землетрясениях в районе Эрдэнэт (Монгольская Народная Республика) было зафиксировано повышение интенсивности сотрясений на 1,9 балла в местах с залеганием грунтовых вод до 2,5 м. Влияние увлажнения в наибольшей степени проявляется для песчаных, песчано-глинистых и лёссовых грунтов.

Разрушительный эффект землетрясений зависит от деформаций грунтов при прохождении сейсмических волн. Интенсивность таких деформаций различна в сухих и водонасыщенных грунтах. В песчано-глинистых грунтах при увлажнении нарушаются структурные связи.

Влажные пески под действием вибрации могут разжижаться. Многим, вероятно, приходилось наблюдать это на пляже: комок влажного песка сохраняет свою форму, но, если его похлопать пальцем, он расплывается. Известны случаи, когда при сильных землетрясениях разжижение песчаных грунтов, на которых построены здания, приводило к большой осадке и наклону зданий. Уже упоминалось о последствиях, связанных с разжижением грунтов во время землетрясений в Чили и на Аляс-

ке. Разжижению могут подвергаться и лёссовые грунты. Особую опасность представляет разжижение грунтов на склонах, подверженных оползням.

Оползни — одно из грозных последствий сильных землетрясений. Оползни широко распространены и в несейсмичных областях (например, в Поволжье). При образовании оползней большую роль играют подземные воды: повышение уровня подземных вод обычно активизирует оползневые процессы. Разжижение грунтов, вызванное сейсмическими толчками, даже если оно относится к тонким слоям песков или супесей, нарушает устойчивость земляных масс на склонах и приводит к широкому развитию оползней. Один из крупнейших оползней, связанных с сейсмическим разжижением грунтов, вызвал катастрофу на водохранилище Вайонт в Италии, которая будет описана в следующем разделе.

Поскольку интенсивность землетрясений зависит от уровня грунтовых вод, гидрогеологические условия обязательно учитываются при сейсмическом микрорайонировании городов, которое проводится для выделения участков с различной степенью сейсмической опасности. Но уровень грунтовых вод не остается постоянным. Он может существенно изменяться под влиянием деятельности человека. В ряде городов, в промышленных и сельскохозяйственных районах юга нашей страны наблюдается повышение уровня грунтовых вод, связанное со строительством, орошением и другими причинами. В таких условиях необходимы мероприятия, предотвращающие подъем уровня грунтовых вод или способствующие его снижению.

Эксперименты, проведенные молдавскими специалистами на опытном полигоне в долине Днестра, показали, что при снижении уровня грунтовых вод в песчано-глинистых грунтах от 1 до 3 м интенсивность сейсмических колебаний на поверхности грунта уменьшается на 1 балл. Таким образом, на участках, где уровень грунтовых вод неглубокий или повышается в результате деятельности человека, искусственное понижение грунтовых вод, их дренирование в определенных условиях служат эффективным средством уменьшения сейсмической опасности.

ВОЗБУЖДЕННЫЕ, ИЛИ ТЕХНОГЕННЫЕ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Землетрясения и водохранилища

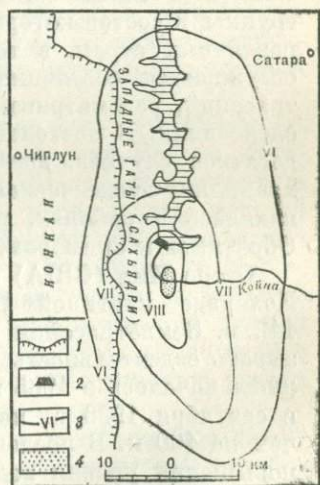
В ночь с 10 на 11 декабря 1967 г. в Индии произошло разрушительное землетрясение. Его эпицентр находился близ плотины гидроэлектростанции Койна, в западной части Деканского плато. Погибло 180 человек и около 2000 было ранено. Толчок ощущался в радиусе до 700 км. В Бомбее, на расстоянии 200 км от эпицентра, землетрясение вызвало панику. Этот толчок, магнитуда которого составляла 6,3—6,4, ощущался в эпицентре с силой более 8 баллов. В 8-балльной зоне, вытянутой в меридиональном направлении (рис. 17), были разрушены многие дома, повреждены мосты и дороги. Многочисленные трещины образовались в плотине.

Землетрясение Койна вызвало большую сенсацию в научных кругах, так как произошло в районе, который индийские сейсмологи считали несейсмичным. Правда, пересмотр исторических материалов и углубленный анализ тектоники, выполненные чл.-кор. АН СССР И. Е. Губиным и Б. А. Петрушевским, а также индийскими специалистами, показали, что на Деканском плато за последние два-три столетия случались землетрясения и территория эта относится к достаточно подвижной зоне.

Водоохранилище Шиваджисагар на реке Койна вмещает 2780 млн м³ воды, плотина имеет высоту 103 м. Заполнение водохранилища началось в 1961 г., а с 1962 г., когда объем воды был менее половины проектного, вблизи плотины регистрировались слабые толчки. По данным индийских сейсмологов, количество и сила толчков увеличились в середине 1963 г. С

Рис. 17. Схема изосейст землетрясения Койна (по И. Е. Губину)

1 — граница Западных Гат; 2 — плотина Койна; 3 — изосейста с указанием балла; 4 — район сотрясения 8—9 баллов



сентября 1964 г. по 12 сентября 1967 г. в районе водохранилища отмечено 154 толчка с магнитудой 2—3 и силой 3—4 балла. Их очаги располагались на глубине 3—5 км. Наиболее сильный толчок с магнитудой 5,5 зафиксирован 13 сентября 1967 г. Это землетрясение интенсивностью 6—7 баллов не нанесло большого ущерба.

Х. Гупта, Б. Растроги и другие сейсмологи, детально изучавшие условия, в которых произошло землетрясение Койна, установили, что количество толчков связано с уровнем водохранилища. Максимальное число толчков, а также сильные землетрясения 13 сентября и 10 декабря 1967 г. относятся к периоду, когда высокий уровень воды сохранялся в течение длительного времени. В последующие годы уровень воды был несколько снижен и сейсмическая активность уменьшилась. Она вновь увеличилась в 1973 г., когда уровень воды достиг максимальной отметки. В этот период был отмечен ряд толчков, наиболее сильный из них имел магнитуду 5,1.

Землетрясение Койна было сильнейшим в ряду сейсмических событий, сопутствовавших заполнению крупных водохранилищ. Если ранее связь таких землетрясений с водохранилищами считали простым совпадением, то анализ фактических материалов, накопившихся к концу 60-х годов, заставил многих сейсмологов по-иному взглянуть на эту проблему. В 1970 г. ЮНЕСКО организовало Рабочую группу по сейсмическим явлениям, связанным с большими водохранилищами. На заседаниях группы, в состав которой входят крупные специалисты из различных стран, в том числе и из Советского Союза, обсуждается состояние проблемы возбужденных землетрясений, рассматриваются направления дальнейших исследований. В настоящее время известно уже более трех десятков случаев, когда при заполнении крупных водохранилищ сейсмическая активность усиливалась или проявлялась в районах, ранее считавшихся асейсмичными. Обратимся к примерам.

Озеро Мид (США) образовалось при перекрытии реки Колорадо плотиной Булдер (Гувер), высота которой 142 м. Землетрясения в этом районе впервые стали связывать с деятельностью человека. Заполнение водохранилища началось в 1935 г. Сейсмические толчки ощущались с сентября 1936 г., когда уровень воды поднялся более чем на 100 м. В последующие годы по мере дальнейшего повышения уровня воды сейсмическая активность нара-

стала. Американский сейсмолог Д. Кардер обратил внимание, что частота толчков увеличивалась в периоды сезонных повышений уровня воды. За 10 лет на площади 8 тыс. км² было зафиксировано около 6000 толчков; наибольшее количество их отмечалось в радиусе до 25 км от водохранилища. Очаги этих толчков располагались на глубине первых километров.

Наиболее сильное землетрясение с магнитудой 5 произошло 5 мая 1939 г. К этому времени заполнение водохранилища закончилось, объем его достиг 35 млрд. м³. В районе водохранилища действовала система чувствительных сейсмостанций, которые продолжали регистрировать слабые толчки. По последним данным, они не прекращались и в начале 1970-х годов.

Кариба — одно из крупнейших в мире искусственных водохранилищ, емкостью около 170 млрд. м³. Высота плотины 125 м. Это водохранилище на реке Замбези расположено на границе между Замбией и Зимбабве. Заполнение его началось в декабре 1958 г., а с мая 1959 г. в этом районе периодически регистрировались сейсмические толчки. Частота и энергия толчков увеличились с марта 1962 г., когда уровень воды в водохранилище поднялся до 110 м. Заполнение водохранилища было завершено в августе 1963 г. С 14 августа по 8 ноября 1963 г. последовала серия сильных толчков, среди них два, 23 и 25 сентября, с магнитудой 6—6,1. Преобладающая часть эпицентров находилась на территории водохранилища. Вслед за основными толчками была отмечена серия афтершоков. В последующий период сейсмическая активность снизилась, но количество толчков вновь увеличилось осенью 1971 г.

Вайонт (Италия) — водохранилище емкостью 169 млн. м³. Оно образовалось в глубоком ущелье реки Вайонт, перекрытом арочной плотиной высотой 261 м. При заполнении водохранилища в 1960—1963 гг. наблюдалась местная сейсмическая активность, сопровождавшаяся развитием оползней. По данным итальянского сейсмолога П. Калони, сейсмическая активность усиливалась вслед за повышением уровня водохранилища, а при снижении уровня толчки прекращались. Особенно резко участились толчки в сентябре 1963 г., после быстрого повышения уровня водохранилища в весенние и летние месяцы.

Сейсмические толчки вызвали так называемое тиксогропное разжижение грунта, вследствие чего 9 октября

1963 г. произошел грандиозный оползень. Массив породы объемом около 300 млн. м³ оторвался от крутого склона на левом борту долины, быстро продвинулся почти на 500 м и перекрыл ущелье. Вода из водохранилища была вытеснена, при этом волна высотой до 70 м обрушилась в нижний бьеф и почти полностью уничтожила несколько селений. Погибло около 1900 человек. В последующие годы отмечалось возрастание местной сейсмической активности в периоды высокого подъема уровня воды в водохранилище.

Кремаста (Греция) — водохранилище в долине реки Ахелос емкостью 4750 млн. м³. Высота плотины ГЭС 147 м. Заполнение водохранилища началось 21 июля 1965 г. С августа в близлежащих селениях ощущались слабые сейсмические толчки, частота их увеличилась в

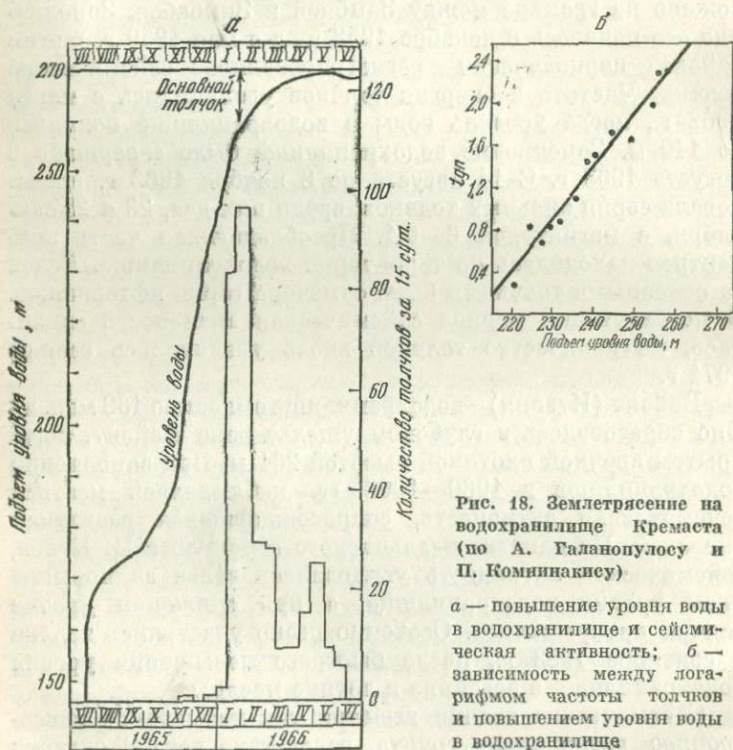


Рис. 18. Землетрясение на водохранилище Кремаста (по А. Галанопулосу и П. Комнинакису)

а — повышение уровня воды в водохранилище и сейсмическая активность; б — зависимость между логарифмом частоты толчков и повышением уровня воды в водохранилище

декабре 1965 г. и особенно в январе 1966 г. Очаги располагались на небольшой глубине.

5 февраля 1966 г. произошло землетрясение с магнитудой 6,3. Эпицентр его находился близ северного берега водохранилища, глубина очага около 20 км. Землетрясения подобной силы на участке водохранилища ранее не отмечались. Землетрясение вызвало довольно большие разрушения, оползни и обвалы, были ранены. Нарастание сейсмической активности в январе 1966 г. произошло вслед за быстрым повышением уровня водохранилища. К моменту основного толчка уровень воды был близок к максимальному (рис. 18, а). Установлена тесная зависимость между логарифмом частоты предварительных толчков и уровнем воды (рис. 18, б). После главного толчка до конца 1966 г. сейсмостанции в районе водохранилища зарегистрировали около 2600 афтершоков. В последующий период сейсмическая активность увеличивалась, когда уровень водохранилища был наиболее высоким.

Синьфынь (Китай) — водохранилище емкостью 11,5 млрд. м³. Плотина высотой 105 м расположена в 160 км к северо-востоку от города Гуанчжоу. Землетрясения в районе водохранилища регистрировались с октября 1959 г., вскоре после начала заполнения водохранилища. 19 марта 1962 г. вблизи водохранилища произошло 8-балльное землетрясение с магнитудой 6,4. Ему предшествовало свыше 80 тыс. толчков. Еще большее количество толчков было зарегистрировано сейсмической сетью после главного землетрясения. Очаги большей частью приурочены к глубокой части водохранилища, вблизи плотины.

По данным наблюдений, сейсмичность усиливалась по мере повышения уровня водохранилища, особенно после наиболее быстрого роста уровня.

Монтинар — водохранилище емкостью 275 млн. м³ расположено во Французских Альпах. Оно образовано плотиной высотой 130 м. Вскоре после того, как водохранилище было заполнено, отмечались слабые толчки, а 25 апреля 1962 г. произошло мелкофокусное землетрясение с магнитудой около 5, вызвавшее разрушения. Другой сильный толчок был 24 августа 1966 г. Как отмечает французский сейсмолог Ж. Роте, количество толчков тесно связано с уровнем водохранилища, а оба сильных землетрясения произошли, когда уровень был максимальным.

По данным зарубежных сейсмологов, повышение сейсмической активности было отмечено при заполнении водохранилищ гидроэлектростанций Марафон в Греции, Талбинго в Австралии, Куробе в Японии, Бенмор в Новой Зеландии, Канелль в Испании и др.

В Советском Союзе в сейсмичных районах Кавказа и Средней Азии сооружены или находятся в стадии строительства крупные гидроэлектростанции с высоконапорными плотинами. Плотины эти запроектированы с соответствующим запасом прочности, гарантирующим их от разрушения в случае естественных землетрясений и землетрясений, могущих возникнуть при заполнении водохранилищ. В процессе заполнения некоторых водохранилищ наблюдалось повышение сейсмической активности.

Нурекское водохранилище на реке Вахш в Таджикистане, вмещающее 10,5 млрд. м³ воды, протянулось на 70 км в узком Пулисангинском ущелье. Плотины его высотой 300 м относятся к числу наиболее высоких в мире. Детальные сейсмические исследования Вахшского района для обоснования строительства гидротехнических сооружений, а также в процессе заполнения водохранилища начали проводиться Таджикским институтом сейсмостойкого строительства и сейсмологии с 1955 г. Было установлено, что в зоне проектируемого водохранилища регистрировалось 50—100 толчков в год с энергетическим классом 7 и выше. В 1956 г. здесь произошло сильное землетрясение с магнитудой 5,3.

Как отмечают таджикские сейсмологи К. М. Мирзоев и С. Х. Негматуллаев [1979], в первоначальный период заполнения Нурекского водохранилища, после того как уровень его в 1967 г. поднялся на 40 м, стала заметна тенденция к увеличению количества толчков. Когда в конце 1972 г. уровень воды достиг 100-метровой отметки, сейсмическая деятельность в зоне водохранилища резко усилилась. Если за 1960—1971 гг. среднее количество землетрясений за три месяца составляло 26, то в последнем квартале 1972 г. было зарегистрировано 133 толчка. При этом наблюдалось уменьшение средней глубины очагов. Для 95% толчков эта глубина не превышала 5 км. Была отмечена хорошая корреляция квартальных сумм землетрясений энергетического класса 7 и выше с изменением уровня водохранилища.

К. М. Мирзоев и С. Х. Негматуллаев выполнили тщательный анализ особенностей сейсмического режима в

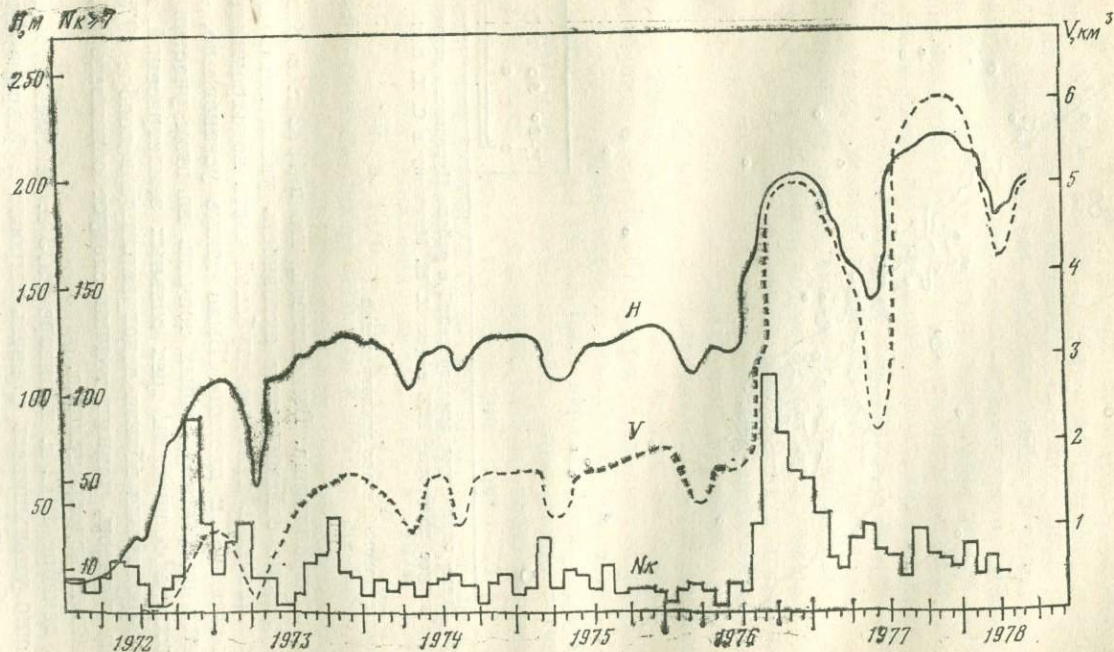


Рис. 19. Изменение месячных количеств толчков N_k с энергетическим классом 7 и выше в зоне Нурекского водохранилища в зависимости от уровня H и объема воды V (по К. М. Мирзоеву и С. Х. Негматуллаеву)

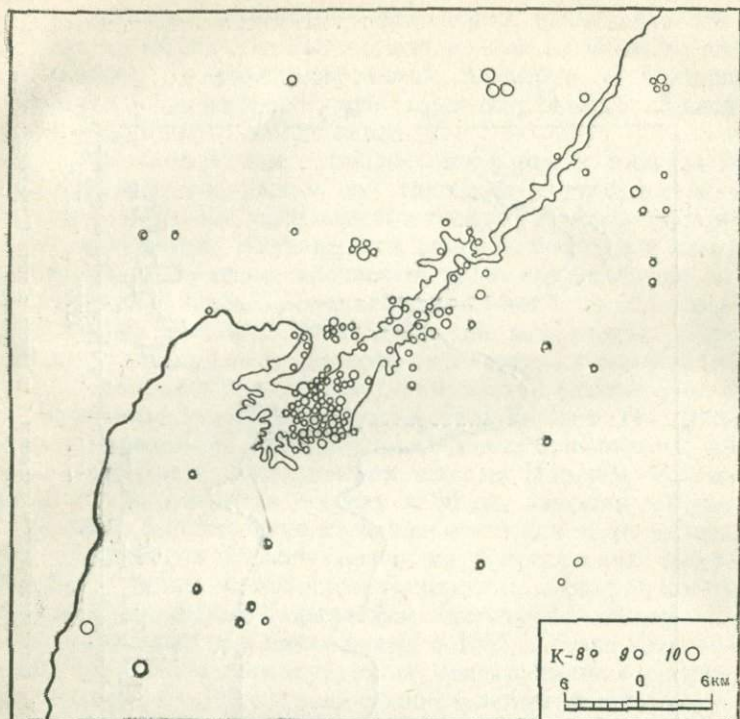


Рис. 20. Схема эпицентров землетрясений в районе Нурекского водохранилища за второе полугодие 1976 г. (по К. М. Мирзоеву и С. Х. Негматуллаеву)

К — энергетический класс землетрясений

зоне водохранилища. Выяснилось, что в 1972 г. в Вахшском районе сейсмическая активность увеличилась преимущественно в наиболее глубокой части водохранилища, примыкающей к плотине. Было также установлено, что большое количество слабых толчков на этом участке не является афтершоками трех сильных землетрясений, которые произошли вблизи водохранилища в ноябре 1972 г. Таким образом, данные толчки следует связывать с заполнением водохранилища.

В декабре 1972 г. и январе 1973 г. сейсмичность постепенно уменьшилась и вновь выросла в феврале-марте после быстрого снижения уровня водохранилища (рис. 19). Интересно, что возрастание количества толч-

ков наступало только при резком снижении уровня, что наблюдалось также в августе 1974 г. и марте 1975 г., а в периоды, когда уровень постепенно снижался на 20 м, в феврале—апреле 1974 г. и январе—марте 1976 г., сейсмичность не повышалась. В целом период 1974—1975 гг., когда уровень водохранилища изменялся мало, характеризовался снижением сейсмичности. Новое увеличение количества толчков произошло летом 1976 г. после быстрого повышения уровня воды на 80 м. Толчки эти были отмечены под чашей водохранилища (рис. 20). В 1977 г. и начале 1978 г. сейсмичность в зоне Нурекского водохранилища оставалась невысокой.

Чиркейское водохранилище на реке Сулак в Дагестанской АССР имеет объем 2,8 млрд. м³, высота плотины 231 м. В этом районе до заполнения водохранилища количество слабых толчков в среднем составляло 7 в месяц. Заполнение водохранилища началось в августе 1974 г. По данным Р. А. Левковича, Ш. Г. Идармачева и других дагестанских сейсмологов, уже на первом этапе заполнения, в конце 1974 г., когда уровень воды поднялся на 125 м, проявления сейсмичности резко усилились, и в течение января 1975 г. было зарегистрировано 97 толчков. Затем число землетрясений существенно уменьшилось и вновь возросло с июня 1975 г., после дальнейшего повышения уровня водохранилища (рис. 21) [Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим, 1977].

Количество толчков энергетического класса 7 и выше в зоне водохранилища составляло: в 1974 г. — 120, в 1975 — 359, в 1976 — 156, в 1977 — 87, в 1978 — 72. Таким образом, после того как в 1976 г. водохранилище было заполнено до проектной отметки, общее количество толчков стало сокращаться.

В районе Чиркейского водохранилища в период его заполнения произошли два сильных землетрясения. Салатауское 23 декабря 1974 г. с магнитудой 5 проявилось с интенсивностью до 7 баллов. Эпицентр его находился в 5—7 км от плотины, глубина очага 5 км. Еще более сильное (до 8 баллов) Буйнакское землетрясение произошло 9 января 1975 г. Магнитуда его 5,2, эпицентр был расположен в 18 км от водохранилища. Вопрос о связи этих землетрясений с заполнением водохранилища не получил однозначного решения, поскольку в этом районе сильные землетрясения бывали и раньше, например Дагестанское 14 мая 1970 г. интенсивностью 8—9 баллов.

Землетрясения и нагнетательные скважины

Ухудшение сейсмической обстановки вызывают не только крупные водохранилища. В начале 1962 г. было завершено оборудование глубокой скважины для сброса сточных вод арсенала Роки Маунтин близ города Денвера (штат Колорадо, США). Раньше удаление этих вод, содержащих ядовитые химические вещества, было сопряжено с большими трудностями.

Скважина глубиной 3671 м вскрыла трещиноватые гнейсы. С 8 марта 1962 г. в нее начали закачивать сточные воды, а с конца апреля сейсмические станции в районе Денвера стали регистрировать слабые подземные толчки. В июне произошло несколько землетрясений, которые ощущались жителями Денвера. Хотя толчки эти не вызвали разрушений, население было встревожено. О землетрясении писали на первых страницах газет. Подземные толчки не прекращались, и к ноябрю 1965 г. число их превысило 700. Высказывались опасения, что Денвер может быть полностью разрушен, и многие жители застраховались от землетрясений. В это время стало известно, что землетрясения связаны с закачкой сточных вод в Денверскую скважину.

Американский геолог Д. Эванс сопоставил уровень сейсмической активности в районе Денвера с расходом воды, подаваемой в скважину. Выяснилось, что после увеличения расхода воды в периоды апрель—июнь 1962 г. и февраль—март 1963 г. частота землетрясений возросла. Во время перерыва в закачке с сентября 1963 г. по сентябрь 1964 г. количество толчков было небольшим. В июне—сентябре 1965 г. закачка производилась под высоким давлением, при этом частота землетрясений резко увеличилась. Было установлено соответствие между количеством толчков и давлением воды в призабойной части скважины (рис. 22). Эпицентры землетрясений располагались в небольшой зоне вокруг скважины. Определенные с большой точностью по специальной сети сейсмостанций эпицентры 62 землетрясений в январе—феврале 1966 г. находились в пределах вытянутого участка длиной 10 км, шириной 3 км (рис. 23). Глубина очагов этих землетрясений 4,5—5,5 км. Всего за период с 1962 по 1967 г. было зарегистрировано свыше 1500 толчков. Несмотря на то что нагнетание в скважину прекратили в феврале 1966 г., землетрясения продолжались, причем в 1967 г.

произошли сильные толчки с магнитудой 5—5,4, которые вызвали небольшие разрушения.

Можно ли считать, что Денверские землетрясения вызваны закачкой воды в скважину? Ведь в этом районе проявления сейсмичности были известны и ранее. В 1882 г. в Денвере произошло 7-балльное землетрясение. Анализ сейсмической обстановки в штате Колорадо за период 1870—1967 гг., выполненный крупными американскими

Рис. 21. Зависимость месячного количества слабых землетрясений (1) (осредненные значения) N от уровня (2) Чиркейского водохранилища H (по Р. А. Левковичу и Ш. Г. Идармачеву)

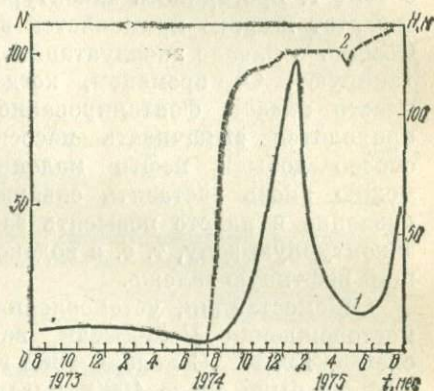
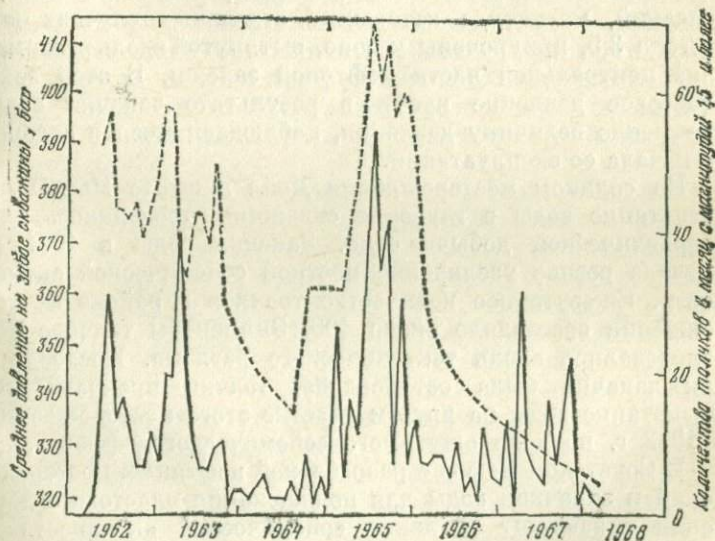


Рис. 22. Количество толчков в районе Денверской скважины (сплошная линия) и среднее месячное давление жидкости на забое скважины (пунктир) (по Хили и др.)



специалистами, позволил сделать вывод, что вероятность локализации естественной серии землетрясений на небольшой площади вокруг скважины в Денвере и совпадения их по времени с периодом нагнетания воды в скважину ничтожно мала и составляет $1/2\ 500\ 000$.

Усиление сейсмичности при закачке воды в глубокие горизонты наблюдалось еще в двух районах США. На нефтяном месторождении Рейнджели в штате Колорадо с 1957 г. проводилось законтурное нагнетание воды. Метод этот широко применяется в нефтепромысловом деле. Обычно в начале эксплуатации нефтяные скважины фонтанируют. Со временем, когда давление в нефтяном пласте падает, фонтанирование прекращается и нефть приходится выкачивать насосными установками. Этот способ добычи нефти малопродуктивный. Однако можно вновь заставить скважину фонтанировать, если давление в пласте повысить за счет нагнетания воды в законтурную зону, т. е. в водоносный горизонт, окружающий нефтяную залежь.

Сейсмостанция, установленная в 65 км от нефтяного месторождения Рейнджели, начала записывать частые слабые толчки. С ноября 1962 г. по январь 1963 г. таких толчков было около 1000. Детальные исследования с помощью сети сейсмостанций показали, что очаги землетрясений, магнитуда которых в отдельных случаях достигала 3,5, приурочены к зоне, вытянутой вдоль разлома, близ центральной части нефтяной залежи. В этой зоне пластовое давление нефти в результате закачки воды превысило величину давления, наблюдавшегося в залежи до начала ее эксплуатации.

На соляном месторождении Дейл в штате Нью-Йорк нагнетание воды в глубокие скважины проводилось для гидравлической добычи соли. Закачка воды в 1971 г. вызвала резкое увеличение местной сейсмической активности. Ежесуточное количество толчков в районе месторождения составляло около 100. Эпицентры толчков локализовались вдоль тектонического разлома. После того как закачка была остановлена, толчки прекратились. Нагнетание воды на другом участке этого месторождения в 1972 г. не дало ощутимого сейсмического эффекта.

В Советском Союзе с разработкой нефтяных месторождений и закачкой воды для поддержания пластового давления связывают усиление сейсмической активности в районе Грозного. 26 мая 1971 г. здесь произошло земле-

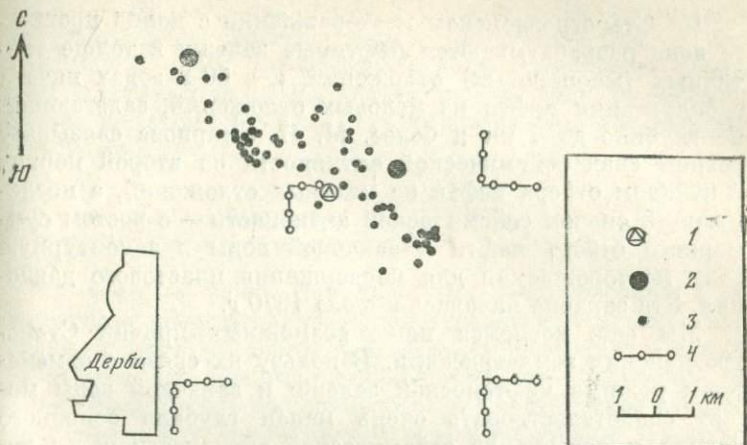


Рис. 23. Эпицентры землетрясений, зарегистрированных в районе Денверской скважины в январе-феврале 1966 г. (по Хили и др.)

1 — нагнетательная скважина; 2, 3 — эпицентры землетрясений: 2 — с магнитудой более 0, 3 — с магнитудой менее 0; 4 — сеть сейсмостанций

трясение силой до 7 баллов и магнитудой 4,1. В эпицентре, на Старогрозненском нефтяном месторождении, были небольшие разрушения зданий и сооружений, повреждены некоторые эксплуатационные скважины. Особенность землетрясения — небольшая глубина очага: всего 2,5 км. До и после этого землетрясения в данном районе было зарегистрировано значительное число более слабых толчков [Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим, 1977].

М. Н. Смирнова, детально изучавшая сейсмичность Грозненского района и ее вероятную связь с добычей нефти, выделила по характеру сейсмической активности четыре периода: первый — стабильный — с 1955 по 1962 г., второй — резкий спад сейсмической активности — с 1963 по 1968 г., третий — скачок сейсмической активности — с 1969 по 1972 г., четвертый — слабый спад сейсмической активности — с 1973 г. Если в течение первого и второго периодов на участке Старогрозненского месторождения регистрировались преимущественно очень слабые толчки с энергетическим классом 6, то в последующие периоды такие толчки почти совсем прекратились, но резко возросло количество более сильных толчков, классов 8 и 9.

На Старогрозненском месторождении с конца прошлого века разрабатываются нефтяные залежи в толще третичных (миоценовых) отложений, а в 60-х годах начата эксплуатация нефти из меловых отложений, залегающих на глубине до 4 км и более. М. Н. Смирнова связывает резкий спад сейсмической активности во второй период с началом отбора нефти из меловых отложений, а последующий скачок сейсмической активности — с ростом суммарного отбора нефти и закачкой воды в законтурную зону месторождения для поддержания пластового давления. Эта закачка началась в июле 1970 г.

Мы еще коснемся ниже возможных причин Старогрозненских землетрясений. В пользу их связи с изменением режима нефтеносной залежи и закачкой воды может свидетельствовать очень малая глубина основного толчка и повышение сейсмической активности через несколько месяцев после начала закачки. Однако в районе Грозного 6—7-балльные землетрясения случались и раньше. Поэтому, чтобы считать такую связь полностью доказанной, потребуются дополнительные исследования.

К основным типам техногенных землетрясений относятся также землетрясения, связанные с мощными подземными взрывами, прежде всего с ядерными взрывами. Мы коснемся лишь кратко этого вопроса, выходящего за рамки рассматриваемой темы.

При изучении сейсмических эффектов мощных подземных взрывов выяснилось, что эти эффекты могут быть обусловлены либо непосредственным воздействием взрыва, либо вторичными явлениями. К последним относятся тектонические землетрясения, возбужденные взрывом, и обвальные землетрясения при обрушении созданных взрывами подземных полостей.

Советский сейсмолог И. П. Пасечник на основе обобщения данных по подземным ядерным взрывам в пустыне Невада (США) установил некоторые особенности порожденных взрывами тектонических землетрясений [Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим, 1977]. Эти землетрясения имеют неглубокие очаги и связаны с разрядкой существующих в земной коре напряжений. Наиболее сильное землетрясение происходит вскоре после взрыва, затем следуют многочисленные толчки меньшей силы, которые в ряде случаев продолжаются в течение нескольких месяцев. Так, взрыв Бенэм мощностью 1,1 млн. т, проведенный в декабре 1968 г. на глу-

бине 1,4 км, имел магнитуду 6,3. Через 3 сек. после взрыва последовало землетрясение с магнитудой 5,5. За первые сутки после взрыва было зарегистрировано свыше 100 толчков, в то время как до взрыва фоновая сейсмичность на этом участке характеризовалась несколькими толчками в сутки.

Основные особенности возбужденных землетрясений

Известные факты возбужденных землетрясений с достаточной убедительностью свидетельствуют о том, что в определенных условиях деятельность человека приводит к изменению сейсмичности. Однако это положение не сразу было признано сейсмологами. Скептическое отношение некоторых специалистов к возбужденным землетрясениям можно объяснить двумя причинами.

Во-первых, сильные землетрясения (а в ряду возбужденных землетрясений такие случались) сопровождаются высвобождением огромного количества энергии. Например, энергия, выделившаяся практически мгновенно в очаге Аляскинского землетрясения 27 марта 1964 г., оценивается величиной 10^{18} Дж. Энергия основного толчка сильнейшего из возбужденных землетрясений Койна также очень внушительна — около $10^{14,5}$ Дж. Ясно, что техногенные воздействия при заполнении водохранилищ или закачке воды в скважины по своим энергетическим затратам не сопоставимы с энергией сильных землетрясений, и это, естественно, побудило сомнения в возможности вызвать такие землетрясения.

Однако техногенные воздействия не являются первопричиной возбужденных землетрясений. Эти воздействия лишь провоцируют разрядку накопившихся тектонических напряжений. Следовательно, возбужденные землетрясения относятся к категории тектонических*. Для объяснения природы таких землетрясений нередко используют понятие «триггер» (по-английски — спусковой крючок). Таким образом, воздействие человека служит спусковым механизмом, способствующим нарушению природных равновесий и высвобождению значительной энергии тектонических напряжений.

* К этой категории нельзя относить лишь толчки, вызванные распространением взрывной волны или обрушением полостей, образованных подземными взрывами.

Другим основанием для сомнений послужило то, что возбужденные землетрясения отмечались в более или менее сейсмоактивных районах. В ряде случаев потребовался серьезный статистический и сейсмологический анализ, чтобы доказать, что землетрясения связаны с заполнением водохранилища или закачкой воды, а не являются естественным сейсмическим событием.

Несмотря на, казалось бы, существенные различия техногенных воздействий (заполнение крупных водохранилищ, нагнетание воды в скважины, мощные подземные взрывы), порождающих возбужденные землетрясения, в характере этих землетрясений имеются общие черты. Основные особенности возбужденных, преимущественно «водохранилищных» землетрясений установлены работами Д. Кардера, Ж. Ротэ, Н. И. Николаева и других исследователей.

Подобные землетрясения обычно отличаются малой глубиной очагов, чаще до 5 км. Это характерно для возбужденной сейсмичности в районах водохранилищ, нагнетательных скважин и подземных взрывов. В ряде случаев по мере развития сейсмических дислокаций глубины очагов возрастают. Например, выполненный советскими сейсмологами И. В. Горбуновой и Н. В. Кондорской анализ землетрясений Койна показал, что испарывание разрывов в области очага распространялось с глубин 0—10 км до 60—70 км.

В районах возбужденной сейсмичности наблюдается большое количество толчков, преимущественно слабых. Эпицентры концентрируются в зонах тектонических трещин. Если происходят сильные землетрясения, им обычно предшествуют многочисленные фэршоки. Довольно длительный период фэршоковой активности является особенностью возбужденных землетрясений, отличающей их от землетрясений естественных. После сильных возбужденных землетрясений следует большое количество афэршоков.

Существуют показатели, определяющие зависимость между количеством и магнитудой толчков, а также между магнитудой главного толчка и сильнейшего афэршока. Выяснилось, что эти показатели для возбужденных и естественных землетрясений различаются. Таким образом, деформационные процессы в условиях возбужденной сейсмичности протекают несколько иначе, чем в условиях естественных землетрясений.

Установлена достаточно четкая зависимость возбужденной сейсмичности от уровня воды в водохранилищах и от скорости изменения уровня, а в районах нагнетательных скважин — от давления нагнетаемой воды. Большинство землетрясений было связано с водохранилищами глубиной более 100 м, причем сейсмичность усиливалась в периоды наиболее высокого уровня воды или быстрого его изменения. Вероятность возбужденных землетрясений возрастает с увеличением площади и объема водохранилища.

Возбужденные землетрясения происходят лишь при сочетании определенных геологических условий. К ним относятся величина тектонических напряжений, наличие разрывных нарушений, расчлененный рельеф и др. Ниже мы коснемся также гидрогеологических условий возбужденной сейсмичности.

Известно много случаев, когда при отсутствии соответствующих условий заполнение водохранилищ не сопровождалось повышением сейсмичности даже в районах, где нередки естественные землетрясения. Примером могут служить водохранилища Бхакра-Нангал в Индии, Пауэлл в США, Сьерре-Понсон во Франции и др.

ВОДА — ОСНОВНОЙ ФАКТОР ВОЗБУЖДЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Гравитационная нагрузка или давление подземных вод?

Итак, возбужденные землетрясения — это разновидность тектонических землетрясений, которые спровоцированы нарушением природных равновесий в земной коре под влиянием деятельности человека. Рассмотренные выше примеры показывают, что основными путями нарушения равновесий могут служить гравитационная нагрузка массы воды в крупных водохранилищах и возрастание давления подземных вод.

Столб воды высотой 100 м давит на грунт с силой 10 кгс/см². Глубина некоторых водохранилищ достигает 300 м. При этом давление воды на дно водохранилища будет равно 30 кгс/см². Для сравнения укажем, что нагрузка на грунт зданий МГУ и других высотных зданий в Москве в среднем составляет 3,5—5 кгс/см². В крупных городах наблюдается оседание поверхности земли

под действием веса зданий и сооружений. В Москве такое оседание, по данным повторного нивелирования, достигает в отдельных местах 1 м [Котлов, 1977].

Нагрузка воды на ложе крупных водохранилищ, в районе которых происходили возбужденные землетрясения, очень велика. Например, для водохранилища Кариба такая нагрузка равна $1,6 \cdot 10^{11}$ т. Естественно, что гравитационное воздействие водной массы прежде всего привлекло внимание исследователей как возможный спусковой механизм землетрясений, связанных с водохранилищами.

Под влиянием водной нагрузки ложе крупных водохранилищ прогибается. Величины такого прогибания достигали 12—20 см. Детальные исследования, выполненные для водохранилища Кариба (Д. и У. Гох), показали, что водная нагрузка вызывает увеличение вертикального напряжения на 6,7 бара ($1 \text{ бар} = 1,0197 \text{ кгс/см}^2$) и касательного напряжения на 2,1 бара. Эти дополнительные напряжения невелики по сравнению с прочностью горных пород, и они могут служить спусковым механизмом возбужденных землетрясений лишь при наличии разломов, испытывающих критическое напряжение. На других водохранилищах воздействие водной нагрузки также не считают основной причиной повышения сейсмичности. Однако в некоторых случаях эта нагрузка влияет на возбужденную сейсмичность. Поскольку напряжения от веса воды существенно уменьшаются с глубиной, такое влияние может проявляться только на небольших глубинах — для узких водохранилищ чаще всего в пределах первых километров. Расчеты, выполненные для Нурекского водохранилища, показали, что напряжения от водной нагрузки уменьшаются на глубине 2 км от ложа водохранилища почти в 10 раз [Мирзоев, Негматуллаев, 1979].

Сейсмический эффект, связанный с нагрузкой водной массы, может быть различным в зависимости от направления и величины действующих главных напряжений, определяющих характер разрыва. Поэтому в одних условиях воздействие водной нагрузки приводит к усилению, в других — к ослаблению сейсмической активности.

Что касается давления подземных вод, то его влияние на сейсмический режим однозначно: повышение давления увеличивает сейсмичность. Напомним, что, согласно теории М. Хубберта и В. Раби, при возрастании давления подземных вод нормальное напряжение соответственно

уменьшается, а касательное остается неизменным, что ослабляет прочность породы на сдвиг.

Повышение давления подземных вод может происходить при закачке воды в водоносные горизонты или в результате заполнения водохранилищ. В последнем случае величина повышения давления зависит от уровня воды в водохранилище и условий передачи напора. При наличии хорошей гидравлической связи глубоких водоносных горизонтов или трещинных зон с поверхностными водами давление подземных вод может подняться на величину, близкую к повышению уровня воды в водохранилище. Влияние возросшего давления подземных вод на напряженное состояние среды будет более значительным и распространится на большую глубину, чем влияние водной нагрузки, что создает условия для соответствующего усиления сейсмичности. Многочисленные исследования, проведенные в районах нагнетательных скважин и водохранилищ, где наблюдались возбужденные землетрясения, показали, что землетрясения эти тесно связаны с возрастанием давления подземных вод.

Для Денверских землетрясений выше уже отмечалась хорошая корреляция количества сейсмических толчков с объемом и давлением воды, нагнетаемой в скважину (см. рис. 22). Согласно расчетам, выполненным группой американских ученых (Хили и др.), при росте давления порово-трещинных вод на 120 бар сопротивление сдвигу снизилось на 69 бар и достигло уровня существующих тектонических напряжений. Начались сейсмические подвижки. Интересно, что в течение длительного времени после прекращения нагнетания воды в районе Денвера землетрясения продолжались, причем среди них были и довольно сильные. Это объясняют распространением фронта повышенного давления воды, который по мере удаления от скважины достиг новых сейсмогенных разломов.

Ранее мы уже касались сейсмичности, вызванной подземными ядерными взрывами. Сотрудники Национального центра США по исследованию землетрясений обнаружили сходство в характере сейсмического режима после нагнетания воды в Денверскую скважину и после ядерного взрыва Бенэм, проведенного в Неваде. Распределение афтершоков после этих, казалось бы, совершенно различных событий имеет общие черты. Их можно объяснить, если учитывать влияние повышенного давления

подземных вод на сейсмический режим. После ядерного взрыва зона повышенного давления воды постепенно удалялась от эпицентра взрыва, соответственно удалялись и очаги землетрясений. И в Денвере и в Неваде было мало афтершоков в приповерхностной зоне. В Денвере это связано с наличием водоупорных пород, которые препятствовали распространению высокого давления воды на верхние горизонты, а на полигоне в Неваде верхние горизонты неводоносны.

Для землетрясений на водохранилище Кармба основным механизмом считают повышение давления подземных вод. В этом районе распространены обводненные разломы, что облегчает быстрое повышение давления в глубоких горизонтах вслед за подъемом уровня водохранилища. При наличии таких крутопадающих разломов давление глубинных вод должно было подняться на величину 0,7—0,9 от напора воды в водохранилище, что изменило напряженное состояние массива и вызвало землетрясения.

Расчеты, выполненные индийскими исследователями для землетрясения Койна, также показывают, что в этом районе напряжения приближались к критическому уровню. Однако сдвиговые разрывы, вызвавшие землетрясение, не могли произойти только в результате водной нагрузки. Здесь главенствующая роль принадлежит возрастанию давления порово-трещинных вод при заполнении водохранилища.

К. М. Мирзоев и С. Х. Негматуллаев провели исследования возбужденной сейсмичности в районе Нурекского водохранилища [1979], которые подтверждают, что возбужденная сейсмичность определяется воздействием давления порово-трещинных вод и гравитационной нагрузки, причем давление вод выступает как основной фактор.

Сильные землетрясения в районе Нурекского водохранилища связаны преимущественно с надвигами, а для надвигов водная нагрузка способствует торможению подвижек. Поэтому при повышении уровня водохранилища эпицентры землетрясений концентрировались в первую очередь на мелководных его частях, где тормозящее действие водной нагрузки невелико.

Во время быстрого снижения уровня водохранилища тормозящее действие водной нагрузки снимается, а высокое давление порово-трещинных вод, которое падает очень медленно, остается, что приводит к увеличению

сейсмичности. Действительно, после снижения уровня водохранилища в феврале-марте 1973 г. на 40 м под водохранилищем было зафиксировано много толчков (см. рис. 19). Сейсмичность увеличивалась и после других быстрых сбросов воды. Поскольку повышение порово-трещинного давления происходит с определенным запазданием после возрастания уровня водохранилища, соответственно запаздывают и сейсмические эффекты.

Гидрогеологические условия возбужденной сейсмичности

Итак, рост давления подземных вод служит основным фактором, стимулирующим возбужденные землетрясения. Каковы же условия роста водного давления в очаговых зонах данных землетрясений?

Прежде всего это, конечно, характер и масштабы воздействий, которые изменяют сложившиеся природные равновесия: высота подъема воды и площадь водохранилища, количество и давление воды, нагнетаемой в глубокие горизонты. Известно, что при небольшом подъеме уровня водохранилища (до 40—50 м) сейсмическая активность заметно не увеличивается, а наибольший эффект дает подъем уровня на 100 м и выше. Однако подъем уровня водохранилища может и не вызвать значительного роста давления подземных вод на глубинах, где существуют достаточно высокие тектонические напряжения. Чтобы это давление возросло, необходимо наличие гидравлической связи поверхностных и подземных вод.

На рис. 24 показана простейшая схема изменения взаимосвязи поверхностных и подземных вод при создании водохранилища. Мы рассматриваем только два водоносных горизонта — верхний горизонт безнапорных, или грунтовых, вод, уровень которых непосредственно связан с рекой, и нижний горизонт напорных вод, приуроченный к наклонному пласту или к зоне тектонического нарушения. Нижний горизонт имеет в пределах долины затрудненную гидравлическую связь с верхним — через слабопроницаемые слои или по системам трещин.

В естественных условиях, до заполнения водохранилища (рис. 24, а), грунтовые воды дренируются рекой. Уровень напорных вод в долине выше, чем уровень грунтовых. Поэтому здесь происходит подток вод из нижнего горизонта в верхний. На водоразделе соотношение уров-

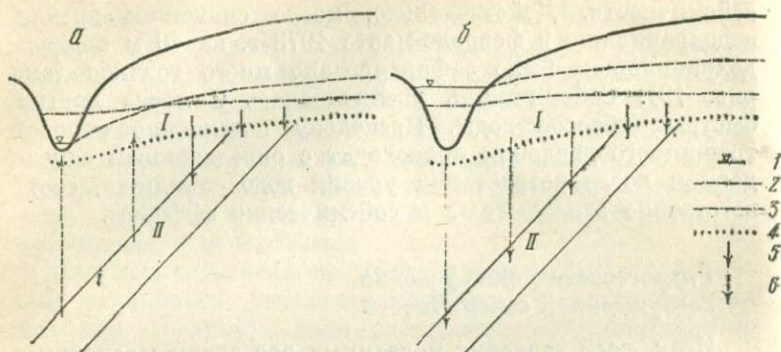


Рис. 24. Схема изменения взаимосвязи поверхностных и подземных вод в зоне водохранилища

a — в естественных условиях; *b* — после заполнения водохранилища; *I* — горизонт безнапорных вод; *II* — горизонт напорных вод или обводненная тектоническая трещина; 1 — уровень воды в реке или водохранилище; 2 — уровень безнапорных вод; 3 — пьезометрический уровень напорных вод; 4 — нижняя граница горизонта безнапорных вод; направления фильтрации подземных вод: 5 — активной, 6 — затрудненной

ней обратное: нижний горизонт получает питание за счет верхнего.

При заполнении водохранилища начинается фильтрация поверхностных вод на затопленных участках и уровень грунтовых вод повышается. В зависимости от высоты подъема уровня водохранилища, рельефа и гидрогеологических условий долины через определенный период времени фильтрация прекратится, и грунтовые воды при новом, подпорном уровне будут поступать в долину. В горных районах на некоторых участках возможно сохранение фильтрации из водохранилища в борта долины.

Как видно из рис. 24, *b*, после заполнения водохранилища изменится соотношение уровней грунтовых и напорных вод, и последние станут получать питание за счет грунтовых вод. При этом давление напорных вод возрастет. Зона возрастания давления определяется новым соотношением уровней напорных и грунтовых вод. Зона эта постепенно расширится, по мере того как сформируется повышенный уровень грунтовых вод. В зависимости от характера гидравлической связи напорного горизонта с грунтовым и через него с водохранилищем рост давления напорных вод будет происходить с определенным за-

позданием относительно повышения уровня водохранилища.

Высоконапорные водохранилища, где наблюдалась возбужденная сейсмичность, чаще всего располагаются в горных областях. Здесь ложе водохранилища обычно слагается скальными породами, водоносность которых связана с трещиноватостью. Грунтовые, точнее, безнапорные воды приурочены к верхнему, трещиноватому горизонту, а напорные — к тектоническим разломам. При этом условия взаимосвязи безнапорных и напорных вод с поверхностными могут быть более сложными, но в общем они должны подчиняться указанной схеме.

Таким образом, пространственно-временной ход возбужденной сейсмичности связан с распространением области повышенного давления подземных вод и, следовательно, находится в зависимости от гидрогеологических условий. Здесь нужно также коснуться размеров водохранилища. Ясно, что при заполнении крупного водохранилища зона повышенного давления воды в глубоких горизонтах займет обширную площадь, что увеличит вероятность включения в нее сейсмогенных разрывов и, следовательно, активизации возбужденной сейсмичности.

Давление порово-трещинных вод в глубоких горизонтах повышается не только при наличии их фильтрационной связи с водохранилищем или с верхними водоносными горизонтами. Определенную роль здесь может играть гравитационная нагрузка водохранилища. Известно, что возрастание нагрузки на водоносные породы при затрудненном оттоке воды приводит к повышению давления порово-трещинных вод. Однако это повышение давления распространяется в соответствии с законом убывания нагрузки с глубиной и, значит, будет ограничено теми же глубинами, что и непосредственное воздействие водной нагрузки. Поскольку в широких водохранилищах нагрузка с глубиной убывает в меньшей степени, чем в узких, для крупных водохранилищ такой путь повышения давления порово-трещинных вод при отсутствии их гидравлической связи с верхними горизонтами может иметь важное значение как фактор возбужденной сейсмичности.

Наконец, прогибание ложа водохранилища, о котором уже упоминалось, также может повлиять на гидрогеологические условия глубоких горизонтов. Связанное с прогибанием ложа, его растяжение способствует раскрытию трещин и облегчает фильтрационные связи глубоких го-

ризонтов с чашей водохранилища, что вызовет повышение давления в этих горизонтах.

Для развития деформационных процессов важно соотношение величин порово-трещинного давления и геостатической нагрузки толщи пород. Следовательно, исходное (естественное) давление воды в глубоких горизонтах также влияет на возбужденную сейсмичность. При прочих равных условиях наличие в глубоких горизонтах аномально высокого давления (гидродинамической аномалии) снизит порог интенсивности инженерных воздействий, стимулирующих возбужденные землетрясения.

Таким образом, наличие гидравлической связи глубоких подземных вод с грунтовыми и поверхностными водами — одно из важнейших гидрогеологических условий возникновения возбужденной сейсмичности при заполнении водохранилищ. На это обратил внимание еще Ж. Роте — один из первых исследователей возбужденных землетрясений.

О наличии гидравлической связи глубоких водоносных горизонтов с верхними горизонтами могут свидетельствовать горячие источники. Как отмечают Х. Гупта и Б. Растоги [1979] в своей сводке, посвященной «водохранилищным» землетрясениям, выходы горячих источников известны в районах водохранилищ Кремаста, Койна, Кариба, где происходили сильные возбужденные землетрясения.

Применительно к землетрясениям, вызванным нагнетанием воды в глубокие горизонты, характер гидравлической связи этих горизонтов с поверхностными и грунтовыми водами играет совершенно иную роль. Давление подземных вод в глубоком горизонте будет интенсивнее повышаться в случае, если он изолирован от верхних горизонтов. Поэтому затрудненная связь с поверхностью горизонтов, используемых для нагнетания воды, способствует развитию возбужденных землетрясений.

Возможное влияние эффекта Ребиндера на возбужденную сейсмичность

Так же как и для землетрясений естественных, пока еще нельзя количественно оценить степень влияния эффекта Ребиндера на развитие возбужденных землетрясений. Имеются, однако, основания полагать, что это влия-

ние при возбужденной сейсмичности может быть более значительным, чем при естественной.

Фильтрация воды из водохранилищ в горные породы или нагнетание воды в глубокие горизонты будет сопровождаться повышением водонасыщенности пород, что увеличит масштабы адсорбционного воздействия на их прочность. Очаги возбужденных землетрясений обычно находятся на небольших глубинах, где минерализация подземных вод не столь велика, как в более глубоких очагах естественных землетрясений. Выше уже отмечалось, что высокая минерализация вод снижает их адсорбционную активность.

Инженерные воздействия, приводящие к возбужденным землетрясениям, сопровождаются изменением химического состава подземных вод. Это происходит и при закачке различных сточных вод в глубокие горизонты, и при фильтрации воды из водохранилищ. В результате адсорбционная активность порово-трещинных вод может увеличиться. Например, в случае высокой минерализации естественных подземных вод разбавление их более пресными водами, поступающими сверху, усилит адсорбционный эффект.

По-видимому, эффект Ребиндера наряду с повышением давления воды послужил одной из причин сейсмической активизации в Грозненском нефтеносном районе в 1970—1972 гг. Адсорбционное понижение прочности пород в зоне очага, которая расположена здесь на небольшой глубине, могло быть связано с эксплуатацией нефти и закачкой воды для поддержания пластового давления. И в том и в другом случае изменяется адсорбционная активность среды. При отборе нефти ее место в порах и трещинах занимает минерализованная вода. Закачка технической (пресной) воды вызвала существенное опреснение пластовых вод, которые содержали свыше 50 г/л солей. Вследствие снижения минерализации вод увеличилась их адсорбционная активность.

В последнее время для лучшего извлечения нефти в пласты закачивают воду с добавлением поверхностно-активных веществ. Такие добавки существенно повышают адсорбционное воздействие воды и могут способствовать развитию возбужденной сейсмичности.

Снижение порово-трещинного давления и сейсмичность

Рассматривая причины возбужденных землетрясений, мы до сих пор касались только роли повышенного давления порово-трещинных вод. Однако деятельность человека часто приводит к снижению давления подземных вод. При откачках подземных вод образуются понижения уровней или напоров водоносных горизонтов — депрессионные воронки. Наиболее крупные депрессионные воронки сформировались в ряде горнорудных и нефтедобывающих районов, а также на участках больших эксплуатационных водозаборов. Так, на Михайловском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии депрессионная воронка в напорных водоносных горизонтах имеет радиус свыше 25 км. В районе Москвы, водоснабжение которой лишь частично осуществляется за счет подземных вод, в результате многолетней работы эксплуатационных водозаборов образовалась крупная депрессия напоров. Радиус этой депрессии в некоторых горизонтах достигает 70 км, глубина — более 110 м [Котлов, 1977]. Крупные депрессионные воронки имеются и в сейсмоактивных областях.

Водопонижение, а также эксплуатация нефти и газа вызывают осадку земной поверхности. Это происходит в результате уменьшения пористости пород, насыщенных жидкостью, и их сжатия, что обусловлено снижением порового давления и соответствующим ростом эффективного напряжения, т. е. напряжения в скелете породы.

Хорошо известны многочисленные примеры оседания земной поверхности. В Японии такое оседание, связанное с интенсивной эксплуатацией подземных вод, произошло в городах Токио, Осака, в долине Ниигата, где, помимо отбора подземных вод, ведется добыча газа. На некоторых участках в Токио земная поверхность опускается со скоростью до 18 см в год, общая величина оседания за 50 лет превысила 3 м. Еще более значительное оседание наблюдается в ряде районов США и Мексики. В долине Сан-Хоакин (Калифорния) в результате эксплуатации многочисленных водяных скважин опустилась земная поверхность площадью более 9 тыс. км². На отдельных участках величина оседания достигла 8,5 м. В Мехико оседание поверхности местами превысило 7 м. Подобные случаи известны и в нашей стране. Так, по данным

В. А. Мироненко, под влиянием глубокого водопонижения на Белозерском железорудном месторождении произошла осадка на величину более 2,5 м.

Сложнее обстоит дело с влиянием водопонижения на сейсмичность. По мнению автора, сейсмические последствия образования крупных депрессий напоров в глубоких водоносных горизонтах различны. Снижение давления порово-трещинных вод приведет к росту напряжения в скелете породы и соответственно повысит сопротивление сдвигу. Это упрочнение пород при наличии небольших тектонических напряжений должно затормозить деформации и, следовательно, уменьшить сейсмическую активность. Однако в районах, где существуют мощные тектонические напряжения, такое затормаживание, если оно будет продолжаться длительное время, вероятно, вызовет чрезмерную концентрацию напряжений, что повысит опасность сильных землетрясений.

Сейсмический эффект водопонижения зависит от скорости и величины снижения порово-трещинного давления, площади образовавшейся депрессионной воронки, характера действующих тектонических напряжений. Среди сильных землетрясений, которые в какой-то степени могли быть связаны с понижением порово-трещинного давления, надо прежде всего упомянуть землетрясения в Ташкенте (1966 г.) и в Газли (1976 г.).

В пределах Ташкента с 1956 г. эксплуатируются термоминеральные воды верхнемеловых отложений. Здесь действует группа скважин глубиной от 1,3 до 2,3 км. В результате эксплуатации образовалась крупная депрессия напоров, в центре которой давление воды по сравнению с начальным снизилось к 1966 г. на 15 кгс/см². Гидрогеологи В. М. Фомин и В. О. Волейшо [1978] определили, что за счет снижения давления воды эффективное напряжение в породах водоносного горизонта повысилось. Как видно на рис. 25, в центре депрессионной воронки прирост напряжения достиг к 1966 г. 15 кгс/см². Этот участок наибольшего прироста напряжения совпадает с эпицентральной зоной, где сила землетрясения достигла 8 баллов. Очертания зон более низкой балльности и меньших приростов эффективного напряжения близки. Отсюда делается вывод, что причиной локального роста напряжений в очаге Ташкентского землетрясения является интенсивная эксплуатация подземных вод и снижение напора в водоносном горизонте,

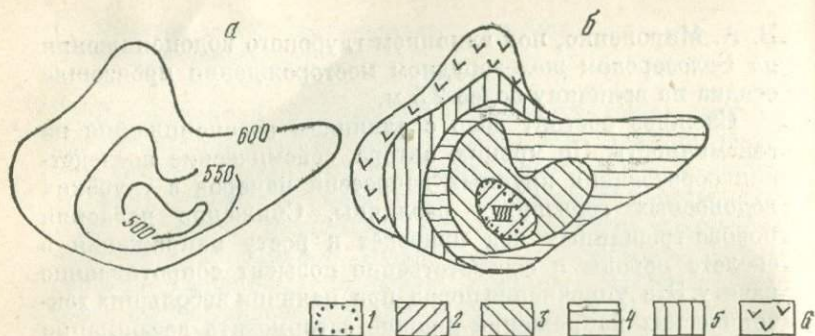


Рис. 25. Схемы депрессионной воронки Ташкентского водозабора термоминеральных вод и прироста эффективных напряжений за счет сработки гидростатических давлений по состоянию на 4 апреля 1966 г. (по В. О. Волейшо)

a — гидроизоэпезы термоминеральных вод, м; *b* — прирост эффективных напряжений; 1 — эпицентральная зона землетрясения 26 апреля 1966 г. (8 баллов); 2—6 — дополнительные эффективные напряжения, кгс/см²: 2 — 15,0; 3 — 12,5; 4 — 7,5; 5 — 5,0; 6 — 2,5

Чтобы определить, насколько обоснован такой вывод, рассмотрим прежде всего совпадение эпицентра землетрясения с центром депрессионной воронки горизонта термоминеральных вод. Достаточно ли такого совпадения, чтобы доказать наличие причинной связи между землетрясением и снижением напоров подземных вод? Нет, недостаточно. Ведь землетрясения в Ташкенте бывали и раньше. 3 апреля 1868 г. и 29 ноября 1886 г. в городе произошли сильные землетрясения (магнитуда 6,5—6,7, интенсивность до 8 баллов), вызвавшие разрушения и жертвы. Менее сильное землетрясение, с магнитудой 4,3, интенсивностью 7 баллов, зафиксировано 7 июня 1924 г. Интересно, что очаг его был также неглубоким (5 км), а координаты почти точно совпадают с координатами очага 1966 г. Шестибалльные землетрясения в этом районе отмечены 16 октября 1929 г. и 10 июля 1938 г. Таким образом, Ташкентский очаг существовал еще до того, как началась эксплуатация термоминеральных вод.

Как уже упоминалось выше, разрыв в очаге землетрясения 1966 г. зародился на глубине 8 км, в породах складчатого основания, и затем распространялся вверх до глубины 3 км (см. рис. 6). Эксплуатируемый водоносный горизонт расположен на глубине около 2 км. Следовательно

но, в вертикальном разрезе зона первоначальных деформаций в очаге находится гораздо глубже эксплуатируемого горизонта, что не свидетельствует в пользу заключения В. М. Фомина и В. О. Волейшо. Можно было бы также предположить, что землетрясение спровоцировано снижением давления воды в разломе, где зародился очаг, если этот разлом имеет гидравлическую связь с эксплуатируемым горизонтом. Однако такое допущение трудно увязать с существующими представлениями: и теория и опыт исследований в районах нагнетательных скважин указывают, что снижение давления воды уменьшает уровень сейсмичности.

С 1938 г. до апреля 1966 г. в районе Ташкента не было сильных землетрясений. Этот период затишья, когда интенсивные сейсмические подвижки не происходили, нельзя связывать с эксплуатацией термоминеральных вод, которая началась только в 1956 г. Таким образом, приведенные соображения не позволяют согласиться с выводом о влиянии эксплуатации термоминеральных вод на сейсмический режим Ташкентской эпицентральной зоны.

В районе Газли — газового месторождения, расположенного в Узбекистане, 8 апреля и 17 мая 1976 г. произошли сильные землетрясения, с магнитудой соответственно 7 и 7,3 и интенсивностью 8 и 9 баллов (по некоторым данным, 9—10 баллов). В результате эксплуатации месторождения здесь образовалась значительная депрессионная воронка в газоводоносных горизонтах. В отдельных горизонтах величина снижения давления достигла 28 кгс/см^2 .

Поскольку эпицентры обоих землетрясений находятся в непосредственной близости от месторождения, появились предположения о связи землетрясений с добычей газа. Гидрогеолог Е. С. Штенгелов [1979] считает, что землетрясения в Газли, как и ряд других возбужденных землетрясений, обусловлены современным процессом раздвижения земной коры, который активизировался под влиянием техногенной деятельности. По мнению Е. С. Штенгелова, отбор газа и воды на Газлийском месторождении сопровождается уменьшением объемов блоков, разделенных трещинными зонами, и соответствующим ростом этих трещинных зон, что привело к повышению сейсмичности.

Действительно, при разработке газа в Газли произошло оседание земной поверхности. Однако это оседание,

как и маловероятное горизонтальное сжатие блоков породы, относится только к эксплуатируемым горизонтам. Сложенные глинами и песчаниками мелового возраста, они находятся на глубинах до 1,3—1,7 км. Глубже залегает палеозойский фундамент — граниты и другие скальные породы.

Очаги рассматриваемых землетрясений расположены на глубинах 20—30 км, афтершоков — 10—25 км и лишь отдельных толчков — 5—8 км. Если даже допустить, что глубокие зоны, к которым приурочены очаги, имеют гидравлическую связь с эксплуатируемыми горизонтами (что не увязывается с гидрогеологическими представлениями) и в них снизилось давление трещинных вод, то сжатие блоков скальных пород не произойдет: известно, что при водопонижении скальные породы деформируются очень слабо. Следовательно, оседание верхних слоев, связанное с эксплуатацией Газлийского месторождения, не могло распространиться на глубокие зоны очагов и вызвать землетрясения.

Таким образом, сложный вопрос о сейсмическом эффекте снижения давления порово-трещинных вод нельзя считать решенным, ибо предложенные механизмы возбуждения сейсмичности недостаточно обоснованы. Применительно к очагам неглубоких землетрясений повышение сейсмичности при эксплуатации нефти и газа, а в некоторых случаях и подземных вод может быть связано не с механическим, а с физико-химическим воздействием воды, о чем уже упоминалось выше.

По-видимому, требует пересмотра распространенная точка зрения на причины землетрясений, происходящих при отборе нефти или газа. Подобные землетрясения трудно объяснить снижением порово-трещинного давления. Это, в частности, относится и к Старогрозненскому землетрясению 26 мая 1971 г. Интересно, что анализ промысловых данных, проведенный Е. А. Казиным и Г. Ш. Елизаровым, позволил им прийти к выводу, что не падение пластового давления нефти вызвало это землетрясение, а землетрясение повлияло на ход пластового давления.

Перспективы контроля землетрясений

Еще недавно проблемы контроля землетрясений и управления сейсмичностью могли касаться только писатели-фантасты. И тот факт, что ныне контроль землетрясений становится предметом серьезных научных разработок и экспериментов, служит доказательством значительного прогресса сейсмологии и смежных наук.

Условия для реального рассмотрения проблемы контроля землетрясений появились только в конце 60-х годов, когда были достигнуты успехи в познании природы возбужденных землетрясений и стало ясно, что для воздействия на ход сейсмического процесса нет необходимости затрачивать колоссальную энергию, соизмеримую с энергией землетрясений. К тому времени в сейсмологии утвердилось понятие об эффекте спускового механизма, эффекте, который использует неустойчивость процесса и позволяет, как заметил акад. М. А. Садовский, малыми воздействиями заставить процесс изменить направление или характер развития.

Задача управления сейсмичностью в конечном счете сводится к тому, чтобы предотвратить сильное землетрясение, вызвав разрядку тектонических напряжений посредством серии слабых толчков. Обсуждается и другое решение этой задачи — вызвать сильный толчок в определенное время, что позволит исключить человеческие жертвы и снизить материальный ущерб от землетрясения. Активное воздействие на зону очага предполагаемого землетрясения может быть осуществлено посредством мощного подземного взрыва или путем нагнетания воды в глубокие горизонты.

Выше мы уже касались сейсмических эффектов подземных ядерных взрывов. Американские сейсмологи предлагали использовать такие взрывы, чтобы высвободить накопившиеся в земной коре напряжения. Существуют, однако, серьезные препятствия для реализации подобных проектов: разрушительный эффект самого взрыва, выделение радиоактивных продуктов и др. Кроме того, разовое воздействие взрыва не позволяет регулировать дальнейшее выделение сейсмической энергии. По-видимому, подземные взрывы, если они будут использованы, окажутся более пригодными для того, чтобы вызвать сильный толчок, нежели для управления сейсмическим режимом.

Нагнетание воды в глубокие горизонты не связано с опасными воздействиями на окружающую среду и может быть проведено в густонаселенных районах. Судя по результатам экспериментов, метод нагнетания позволит регулировать выделение сейсмической энергии в различных частях сейсмоактивной зоны в течение длительного времени.

Специальные эксперименты для изучения воздействия нагнетания воды на сейсмический режим были проведены в США и Японии. В США эти опыты выполнялись на нефтяном месторождении Рейнджели, где ранее уже была отмечена возбужденная сейсмичность. Для нагнетания и откачки воды использовались четыре скважины глубиной более 2 км. По группе наблюдательных скважин определялись изменения пластового давления. Сейсмические толчки регистрировались сетью сейсмостанций.

Большая часть микроземлетрясений концентрировалась в зоне тектонического нарушения на глубинах 2—4 км. Исследования показали, что толчки начинались при пластовом давлении более 257 бар. Была установлена четкая зависимость месячного числа толчков от нагнетания или откачки воды (рис. 26). В период нагнетания с октября 1969 г. по ноябрь 1970 г. произошло более 900 толчков, из них 367 — в радиусе до 1 км от нагнетательных скважин. Последующая откачка воды из скважин в течение полугода сопровождалась резким уменьшением сейсмической активности. Затем вновь проводилось нагнетание воды и был отмечен рост количества толчков в периоды, когда давление в пласте превышало пороговую величину.

По данным американских специалистов, эксперимент в Рейнджели показал, что количество толчков можно регулировать в зависимости от соотношения давления жидкости и напряжения в скелете породы, т. е. по принципу М. Хубберта и В. Раби.

Японские геофизики провели опыты по искусственному воздействию на сейсмический режим в сейсмоактивном районе Мацусиро. Здесь была пробурена специальная скважина глубиной 1800 м вблизи сейсмогенного разрыва (рис. 27). В нижнюю часть скважины, вскрывшую кристаллические породы, под давлением закачивалась вода.

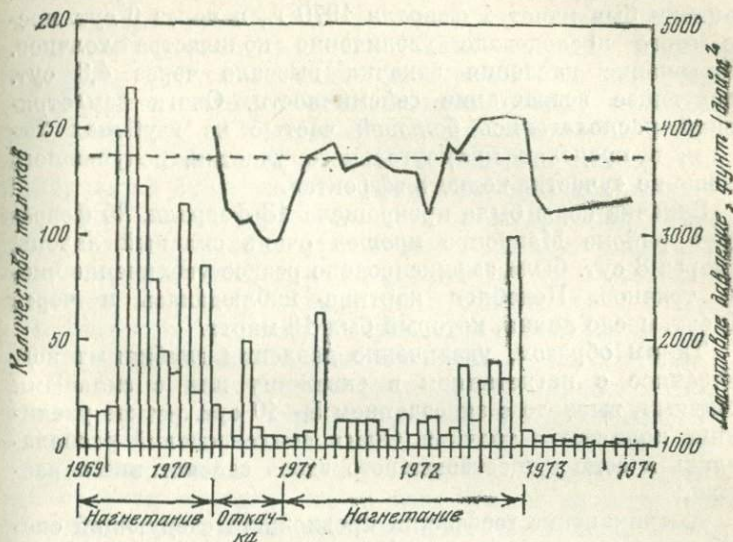
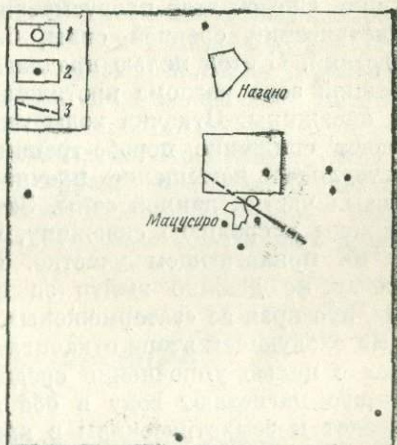


Рис. 26. Зависимость месячного количества толчков в Рейджели от нагнетания и откачки воды (по Рейли, Хили и Бредехофту)

Жирная линия — среднемесячное пластовое давление, штриховая линия — критическое пластовое давление, с превышением которого начинаются возбужденные землетрясения

Рис. 27. Схема экспериментального полигона Маусиро (по М. Отаке)

Прямоугольник к северу от Маусиро — участок, где проявлялось интенсивное воздействие нагнетания воды на сейсмичность; 1 — нагнетательная скважина; 2 — сейсмостанции; 3 — сейсмогенный разрыв



По сообщению японского геофизика М. Отаке, в скважину было подано всего 2883 м³ воды. 15 января 1970 г. был начат первый цикл закачки, продолжавшийся 3 сут. 25 января, через 9,3 сут. после начала нагнетания, сейсмичность резко повысилась (до 53 толчков в сутки).

Это были преимущественно слабые толчки. Второй цикл закачки был начат 1 февраля 1970 г., а через 6 сут. после этого последовало увеличение количества толчков. Повышение давления закачки вызвало через 4,8 сут. следующее возрастание сейсмичности. Очаги землетрясений располагались большей частью на глубинах 2—7 км, в пределах прямоугольного участка, получившего название «участка водного эффекта».

Закачка воды была прекращена 13 февраля. 25 февраля в районе Мацусиро прошел очень сильный ливень, а через 8 сут. было зафиксировано резкое увеличение числа толчков. Подобная картина наблюдалась и через 10 сут. после ливня, который был 16 марта.

Таким образом, увеличение давления глубинных вод, связанное с нагнетанием в скважину или с сильными дождями, вызвало с запозданием 5—10 сут. резкое увеличение количества толчков. Очаги землетрясений располагались в зоне существовавшего здесь сейсмогенного разрыва.

Американские геофизики предложили следующий способ контроля землетрясений применительно к крупному сейсмогенному разлому, например Сан-Андреас в Калифорнии. Способ этот предусматривает возбуждение серии землетрясений средней силы, без разрушительных последствий. С этой целью предлагается пробурить в определенной зоне разлома протяженностью 5 км три глубокие скважины. Откачка воды из двух крайних скважин вызовет снижение порово-трещинного давления и соответствующее повышение прочности пород на сдвиг в краевых частях данной зоны. Затем проводится нагнетание воды в среднюю скважину, что вызовет землетрясения на прилегающем участке. При этом смещение по разлому не должно выйти за пределы 5-километровой зоны, ибо края ее «заторможены».

На следующем этапе откачивают воду из средней скважины с целью упрочнения среднего участка зоны. После этого нагнетают воду в обе крайние скважины, что приведет к землетрясениям в краевых частях зоны. Однако сейсмические подвижки краевых частей зоны будут изолированы друг от друга в результате того, что центральный участок зоны «заторможен». Последовательное выполнение таких операций вдоль всего разлома должно вызвать разрядку напряжений и предотвратить возможность сильных землетрясений.

Идея как будто очень заманчива. Но ее практическое осуществление связано с большими трудностями. Чтобы правильно рассчитать сейсмический эффект подобной операции, необходимо знать фильтрационные характеристики сейсмогенного разлома, существующие в нем напряжения и т. д. Поскольку все эти показатели подвержены большой изменчивости, получить достаточную информацию будет нелегко даже при проведении значительного объема дорогостоящих исследований. Кроме того, при современном уровне знаний нельзя еще гарантировать, что сейсмический процесс будет развиваться по намеченному плану и нарушение равновесия в системе сейсмогенного разлома, где существуют мощные тектонические напряжения, не вызовет опасных последствий.

Крупные сейсмогенные разломы, выходящие на земную поверхность и сравнительно хорошо изученные, как Сан-Андреас, встречаются не часто. Многие сильные землетрясения связаны со скрытыми разломами. Понятно, что в таких случаях задача воздействия на подготовку землетрясения посредством нагнетания—откачки осложняется. Кроме того, способ этот, очевидно, неприменим для землетрясений с глубокими очагами.

До сих пор исследования в связи с проблемой контроля землетрясений касались только механических воздействий на очаговую зону. По-видимому, большие перспективы имеет и использование физико-химических методов, например адсорбционного понижения прочности пород. Можно надеяться, что применение специальных жидкостей для закачки повысит эффективность механического воздействия на сейсмогенный разлом и позволит выбрать оптимальный режим хрупких и пластичных деформаций.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Гидрогеологические эффекты землетрясений

Лиссабонское землетрясение 1 ноября 1755 г.— крупнейшая сейсмическая катастрофа исторического времени в Западной Европе — часто фигурирует в описаниях разрушительных эффектов землетрясений. Менее известно влияние этого землетрясения на подземные воды, которое

распространилось на большие расстояния. Старинный город Теплице, на северо-западе нынешней Чехословакии, издавна славился своими целебными источниками. 1 ноября 1755 г. кристально-чистая вода главного минерального источника в Теплице внезапно замутилась — казалось, что из источника бьет грязевой фонтан. Затем приток воды прекратился. Через несколько минут излив воды возобновился, причем дебит источника резко увеличился. Так проявились отзвуки Лиссабонской катастрофы на расстоянии более 2200 км от эпицентра.

Гидрогеологические последствия сильных землетрясений известны очень давно. Имеются, например, сведения, что во время разрушительного землетрясения в Древней Греции в 426 г. до н. э. иссякли на три дня горячие источники на острове Эвбея.

Наряду с остаточными явлениями в грунтах изменения режима подземных вод фигурируют в шкале интенсивности землетрясений как один из ее показателей. В нашей стране принята сейсмическая шкала MSK-64, разработанная под руководством С. В. Медведева. В этой шкале гидрогеологические эффекты землетрясений, так же как и другие природные явления, учитываются с 5 баллов. Эффекты эти различны в зависимости от силы землетрясений в баллах:

5 — в некоторых случаях изменение дебита источников;

6 — изменение дебита источников и уровня воды в колодцах;

7 — наряду с изменением уровня воды в колодцах и дебита источников в немногих случаях образование новых или исчезновение существующих источников;

8 — иногда пересохшие колодцы наполняются водой или существующие иссякают, во многих случаях — изменение дебита источников и уровня воды в колодцах.

Для землетрясений 9—12 баллов гидрогеологические эффекты в шкале не рассматриваются. Предусмотренные сейсмической шкалой гидрогеологические эффекты пока еще далеки от количественных оценок. Между тем совершенствование шкалы землетрясений идет по пути более широкого привлечения количественных показателей. Вероятно, в дальнейшем, по мере накопления фактических данных, такие показатели будут установлены и для реакции подземных вод на землетрясения различной силы,

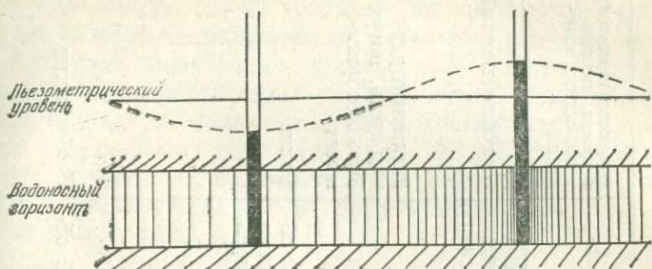
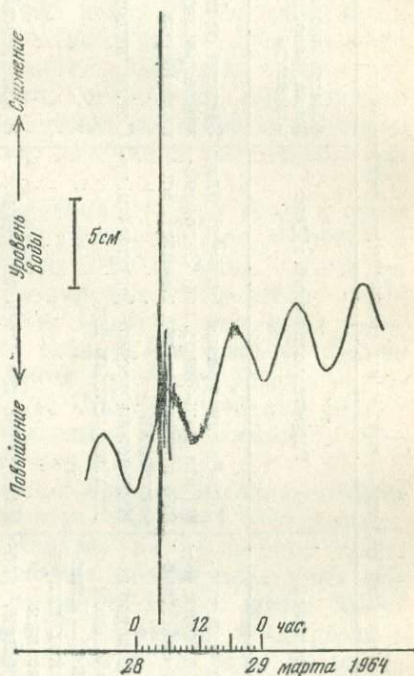


Рис. 28. Влияние сейсмических волн на систему скважина — водоносный горизонт

Сплошная линия — пьезометрический уровень в спокойном состоянии; штриховая линия — уровень при прохождении волн; редкие вертикальные линии — растяжение породы, густые — сжатие породы

Рис. 29. Колебания уровня воды по скважине в Хейбарте (Бельгия), вызванные землетрясением на Аляске 28 марта 1964 г. (по А. Стерлингу и Е. Сметсу)



Воздействия землетрясений на подземные воды различаются по характеру порождающих их деформаций, распространению и длительности эффектов (табл. 2).

При землетрясении в очаге генерируются сейсмические волны. Некоторые их типы, например продольные волны, или так называемые поверхностные волны Рэлея, вызывают попеременные изменения объема среды — сжа-

Таблица 2

Основные типы гидрогеологических эффектов, вызванных сильными землетрясениями

Вид сейсмических деформаций	Гидрогеологический эффект	Область проявления эффекта, расстояние от эпицентра	Продолжительность эффекта, наличие необратимых изменений
<p>Изменение пористости или трещиноватости водовмещающих пород при прохождении сейсмических волн</p> <p>Уплотнение зернистых водовмещающих пород под действием сейсмических сотрясений. Изменение поля тектонических напряжений после землетрясения</p> <p>Образование новых трещин, расширение или смыкание существующих. Смещение водоносных пластов (зон) по разрывам. Нарушение сплошности водоупоров</p>	<p>Колебания уровня (напора) или дебита подземных вод. Загрязнение подземных вод глинистыми частицами</p> <p>Изменения уровня (напора) и дебита подземных вод</p> <p>Изменение взаимосвязи водоносных горизонтов или трещинных зон, изменение путей циркуляции подземных вод. Образование новых источников, изменение дебита или иссякание действующих источников и колодцев. Изменение химического, газового, изотопного состава и температуры подземных вод</p>	<p>Зависит от магнитуды землетрясения, тысячи километров</p> <p>Сотни километров</p> <p>В плейстосейстовой области и на расстоянии первых сотен километров</p>	<p>Кратковременный</p> <p>Различная длительность, могут быть необратимыми</p> <p>То же</p>
<p>Изменение гипсометрического положения областей питания или разгрузки подземных вод. Образование завальных озер</p>	<p>Изменение величины подземного стока и путей циркуляции подземных вод. Иссякание действующих и появление новых источников</p>	<p>В плейстосейстовой области</p>	<p>Необратимые</p>

ние и растяжение. Когда водонасыщенная порода сжимается, пористость сокращается и возрастает давление воды, что вызывает повышение уровня или напора воды в скважине. При растяжении породы объем пор увеличивается, снижается давление воды и соответственно опускается ее уровень в скважине (рис. 28). Таким образом, система скважина—водоносный горизонт при наличии хороших самописцев уровня представляет собой своеобразный сейсмограф.

Записи уровней воды, показывающие эффекты землетрясений, американские ученые назвали «гидросейсмограммами». При землетрясениях нормальной глубины наибольшее изменение уровня воды в скважинах вызывает прохождение поверхностных волн Рэлея. Анализ «гидросейсмограмм» позволяет определять магнитуду землетрясения. В зависимости от времени прохождения волн от удаленного землетрясения на «гидросейсмограммах» выделяются колебания, вызванные различными типами волн.

На рис. 29 показаны колебания уровня воды в скважине в Хейбарте (Бельгия), вызванные землетрясением на Аляске 28 марта 1964 г. Эта скважина глубиной 1660 м была специально оборудована для изучения реакции подземных вод на упругие деформации земной коры, обусловленные приливными силами (на графике хорошо видны полусуточные приливные колебания уровня воды). По данным А. Стерлинга и Е. Сметса, колебания уровня воды, вызванные землетрясением, продолжались 7—8 час., максимальная их амплитуда 35 см.

В результате Аляскинского землетрясения колебания уровня подземных вод отмечались на всех континентах. В провинции Альберта (Канада) на расстоянии около 2200 км от эпицентра колебания уровня подземных вод по отдельным скважинам достигали 1 м. В штате Айова (США) на удалении более 4800 км от эпицентра уровень подземных вод изменялся на 7 см, а вода оказалась загрязненной глинистыми частицами. Замутнение подземных вод также объясняется прохождением сейсмических волн, под действием которых происходит резкое кратковременное возрастание скорости движения подземных вод и они могут увлекать с собой мелкие частицы породы.

Известно много примеров регистрации сейсмических волн удаленных землетрясений по уровням подземных вод. Так, по скважине в штате Джорджия (США),

Р. Ворхисом были определены колебания уровня, связанные с сильным землетрясением на острове Тайвань, на расстоянии более 11 тыс. км. Установлено, однако, что не все скважины реагируют на удаленные землетрясения. Это можно объяснить различной чувствительностью системы скважина—водоносный горизонт к воздействию сейсмических волн.

Карпатское землетрясение 4 марта 1977 г. привело к изменениям уровня воды в колодцах во многих районах Молдавии. На территории Болгарии, по данным болгарских гидрогеологов (Л. Васильевой и др.), наблюдались кратковременные колебания уровня воды в колодцах и карстовых источниках с амплитудой до 12 см. Более длительные изменения дебита и уровня были отмечены по отдельным колодцам и источникам в течение нескольких часов.

Широко распространены кратковременные гидрогеологические эффекты в плейстосейстовых областях сильных землетрясений. Во время отдельных землетрясений образуются небольшие грязевые вулканы. Подобные явления при Ашхабадском землетрясении 1948 г. описаны В. П. Мирошниченко. В районе Ашхабада были обнаружены купола диаметром 7—8 м, высотой до 0,7 м, из которых происходило извержение воды и грязи. Многие купола протягивались вдоль трещин. Одна трещина имела длину около 1 км и ширину 5—10 см, через нее выделялась порода с водой.

Проявления грязевого вулканизма связаны с действием сейсмических волн на неглубоко залегающий водоносный горизонт, сложенный мелкозернистыми породами. Эти проявления известны и на удалении от эпицентров сильных землетрясений. По данным В. С. Саянова, на территории Молдавии, в пределах 6- и 7-балльной зон Карпатского землетрясения 4 марта 1977 г., были отмечены излияния воды с грунтом. Здесь образовались конусы высотой 10—20 см. Грязевые выделения происходили на участках, где грунтовые воды в илах и мелкозернистых песках залегали на глубине до 1 м.

Нередко во время сильных землетрясений фонтанирует вода из скважин, колодцев или вновь образовавшихся трещин. Такое пульсирующее излияние обусловлено прохождением волн сжатия—расширения. Однако известны случаи, когда излияние было непрерывным и продолжалось после прекращения толчков, что связано с остаточ-

ными деформациями водоносного горизонта — уплотнением слагающих его пород и повышением давления воды.

Среди многочисленных проявлений гидрогеологических эффектов Гоби-Алтайского землетрясения 4 декабря 1957 г. встречены следы массового фонтанирования воды через сеть трещин гидравлического удара [Гоби-Алтайское землетрясение, 1963]. Видимо, гидравлический удар, происходящий при быстром перекрытии напорных трубопроводов, может иметь место и в водоносных горизонтах: резкое повышение давления воды под действием упругих волн вызывает образование трещин, через которые вода фонтанирует.

В результате сейсмических сотрясений уплотняются рыхлые водовмещающие породы, уменьшается их пористость, что сопровождается повышением уровня подземных вод, изменением дебита источников или скважин. Подобные нарушения режима подземных вод бывают резко выражены в пределах эпицентральной области и вблизи ее, но в отдельных случаях небольшие остаточные изменения уровня воды фиксируются и на значительном удалении от эпицентра.

Причиной остаточных изменений уровня или дебита подземных вод может быть и перераспределение тектонических напряжений после землетрясения. По данным японского сейсмолога Х. Вакиа, после землетрясения на полуострове Ицу-Ханто 9 мая 1974 г. на обширной территории в районах Токай и Канто наблюдались резкие изменения уровня воды в скважинах. В одних скважинах уровень повышался, в других — снижался. Распределение скважин, где уровень повысился или снизился, соответствует схеме тектонического сжатия и растяжения, отмеченных после землетрясения (рис. 30).

Во время сильнейшего Таншаньского землетрясения в Китае 28 июля 1976 г., которому предшествовало длительное снижение уровня подземных вод, по ряду скважин произошло скачкообразное восстановление уровня. Величина этого подъема местами достигала 4—10 м.

Наиболее значительные гидрогеологические эффекты землетрясений связаны с образованием новых трещин, смыканием или расширением существующих трещин, а также со смещением водоносных зон по разрывам или нарушением сплошности водоупоров. Такие деформации, широко распространенные в плейстосейстовых областях сильных землетрясений, нередко приводят к перестройке

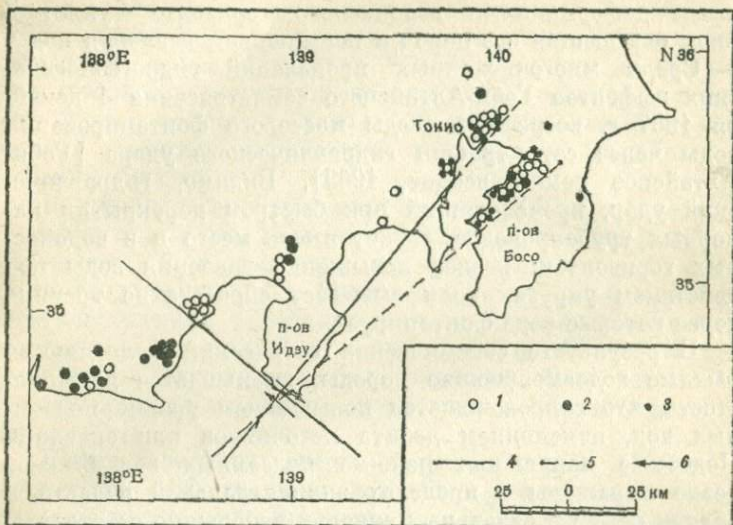


Рис. 30. Изменение уровня подземных вод в скважинах после землетрясения Ицу-Ханто 9 мая 1974 г. (по Х. Вакига)

1 — уровень воды опустился; 2 — уровень воды поднялся; 3 — изменения уровня не произошло; 4 — линии, разграничивающие различные направления смещения по записям сейсмических волн; 5 — юго-восточная граница зоны снижения уровня подземных вод; 6 — направления смещения по разрыву в эпицентре землетрясения

путей циркуляции подземных вод, образованию новых источников, изменению дебита или полному исчезновению действующих источников.

Обследование, выполненное В. П. Солоненко после Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г., показало, что сильные гидрогеологические эффекты проявлялись не только в плейстосейстовой области, но и на расстояниях до 250 км от нее. Так, в сомоне Баян-Цаган после землетрясения иссякло 16 источников и 30 колодцев, появилось несколько новых источников. В горах Бахар возникли мощные источники, образовавшие небольшое озеро. Случалось, что вода в колодцах исчезала и появлялась вновь через две недели. У подножия хребта Арца-Богдо, где ранее действовал слабый источник с мутной минерализованной водой, после землетрясения резко повысился дебит источника и улучшилось ее качество.

В. П. Солоненко отмечает, что в большинстве случаев

изменения гидрогеологического режима были обратимыми и в течение небольшого периода — до двух недель — водный режим восстанавливался. Поскольку специальных гидрогеологических исследований после этого сильнейшего землетрясения не проводилось, возможно, некоторые необратимые изменения остались незамеченными.

В плейстосейстовых областях сильных землетрясений, повлекших за собой изменения в рельефе, нарушения режима подземных вод могут быть связаны с поднятием или опусканием зон питания или разгрузки подземных вод, а также с образованием завальных озер. О таких озерах, например Сарезском, мы уже упоминали. Ясно, что перестройка гидрографической сети существенно влияет на выходы источников. Например, сток из завальных озер частично происходит подземным путем, и в результате фильтрации через завал образуются многочисленные новые источники.

Мы не касаемся здесь подробно влияния землетрясений на поверхностные воды — реки и озера. Но это влияние нередко связано с изменением режима подземных вод. Ведь питание рек и озер частично осуществляется через подземный сток, и изменение подземного стока после землетрясений, обусловленное образованием новых или закрытием существовавших трещин, может сказываться на уровне реки или озера.

Такие случаи известны. Разрушительное землетрясение 21 июля 1952 г. в Южной Калифорнии сопровождалось изменением расхода источников и некоторых рек. На реке Керн уровень воды во время толчка повысился на 24 см. При Аляскинском землетрясении 27 марта 1964 г. были отмечены кратковременные притоки подземных вод в озера и реки. Любопытные изменения водного режима произошли близ города Инангахуа в Новой Зеландии после сильного землетрясения в мае 1958 г. Сейсмические толчки повлекли за собой снижение уровня подземных вод и одновременное повышение уровня реки. Полагают, что землетрясение вызвало усиленный приток подземных вод в реку.

Под влиянием землетрясений изменяются не только уровни и дебиты подземных вод, но и их химический состав и температура. Все эти изменения могут иметь различную длительность или быть необратимыми. Вопрос о длительности проявления гидрогеологических эффектов землетрясений мало изучен. В ряде случаев необратимые

деформации пород вызывают лишь временные эффекты: перестраиваются пути циркуляции подземных вод и первоначальные параметры источников и скважин в значительной степени восстанавливаются.

До сих пор еще мало используется гидрогеологический способ изучения необратимых деформаций грунтов после землетрясений. Эти деформации могут быть определены по изменению уровня подземных вод.

Остается слабо изученным влияние землетрясений на региональные потоки глубокозалегающих подземных вод. Воды эти относятся к так называемой зоне затрудненного водообмена: движение их происходит с очень малой скоростью — порядка десятков сантиметров или первых метров в год. В таких условиях прохождение сейсмических волн от областей, где часты землетрясения, может ускорить движение воды. Здесь должно действовать «отжимание» воды упругими волнами, распространяющимися от очагов землетрясений.

Можно указать на еще один вероятный гидрогеологический эффект землетрясений. Он связан с переходом подземных вод под действием сейсмических волн из менее подвижного в более подвижное состояние. Частицы воды, заключенные в закрытых, изолированных порах и трещинах пород, а также в газожидких включениях минералов, способны сохраняться в покое на протяжении длительного геологического времени. Прохождение упругих волн и остаточные деформации массива при землетрясениях приводят к нарушению замкнутых пор и включений. В результате находящаяся в них вода вовлекается в фильтрационный поток.

Экспериментально установлено, что воздействие упругих волн на водонасыщенную породу способствует переходу связанной воды в свободное состояние. Так, опыты, проведенные чл.-кор. АН СССР Н. В. Черским и др., показали, что под влиянием ультразвука разрушаются пленки связанной воды и резко возрастает проницаемость пород. Проницаемость через несколько секунд после начала обработки упругими волнами возросла в десятки раз.

Имеются также данные, что в сильном акустическом поле на разделах фаз твердое тело — жидкость возникают интенсивные течения. Таким образом, малоподвижная связанная вода высвобождается и приобретает способность к более быстрой миграции.

Все это позволяет сделать вывод, что при прочих равных условиях подземные воды в сейсмичных областях участвуют в водообмене активнее, чем в областях асейсмичных.

Влияние землетрясений на минеральные воды

1 марта 1978 г. в 1 час 58 мин. ночи жители городов-курортов Кавказских Минеральных вод были разбужены подземными толчками. Эпицентр землетрясения силой до 5,5 балла был зарегистрирован между городами Пятигорском, Ессентуками, Лермонтовым. Оно ощущалось во многих районах Северного Кавказа.

По сообщению гидрогеолога З. А. Полонской, контрольно-наблюдательная служба отметила нарушения режима минеральных вод в различных районах курорта. В Пятигорске дебит Лермонтовского источника снизился с 340 до 230 м³/сут. Дебит Кабардинского источника упал с 150 до 103 м³/сут и восстановился через 9 сут. В карстовом озере-источнике Провал на горе Машук накануне землетрясения был отмечен быстрый подъем уровня воды, которая переливалась с дебитом 190 м³/сут. После землетрясения уровень воды упал на 3 см, а дебит сократился до 22 м³/сут. В одних источниках содержание сероводорода снизилось, в других — повысилось.

Подобное изменение газового состава минеральных вод в результате землетрясения произошло и в Ессентуках, где в источниках № 4 и № 17 содержание углекислоты выросло на 0,05—0,1 г/л, а в двух других снизилось. Кисловодский Нарзан в течение 2,5 сут. после землетрясения давал мутную воду. В Железноводске прекратился излив источника № 18, дебит его восстановился через 18 сут. после толчка, а в Славяновском источнике уровень после землетрясения снизился на 4,4 м и через сутки восстановился. Таким образом, землетрясение средней силы вызвало довольно существенные изменения на ряде месторождений минеральных вод.

Рассматриваемые изменения режима минеральных вод нельзя считать какими-либо специфическими проявлениями землетрясений. Эти изменения по своей природе не отличаются от гидрогеологических эффектов землетрясений, которых мы коснулись выше. Однако на месторождениях минеральных вод подобные эффекты часто более

контрастно выражены, чем на месторождениях пресных вод, что объясняется двумя причинами. Во-первых, минеральные воды обычно приурочены к трещиноватым зонам и формируются в результате смешения вод поверхностной и глубокой циркуляции. Поэтому минеральные воды очень чутко реагируют на изменения проводимости трещин, путей циркуляции, влияющих на соотношение поверхностной и глубинной составляющих. Во-вторых, на месторождениях минеральных вод систематически наблюдаются и легко улавливаются изменения не только количественных, но и качественных показателей — температуры, химического и газового состава. Все это в равной степени относится не только к минеральным, но и к термальным водам.

Влияние землетрясений на источники Кавказских Минеральных вод отмечалось и ранее. Советский сейсмолог Е. И. Бюс [1946] приводит данные о воздействии ряда землетрясений на минеральные источники Пятигорска. Землетрясения 1822, 1823, 1830, 1839 гг. силой до 5—6 баллов сопровождались временным исчезновением или резким сокращением дебита Александровского источника. В отдельных случаях одновременно усиливался приток из других источников и появлялись новые выходы минеральных вод. Из-за сокращения дебита Александровского источника в 1839 г. временно были закрыты ванны. Аналогичные изменения источников Пятигорска наблюдались при землетрясениях 1853, 1863, 1872 гг. Некоторые землетрясения заметно не отражались на дебите источников, но изменялась температура воды. После землетрясения 1921 г. силой до 7 баллов вода Александровского источника в Пятигорске почернела и стала прозрачной через три дня, а в кисловодском Нарзане, дебит которого вырос более чем в 2 раза, вода приобрела красный цвет, видимо за счет окислов железа.

На Боржомских минеральных источниках интересные данные были получены химиком Ф. Мольденгауэром, который проводил здесь гидрогеологические исследования с конца прошлого века. Особенностью некоторых газифицирующих источников является их пульсационный режим — периодическое изменение во времени дебита, газонасыщенности и других показателей. Пульсационные явления связывают с неравномерным выделением из воды растворенного газа. В результате Ахалкалакского землетрясения в декабре 1899 г. изменился пульсационный режим источ-

ника № 1 в Боржоми. Если до землетрясения, которое в Боржоми достигло силы 7 баллов, пульсация с бурным выделением газа («вскипанием» воды) происходила с периодом 40—45 мин., то после толчка резко вырос дебит источника и период пульсации сократился до 7—10 мин.

По наблюдениям советского гидрогеолога А. М. Меливы, при пульсационном режиме газовый поток изменяется значительно сильнее, чем дебит воды. Было отмечено, что на одной из боржомских скважин пульсационные явления усилились после землетрясения 20 декабря 1942 г. Таким образом, в результате землетрясений здесь увеличивался не только приток минеральной воды, но и ее насыщение углекислым газом. Указанные изменения режима минеральных вод в Боржоми сохранялись после землетрясений длительное время.

Разнообразные гидрогеологические эффекты на обширной площади наблюдались во время Дагестанского землетрясения 14 мая 1970 г. Землетрясение это с магнитудой 6,7 и силой до 8 баллов существенно изменило состав минеральных и термальных вод в радиусе до 200 км от эпицентра. Наблюдения геохимиков Д. Г. Осики, Г. И. Войтова и др. позволили установить следующую картину этих изменений.

На нефтяном месторождении Заузенбаш, расположенном в восточной части плейстоценовой области, после главного толчка в подземных водах повысилось содержание ионов хлора, кальция и магния, борной кислоты, уменьшилось количество гидрокарбонатов и сульфатов. Изменился газовый состав вод, в частности в них был обнаружен свободный водород. Подобные изменения могут указывать на возросший приток глубинных вод в водоносный горизонт. Близ села Ахатлы в эпицентре землетрясения из трещин наблюдалось поступление газов, обогащенных углекислотой, водородом, гелием и другими компонентами глубинного происхождения.

На минеральных источниках Талги, в 30 км от эпицентра, на 1—3°С повысилась температура воды и изменился ее газовый состав. В районах, удаленных от эпицентра на 100 км и более (Избербаш, Гапша, Берикей), в газах минеральных вод резко увеличилось содержание углекислоты. Источник Рычал-Су после землетрясения резко увеличил дебит. В Ахтынских минеральных источниках, на расстоянии 200 км от эпицентра, снизилась

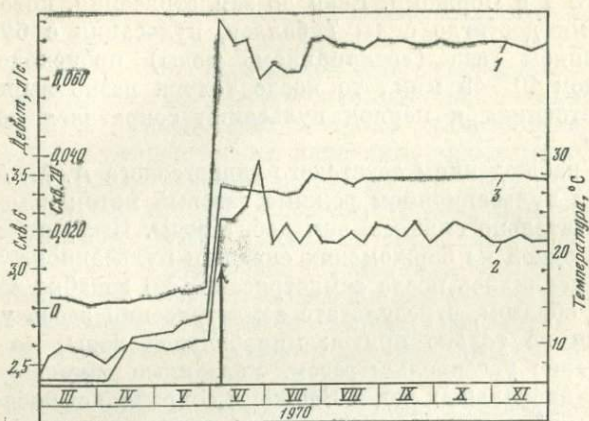


Рис. 31. Изменения режима минеральных вод курорта Джеты-Огуз, вызванные Саракамышским землетрясением 5 июня 1970 г.

1 — дебит воды по скважине 20; 2 — дебит воды по скважине 6; 3 — температура воды по скважине 20; вертикальная стрелка — время землетрясения

температура на $1,5-2^{\circ}\text{C}$, изменился химический и газовый состав вод.

Большой интерес представляют связанные с землетрясениями длительные и необратимые изменения минеральных вод. Характер этих изменений в тех случаях, если они касаются соотношения глубинных и поверхностных компонентов минеральных вод, позволяет установить, как повлиял толчок на состояние водопроводящих трещинных систем.

По данным ташкентских гидрогеологов, после землетрясения 26 апреля 1966 г. повысился приток термоминеральных вод в скважины, расположенные в зонах тектонических разломов или вблизи их. По группе скважин замедлилось снижение уровня вследствие эксплуатации вод. В некоторых скважинах уровень даже повысился, например с середины 1960 г. до середины 1967 г. по скважине 3 — на 5,5 м, по скважине 7 — на 9,5 м. Одновременно увеличилась температура воды. По скважине 11, напротив, наблюдалось с апреля по октябрь 1966 г. снижение дебита на 6 л/с и температуры на 13°C , что свидетельствует о частичном перекрытии водопроводящих путей.

На востоке Киргизии 5 июля 1970 г. произошло сильное Сарыкамьшское землетрясение с магнитудой 6,8. В эпицентре, близ города Пржевальска, его интенсивность составляла 8—9 баллов. На курорте Джеты-Огуз, в 35 км от эпицентра, судя по данным наблюдений, выполненных контрольно-наблюдательной службой, произошли заметные изменения дебита и температуры минеральных вод. Наиболее резкие изменения отмечены по двум скважинам (рис. 31). После толчка дебит скважины 20 вырос с 0,005 до 0,08 л/с, а температура воды поднялась на 14°С. В скважине 6 дебит увеличился на 0,6 л/с. Интересно отметить, что эти изменения сохранялись и в последующий период, т. е. были необратимыми. По ряду других скважин изменения дебита и температуры были менее значительны, а часть скважин не показала заметной реакции на землетрясение.

Минеральные воды курорта Арзни в Армении испытали очень сильные изменения в результате землетрясения 24 ноября 1976 г. с эпицентром в районе озера Ван в Турции. Это землетрясение, магнитуда которого достигла 7, вызвало разрушения и жертвы во многих населенных пунктах в Турции. Интенсивность землетрясения в районе Арзни, расположенного в 160 км от эпицентра, — до 5 баллов.

Исследования, проведенные гидрогеологами В. А. Арбузовым, И. Л. Берри и С. В. Казаряном [1979], показали, что углекислые минеральные воды Арзни образуются в результате смешения приповерхностных пресных вод с поступающими по трещинам глубинными водами, имеющими повышенную минерализацию и содержащими углекислоту. После землетрясения увеличились уровни, дебиты и минерализация вод. По одной из скважин минерализация выросла с 8,7 до 12—13 г/л, по другой — с 6,8 до 9 г/л. Это объясняется открытием новых трещин, что усилило поступление глубинных вод. В данном случае воздействие землетрясения на минеральные воды Арзни привело к увеличению их запасов. Но бывают, как мы уже отмечали, и иные эффекты землетрясений, когда снижаются запасы минеральных вод или их качество.

К гидрогеологическим эффектам землетрясений относятся изменения не только солевого или газового, но и изотопного состава подземных вод. Изотопные характеристики воды и растворенных в ней веществ могут служить хорошим показателем условий формирования и путей

движения подземных вод. Это справедливо и для природных газов — свободных или растворенных в воде. Немногочисленные пока данные указывают на заметные различия изотопного состава вод и газов до и после землетрясений, что связано с усилением подтока вод и газов иного состава, а также с выделением газов из толщи пород под воздействием сейсмических деформаций.

Н. И. Хитаров, Г. И. Войтов и др. [1972] обнаружили изменения изотопного состава газов после сильных афтершоков Дагестанского землетрясения 1970 г. В составе углерода, входящего в метан, увеличивалось содержание тяжелого изотопа ^{13}C , а в углероде углекислого газа количество этого изотопа уменьшалось. Чл.-кор. АН КиргССР, П. И. Чалов и другие специалисты установили, что изотопный состав урана, растворенного в подземных водах, изменялся после некоторых землетрясений [Чалов и др., 1980].

Землетрясения и добыча нефти

Во время сильных землетрясений изменяются давления в залежах нефти и дебиты нефтяных скважин. Это явление, аналогичное соответствующим изменениям подземных вод, отражает реакцию пористых или трещиноватых пород, насыщенных жидкостью, на землетрясения.

Землетрясение 1952 г. в Южной Калифорнии вызвало резкое, местами десятикратное, повышение давления на устье нефтяных скважин. Последующий спад давления продолжался около двух недель. Выше уже упоминалось о влиянии Старогрозненского землетрясения 1971 г. на нефтяные залежи. После основного толчка или сильных афтершоков наблюдался временный рост пластового давления нефти.

М. Н. Смирнова приводит данные о влиянии некоторых землетрясений Северного Кавказа на добычу нефти. На Новогрозненском месторождении во время землетрясений 1950 и 1955 гг., интенсивность которых достигала 6—7 баллов, а магнитуда — 4,5, происходило увеличение давления и добычи нефти. В наибольшей степени это было заметно по скважинам, расположенным вблизи некоторых разрывов.

Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. отразилось на добыче нефти в радиусе более 200 км от эпицентра. Наблюдалась неодинаковая реакция разных скважин на

землетрясение: в одних дебит повысился, в других — упал. Наибольшая реакция отмечена по скважинам, вскрывающим трещиноватые породы в сводовых частях нефтеносных структур. В одной из скважин Эльдаровского месторождения, расположенного в 220 км от эпицентра, дебит нефти до землетрясения составлял 3300—3400 т/сут. С 14 по 18 мая он снизился до 3056, а затем, после ряда афтершоков, вырос до 4333 т/сут. В некоторых случаях сильные нарушения добычи нефти связаны с повреждением скважин во время землетрясения [Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г., 1980].

МОЖНО ЛИ ПРЕДСКАЗЫВАТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Трудные пути прогноза землетрясений

Вечером 1 ноября 1978 г. в Институт физики Земли АН СССР позвонил заместитель директора Института сейсмологии АН УзССР В. И. Уломов. Он сообщил, что в Ферганской долине в ближайшие часы ожидается сильное землетрясение. На это указывали обнаруженные узбекскими сейсмологами аномалии магнитного поля, прекращение излива воды в одной из скважин вблизи Андижана, изменение состава воды в некоторых скважинах.

Землетрясение произошло в ночь с 1 на 2 ноября в Заалайском хребте, магнитуда его была 6,8, сила достигала 8 баллов. Таким образом, краткосрочный прогноз времени землетрясения подтвердился, однако место его было указано неточно — эпицентр находился в 160 км к югу от Андижана.

Ранее в Институте физики Земли были сделаны долгосрочные прогнозы землетрясений Заалайского хребта. Еще в 1960 г. И. Е. Губин на основе сеймотектонического анализа показал, что в этом районе должны произойти сильные землетрясения. А. А. Никонов обнаружил определенную закономерность перемещения очагов сильных землетрясений вдоль крупных разломов, в частности в данном районе. В 1975 г. он сделал вывод, что до 1990 г. нужно ожидать сильные землетрясения на северном склоне Заалайского хребта, близ пика Ленина. Землетрясение 2 ноября 1978 г. произошло именно здесь.

Предположения о возможности предсказывать землетрясения появились еще несколько столетий назад. Силезский ученый XVI в. М. Фритц, описывая землетрясения, перечислял некоторые признаки, предшествующие толчку, и предлагал использовать их для предсказания землетрясений. В странах, где часты сильные землетрясения, уже давно обратили внимание на предвестники приближающегося толчка. Известный японский сейсмолог Т. Рикитакэ приводит много примеров, когда перед землетрясениями было замечено необычное поведение животных, в особенности рыб, наблюдались странные явления погоды, различные световые эффекты, убывание или помутнение воды в колодцах. Одни случаи, возможно, были связаны с приближающимся землетрясением, другие могли быть простым совпадением.

Первые попытки научного подхода к прогнозу землетрясений были предприняты в начале XX в. Б. Б. Голицыным в России, геофизиками А. Имамурой в Японии и Г. Рейдом в США. Б. Б. Голицын в «Лекциях по сейсмометрии» еще в 1911 г. наметил пути решения задачи предсказания землетрясений: тщательное изучение записей чувствительных сейсмографов до землетрясения, во время толчка и после него; исследование медленных движений земной коры; определение скоростей сейсмических волн до и после землетрясения; выявление связи между землетрясениями и режимом минеральных источников [Голицын, 1960]. Исследования в этих направлениях и сейчас остаются наиболее важными в проблеме сейсмического прогноза.

В СССР после Ашхабадского землетрясения 1948 г. была начата разработка научно-технической базы для сейсмического прогноза. В 1953 г. группой ученых под руководством акад. Г. А. Гамбурцева была составлена программа работ по прогнозу землетрясений. Цель этих работ — усовершенствование методов предсказания места и силы землетрясений, сейсмическое районирование СССР и создание физических предпосылок для прогноза времени землетрясений. Программа намечала изучение сейсмического режима (изменения сейсмичности во времени), медленных колебаний земной коры, электрического и магнитного полей, выявление геолого-геофизических критериев прогноза землетрясений, связей сейсмичности с глубинным строением земной коры.

В начале 60-х годов у некоторых ученых появились сомнения в целесообразности исследований по прогнозу землетрясений и научной обоснованности этой проблемы. В результате прогностические работы были сокращены. Как указывает акад. М. А. Садовский, возглавляющий ныне исследования по прогнозу землетрясений в нашей стране, работы 50-х годов не дали заметного эффекта, что породило определенное разочарование среди многих геофизиков. М. А. Садовский объясняет недостаточную результативность этих работ слабостью технической и методической базы тех лет — малой чувствительностью аппаратуры и отсутствием сведений о физической природе очага землетрясений.

Дальнейшее развитие сейсмологии позволило поднять прогностические исследования на новую ступень. Особенно активизировались они после Ташкентского землетрясения 1966 г. Получили развитие теоретические и экспериментальные работы по физике процессов подготовки землетрясений. Было начато изучение различных предвестников землетрясений в сейсмоактивных областях.

Общую проблему прогноза землетрясений принято расчленять на три части: прогноз места землетрясения, его максимальной силы и времени возникновения.

Прогноз места и максимальной силы землетрясений объединяется сейсмическим районированием территории. Как уже отмечалось, новые разработки советских ученых позволяют предсказать не только места, где возможны землетрясения той или иной интенсивности, но и степень вероятности землетрясений определенной силы. Понятно, что последнее особенно важно для планирования сейсмостойкого строительства: сейсмостойкие здания и сооружения значительно дороже обычных, требуется различный подход к сейсмостойкому строительству в местах, где, например, 8-балльные землетрясения происходят каждые 20—30 лет или где такие толчки возможны раз в 1000 лет.

Несмотря на успехи в области сейсмического районирования, задача определения места и максимальной силы будущих землетрясений остается весьма актуальной. Ведь сильные землетрясения случались и в районах, где не предполагалась высокая сейсмичность (Газлийские 8 апреля и 17 мая 1976 г.). Но особенно сложна эта задача в соединении с прогнозом времени землетрясений. Землетрясение 1978 г. в Заалайском хребте, для которого краткосрочный прогноз оправдался только по времени, не един-

ственный случай такого рода. Дело в том, что многие аномалии, предвещающие землетрясение, наблюдаются на значительном расстоянии (иногда многие сотни километров) от эпицентра. Такое «дальнодействие» предвестников сильно затрудняет прогноз землетрясения, которое может произойти в сотнях километров от места, где отмечена аномалия.

По заблаговременности прогнозов землетрясений различают долгосрочные, краткосрочные и оперативные прогнозы (М. А. Садовский, И. Л. Нерсесов). Для каждого этапа определяются соответствующие профилактические и защитные меры.

Мы уже упоминали о долгосрочных прогнозах, базировавшихся на сеймотектоническом анализе, в частности на изучении закономерностей перемещения очагов сильных землетрясений. С. А. Федотов разработал методику долгосрочного прогноза, основанную на предположении, что сильные землетрясения в том или ином районе подчиняются определенной цикличности. С помощью этой методики в 1965 г. С. А. Федотов составил карту вероятных мест землетрясений с магнитудой 7,75 и выше, которые ожидалась в течение последующих 5-летий у берегов Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии. В период с 1965 г. по февраль 1974 г. этот прогноз оправдался для всех четырех сильнейших землетрясений в данном районе [Поиски предвестников землетрясений, 1976].

Советские геофизики использовали метод алгоритмического распознавания образов для долгосрочного прогноза землетрясений в Тихоокеанском сейсмическом поясе. Был проведен поиск определенных комбинаций геологических, геоморфологических и геофизических характеристик, указывающих на высокую вероятность сильнейших землетрясений в том или ином районе. Выявлены особенности сейсмического режима, которые предшествуют сильнейшим землетрясениям [Гвишиани, Кейлис-Борок, 1980]. Опыт этих исследований показывает, что существенный прогресс в долгосрочном прогнозе может быть достигнут посредством вычислительных методов.

Наконец, важным инструментом долгосрочного прогноза служит непосредственное изучение некоторых аномалий физических и геологических полей, способных развиваться задолго до землетрясения. Разумеется, долгосрочный сейсмический прогноз не может дать высокую

точность. Основное его назначение — выявить районы, где наиболее вероятны сильные землетрясения в ближайшие годы. В таких районах должны быть проведены профилактические меры и поставлены исследования для краткосрочного прогноза.

Исследования для краткосрочного и оперативного прогнозов землетрясения предусматривают детальное изучение сейсмического режима и различного рода аномалий физических и геологических полей. С этой целью в районах, где по долгосрочным прогнозам ожидается землетрясение, разворачивают специальную сеть временных сейсмостанций и пунктов наблюдений за различными предвестниками. Чтобы определить место ожидаемого землетрясения в условиях дальнего действия многих предвестников, наблюдательная сеть должна охватывать обширную область подготовки землетрясения. Предполагают, что в этом случае по изменению величины аномалии можно будет определить участки максимальных концентраций напряжений, где должен произойти сейсмический толчок. Разработка и создание таких наблюдательных сетей требуют длительного времени и больших затрат. Здесь неизбежны серьезные трудности, ибо наши знания о характере тех или иных аномалий, связанных с подготовкой землетрясений, пока очень ограничены. Кроме того, такие аномалии могут маскироваться под влиянием различных естественных и искусственных помех.

Сложны и тернисты пути сейсмического прогноза. Каждый успех, осуществившееся предсказание порождают большие надежды, часто преждевременные. Короткая история исследований по прогнозу знает несколько подъемов и спадов.

Еще четыре-пять лет назад, когда стали внедряться новые перспективные методы, казалось, что конечная цель уже близка. Затем появились трудности. Выяснилось, что ряд землетрясений происходит без четко выраженных предвестников; стали известны случаи, когда после характерных эффектов, которые рассматривались как предвестники, землетрясений не было. Так, комплекс приборов, установленных на одном из разломов в Калифорнии, не показал многих предвестников сильного землетрясения в августе 1979 г. Впрочем, отдельные предвестники, например рост дебита источников и аномальное поведение животных, были обнаружены. В 1979 г. в американском журнале «Science» («Наука») появилась статья

об этом землетрясении под названием «Прогноз землетрясений: уменьшение надежд».

Критический взгляд на прогноз землетрясений высказывал и В. П. Солоненко. Одну из своих статей [1976] по данному вопросу он предваряет эпиграфом — изречением древнекитайского философа Конфуция: «Трудно поймать кошку в темной комнате, особенно если ее там нет». В. П. Солоненко считает, что, поскольку процессы, приводящие к землетрясениям, еще неясны, поиски предвестников землетрясений не могут дать хороших результатов.

Однако эмпирический путь поиска предвестников имеет право на существование и уже приносит свои плоды. За последнее десятилетие достигнут заметный прогресс в понимании процессов подготовки землетрясений, разработаны модели формирования очага. В немалой степени этому способствовали новые данные о предвестниках землетрясений. Наука знает много примеров, когда эмпирическим путем были получены хорошие результаты. В. П. Солоненко, рассматривая некоторые предвестники землетрясений, указывает на то, что они неуниверсальны и недостаточно надежны. Он предостерегает против сенсационности в этом серьезном деле.

Сомнения в возможности прогноза землетрясений часто оправдываются ссылками на состояние метеорологических прогнозов: ведь до сих пор еще не разработаны вполне надежные методы предсказания погоды, особенно с большой заблаговременностью. Однако эффективность метеопрогнозов существенно повышается, чему способствует совершенствование наблюдательных систем и широкое внедрение вычислительной техники. Кроме того, как отмечают М. А. Садовский и И. Л. Нерсесов, сейсмический прогноз имеет определенные преимущества перед метеорологическим, ибо процессы подготовки землетрясений развиваются в земной коре значительно медленнее, чем атмосферные, подверженные быстрым изменениям.

Поскольку длительные процессы подготовки землетрясений сопровождаются геофизическими и геохимическими аномалиями, успешное решение задачи сейсмического прогноза зависит от того, как скоро мы научимся распознавать эти аномалии, определять их связь с силой и местом будущего толчка, понимать, почему у разных землетрясений предвестники различаются комплексом и характеристикой признаков.

В последнее десятилетие исследования по проблеме прогноза землетрясений развиваются особенно интенсивно. Проблема эта входит в число важнейших направлений наук о Земле.

Обширные работы были развернуты на Гармском прогностическом полигоне Института физики Земли АН СССР в Таджикистане [Садовский, Нерсесов, 1978]. Полигон расположен в высокосейсмичном районе на сочленении Тянь-Шаня и Памира. Здесь с помощью густой сети сейсмостанций детально изучается сейсмический режим, кроме того, проводятся наблюдения за различными предвестниками землетрясений: деформациями земной коры, изменением электрических и магнитных полей и др. Впервые в мировой практике на этом полигоне использован магнитогидродинамический генератор для глубинного электрического зондирования земной коры в целях прогноза землетрясений. Получены важные результаты, которые оказали влияние на развитие прогностических исследований не только в нашей стране, но и за рубежом.

К прогностическим исследованиям сейчас приступили во всех союзных республиках, расположенных в сейсмоактивных зонах. Вступил в строй ряд геодинимических полигонов, где организованы детальное изучение сейсмического режима и поиски предвестников землетрясений. Подобные работы ведутся и в районах, где установлены или ожидаются проявления возбужденной сейсмичности (Нурекское, Чиркейское и другие водохранилища).

За рубежом работы по сейсмическому прогнозу в широких масштабах проводятся в Японии, США и некоторых других странах. В Японии предсказание землетрясений долгое время было уделом различного рода прорицателей и гадалок, а возможность научного прогноза получила признание сравнительно недавно. Рикитакэ [1979] пишет, что до 1960 г., несмотря на частые разрушительные землетрясения, в Японии не было серьезных исследований по прогнозу землетрясений, а 30 лет назад сейсмологам даже не полагалось говорить о прогнозе землетрясений.

В настоящее время в Японии исследованиями по прогнозу землетрясений занимаются Японское метеорологическое агентство, Сейсмологический институт, Институт географических исследований. Создан координационный комитет по прогнозу землетрясений, который выделяет районы с наиболее реальной опасностью сильных земле-

трясений в ближайшие годы. К числу таких районов относится Канто. В комплекс прогностических исследований, проводимых японскими специалистами, входят высокоточные геодезические работы, наблюдения за высотой отдельных пунктов вдоль береговой линии относительно уровня моря, измерения деформации и наклонов земной поверхности, детальное изучение сейсмичности, электромагнитных полей, определение скоростей сейсмических волн и др. Как сообщает Рикитакэ, за 10 лет ассигнования по программе прогноза землетрясений выросли в Японии почти в 10 раз и превысили в 1975 г. 2 млрд. иен.

В США в 1965 г. группой ведущих сейсмологов была составлена 10-летняя программа исследований по прогнозу землетрясений и выработке некоторых мер предотвращения сейсмической опасности. Основные исследования развернулись в Калифорнии, в районе разлома Сан-Андреас, где имеется опасность повторения столь разрушительного землетрясения, как в 1906 г. Американская программа была пересмотрена в 1973 г. Помимо поисков различных предвестников, она включает исследования по сейсмическому районированию, контролю над землетрясениями, инженерной сейсмологии и др. В последние годы успешно развивалось научное сотрудничество советских и американских сейсмологов, выполнены некоторые совместные работы.

В Китае, где катастрофические землетрясения наносят огромный ущерб, также исследуются различные предвестники землетрясений. Так, был дан прогноз Хайченского землетрясения 4 февраля 1975 г. в провинции Ляонин и проведена эвакуация населения. Однако следующее катастрофическое землетрясение 28 июля 1976 г. предсказать не удалось. Оно произошло в провинции Хэбэй, в районе Таншаня — крупного промышленного центра, расположенного в 160 км восточнее Пекина, и, по данным зарубежной печати, унесло 655 тыс. жизней.

В 1976 г. в городе Страсбурге было организовано Бюро европейского сейсмического прогноза. Разработана программа создания системы предсказания землетрясений в Европе, предусматривается оборудовать в сейсмоактивных районах около 150 станций для определения предвестников. В целях прогноза будет использоваться информация, получаемая с помощью искусственных спутников Земли.

Ранее уже отмечалось, что в любом районе, даже в зо-

нах высокой сейсмичности, сильные землетрясения происходят довольно редко. Поэтому проверка эффективности систем прогноза землетрясений требует длительного времени. В решении проблемы сейсмического прогноза обмен опытом, идеями и международное сотрудничество особенно важны. Об этом говорилось на Международном симпозиуме по прогнозированию землетрясений, организованном ЮНЕСКО в Париже в апреле 1979 г. Ученые более 50 стран обсуждали проблему всесторонне: предвестники и методы прогнозирования землетрясений, теоретические и экспериментальные исследования физических процессов подготовки землетрясений, передача прогнозов и предупреждений, реакция отдельных лиц и групп, а также учреждений на прогнозы землетрясений, экономические вопросы прогнозирования землетрясений.

Внимание, которое привлечено в настоящее время к экономическим, психологическим и социальным аспектам прогноза землетрясений, свидетельствует, что проблема эта вступает в новую стадию, когда необходимо предусмотреть разнообразные последствия, связанные с практическим осуществлением прогноза, и выработать соответствующие меры. Предполагают, что здесь возникнут немалые трудности: объявление тревоги в густонаселенном районе может вызвать панику, дезорганизацию транспорта и связи, отрицательное влияние на хозяйственную деятельность. По мнению зарубежных специалистов, ошибочное предсказание землетрясения способно привести к более тяжелым последствиям для населения, чем само землетрясение. Уже известны случаи, когда обнародованный прогноз землетрясения, который не оправдался (например, в 1978 г. в одном из районов Мексики), нанес большой ущерб. Поэтому усилия сейсмологов и ученых ряда других специальностей направлены на детальное исследование процессов подготовки и предвестников землетрясений, на разработку методов достаточно надежного сейсмического прогноза.

Предвестники землетрясений

Прежде чем перейти к описанию гидрогеологических эффектов, предшествующих землетрясениям, необходимо кратко остановиться на других предвестниках землетрясений. В настоящее время известно несколько десятков признаков, рассматриваемых в качестве предвестников

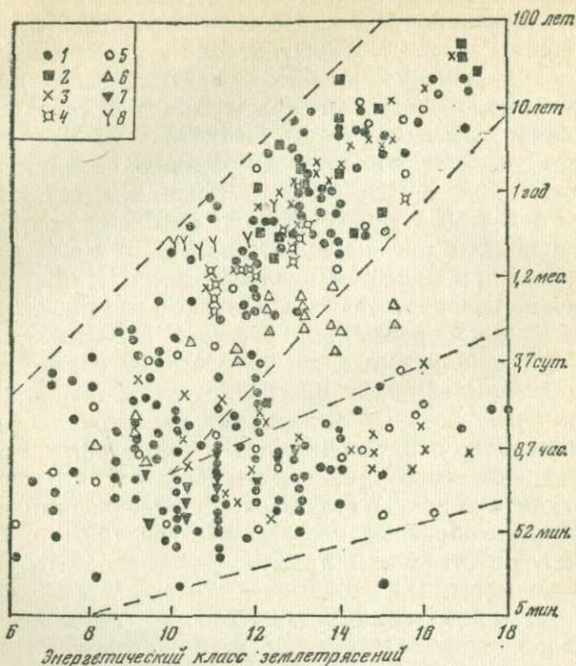


Рис. 32. График предвестников землетрясений (по Г. А. Соболеву)

На оси ординат показаны периоды времени от появления предвестника до землетрясения. 1—8 — группы предвестников

землетрясений. По времени проявления предвестников до толчка их разделяют на две группы — долгосрочные (годы) и краткосрочные (часы, дни). Советскими геофизиками В. И. Мячкиным и С. И. Зубковым установлена зависимость времени проявления предвестников от энергии землетрясения: с возрастанием энергетического класса увеличивается заблаговременность проявления предвестников. Это соответствует представлениям о подготовке землетрясений: подготовка сильного землетрясения длится многие годы, в течение которых проявляются определенные аномалии-предвестники; подготовка слабого землетрясения и сопутствующие ей аномалии укладываются в меньшие промежутки времени. Однако некоторые предвестники наблюдаются только в течение короткого периода перед землетрясением. На рис. 32 хорошо видны две группы предвестников — долгосрочные и краткосрочные,

Рикитаке разделяет все предвестники землетрясений на три класса: 1 — предвестники, характеризующиеся различным временем проявления в зависимости от магнитуды; 2 и 3 — краткосрочные предвестники, для которых отсутствует зависимость времени проявления от магнитуды, среднее время проявления этих предвестников до толчка соответственно 2,4 час. и 4,5 сут.

По характеру аномального эффекта различают несколько групп предвестников землетрясений. К главным из них относятся: особенности сейсмического режима, вариации скоростей сейсмических волн, электромагнитные, деформационные, флюидные, биологические. Предвестниками могут также служить аномальные изменения гравитационного и теплового полей, радиоактивного излучения и др.

Мы уже упоминали об использовании для прогностических целей некоторых особенностей сейсмического режима — миграции очагов сильных землетрясений, сейсмических циклов и др. В качестве предвестников сильных землетрясений рассматривают также распределение в пространстве и времени слабых толчков и так называемое сейсмическое затишье — резкое сокращение количества слабых землетрясений в районе, где назревает сильный толчок. Разрабатывается и ряд других методов анализа сейсмического режима для выделения предвестников сильных землетрясений.

Сейсмическое затишье было обнаружено перед сравнительно сильными землетрясениями на Гармском полигоне. Сейсмологи из Индии и США Кхатри и Уайс изучали сейсмический режим района Ассама в Северо-Восточной Индии за последние 150 лет. Они установили, что перед всеми сильнейшими землетрясениями наблюдалось сейсмическое затишье, причем продолжительность его зависела от магнитуды последующего землетрясения. Перед толчком с магнитудой 6,8 затишье длилось семь лет, а катастрофическому землетрясению с магнитудой 8,8 предшествовало затишье в течение 31 года.

Сейсмическое затишье было отмечено перед сильными землетрясениями в различных сейсмоактивных зонах. С 1974 г. японские сейсмологи проводят усиленные наблюдения в районе Токай (в центральной части острова Хонсю), где сейсмическое затишье наряду с некоторыми другими признаками указывает на вероятность сильного землетрясения.

Большие надежды сейсмологов связаны с изучением микроземлетрясений — очень слабых толчков. С этой целью используют высокочувствительную аппаратуру. Чтобы избежать помех, затрудняющих регистрацию микроземлетрясений, сейсмометры (а также некоторые другие приборы) помещают в глубокие скважины. Подобные наблюдения ведутся в нашей стране и в Японии. Установлена зависимость между серией микроземлетрясений под дном Токийского залива и последовавшими через несколько недель толчками в районе Токио.

Известен ряд изменений характеристик сейсмических волн перед сильными землетрясениями, что связано с разуплотнением пород в зоне очага назревающего землетрясения. Чтобы обнаружить такие изменения, изучают распространение волн от очагов слабых землетрясений и искусственных взрывов. Чаще всего в качестве предвестников используются вариации скоростей сейсмических волн.

Еще в начале 60-х годов руководитель Гармского полигона И. Л. Нерсесов и геофизик А. Н. Семенов обнаружили, что скорости волн, распространяющихся от слабых землетрясений, изменяются до и после сравнительно сильных толчков. Отношения скоростей продольных к скоростям поперечных волн существенно уменьшались перед такими толчками. Это явление было подтверждено наблюдениями во многих других районах и за рубежом получило название «Гарм-эффект».

Интересные особенности отношений сейсмических скоростей были установлены советскими геофизиками Г. А. Соболевым и Л. Б. Славиной на Камчатке. Участки с аномальными показателями этих отношений здесь со временем перемещаются и имеют протяженность до 100 км, пониженная величина отношения наблюдается длительное время (до четырех лет), а ее минимум наступает за несколько месяцев до сильного землетрясения. По данным японских сейсмологов, изменения отношений сейсмических скоростей достигают 40% и отмечаются за несколько лет перед сильными землетрясениями. Известен, однако, ряд случаев (в Японии, Канаде, США и других странах), когда землетрясения не предвараются заметными вариациями отношений сейсмических скоростей.

К группе электромагнитных предвестников относится ряд показателей, которые определяют по наблюдениям естественных электрических и магнитных полей либо при

искусственном воздействии (измерение электрического сопротивления горного массива при пропускании тока). При подготовке землетрясения возрастают механические напряжения и начинаются деформации горных пород. Электрические и магнитные свойства пород изменяются под воздействием пьезоэлектрического и пьезомагнитного эффектов — под давлением в породе возникает электрический ток или намагниченность. Причиной электризации могут служить также трение, перемещение подземных вод в тонких трещинах и порах и другие процессы.

В 1968 г. советский геофизик О. М. Барсуков обнаружил, что удельное электрическое сопротивление массивов горных пород изменяется перед землетрясениями. Результаты наблюдений на Гармском полигоне показали, что электросопротивление пород существенно снижается за несколько месяцев до толчка. Время, в течение которого проявляется аномалия электросопротивления, увеличивается с возрастанием энергии землетрясения. Явление это в дальнейшем было подтверждено многими наблюдениями в нашей стране и за рубежом. Работа О. М. Барсукова признана научным открытием*.

Возможности электрического зондирования для изучения процессов подготовки землетрясений значительно расширяются при использовании мощных импульсных источников тока, позволяющих проводить зондирование на большую глубину. В результате применения с этой целью магнитогидродинамического генератора на Гармском полигоне обнаружены существенные (до 30%) изменения электросопротивления в период сильных землетрясений [Волков и др., 1980].

Г. А. Соболев и др. наблюдали изменения естественного электрического поля (земных токов) перед землетрясениями на Камчатке. Известны многие примеры возмущений геомагнитного поля перед сильными землетрясениями. Резкая магнитная аномалия была отмечена перед Аляскинским землетрясением 1964 г. На Гармском полигоне некоторым землетрясениям средней силы предшествовали аномалии магнитного поля. Сильные вариации геомагнитного поля наблюдались узбекскими геофизиками за несколько дней до землетрясения в Заалайском хребте 2 ноября 1978 г. (рис. 33). Вариации эти

* Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1979, № 43.

были обнаружены по разности показаний приборов между Ташкентом и Андижаном, на значительном расстоянии от эпицентра землетрясения. В отдельных случаях перед сильными землетрясениями магнитные аномалии отмечены не были.

Сильным землетрясениям нередко сопутствуют световые эффекты. Очевидцы наблюдали такие эффекты непосредственно перед Ташкентским землетрясением 26 апреля 1966 г. За несколько секунд до толчка в эпицентре раздался сильный гул и возникла ослепительная вспышка белого света [Уломов, 1971]. Подобные проявления атмосферного электричества японские ученые связывают с выделением инертного газа радона в почвенном воздухе.

К деформационным предвестникам относятся различного рода деформации поверхности Земли и земной коры. Посредством периодических высокоточных триангуляционных и нивелирных съемок определяют горизонтальные и вертикальные смещения поверхности Земли. Непрерывные измерения движений земной коры на небольших участках производят с помощью наклономеров, регистрирующих слабые изменения углов наклона поверхности Земли, и деформографов, измеряющих сжатия и растяжения. Деформации земной коры изучаются давно, и уже накоплены многие материалы, представляющие интерес для прогноза землетрясений.

В Ташкенте были выявлены аномальные наклоны поверхности Земли примерно за месяц до землетрясения 1966 г. На наблюдательной станции Талгар близ Алматы установлен аномальный ход деформаций перед землетрясением 4 мая 1965 г. с магнитудой 6 в Южном Тянь-Шане. За две недели до толчка началось сжатие породы, которое через девять дней сменилось растяжением (рис. 34). Смена знака деформации нередко служит характерным предвестником землетрясения. Чл.-кор. АН СССР Ю. Д. Буланже и др. по данным повторных нивелирований на Алма-Атинском полигоне определили резкое опускание (на 60 мм) земной поверхности в конце июня 1970 г., что связывают с Сарыкамышским землетрясением 5 июля 1970 г.

Деформации земной коры и поверхности Земли не всегда коррелируются с землетрясениями: ведь современные движения земной коры происходят и в несейсмичных областях. Длительные дискуссии вызывает крупное поднятие земной поверхности, уже около 20 лет наблюдае-

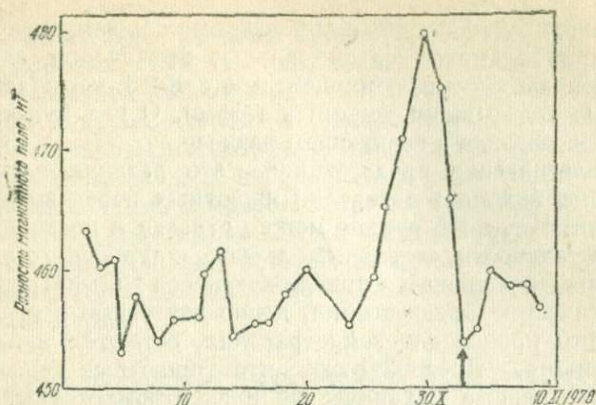


Рис. 33. Изменение разности показателей геомагнитного поля между пунктами Андижан и Ташкент перед землетрясением в Заалайском хребте (по Г. А. Мавлянову и др.)

Стрелкой отмечен момент землетрясения

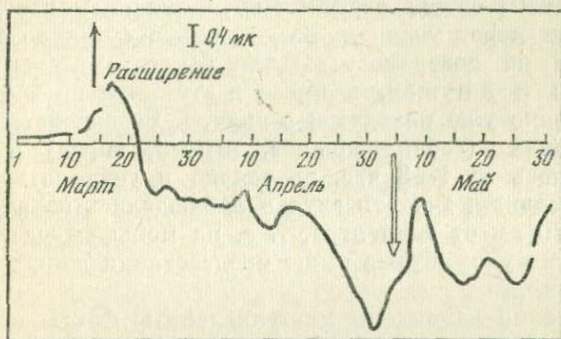


Рис. 34. Ход деформаций на станции Талгар (по Л. А. Латышиной и Р. М. Кармалеевой)

Вольшая стрелка — землетрясение 4 мая 1965 г. на Южном Тянь-Шане

ное в Южной Калифорнии. Площадь поднятия, расположенного близ города Палмдейл, 60 тыс. км², максимальная высота около 40 см. В 1971 г. здесь произошло землетрясение с магнитудой 6,7, однако подъем земной поверхности продолжался и в последующие годы. Некоторые американские сейсмологи ставят под сомнение связь этого аномального поднятия с землетрясениями.

В группу флюидных предвестников землетрясений можно объединить все аномальные проявления, связанные с подвижными компонентами земной коры (флюидами) — подземными водами и газами. О них будет подробно рассказано в следующем разделе.

Биологические предвестники — это различные проявления аномального поведения животных перед землетрясениями. К данной группе можно отнести и повышенную чувствительность отдельных людей, ощущающих по отдельным признакам приближающееся землетрясение. Биологические предвестники, давно известные в странах, где часто происходят землетрясения, остаются наименее изученными. Предполагают, что животные способны ощущать слабые механические и электромагнитные воздействия перед землетрясением. Возможно, что животные улавливают и определенные изменения химического состава воды или атмосферы, предшествующие толчку.

При обследовании плейстосейстовой области землетрясения 2 ноября 1978 г. в Заалайском хребте А. А. Никонов [1980] собрал сведения об аномальном поведении животных перед толчком. За несколько суток до землетрясения на поверхности Земли были замечены змеи, ящерицы и лягушки, которые в этот холодный период года обычно уже находятся в спячке. Беспокорство млекопитающих (собак, ишаков, мышей, коров) и птиц проявлялось за 1—8 час. до толчка и усилилось перед самым толчком. Все эти случаи наблюдались на расстоянии до 70 км от эпицентра, т. е. на меньшем удалении, чем другие упомянутые выше предвестники данного землетрясения.

В Японии накоплены многочисленные факты необычного поведения рыб перед землетрясениями. Японский ихтиолог Суэхиро в своей книге «Рыбы и землетрясения» пишет, что перед землетрясениями у берегов часто появляются усатая треска и другие виды глубоководных рыб.

Перед разрушительными землетрясениями в Китае, в частности перед Таншаньским в 1976 г., наблюдалось сильное беспокойство домашних и диких животных: покидали стойла лошади и мулы, крысы выходили из нор и т. д. Зарубежные специалисты отмечают, что случаи аномального поведения животных локализуются в определенных участках близ сейсмоактивных разломов.

Биологические предвестники относятся к категории краткосрочных. Обычно они наблюдаются за несколько часов или суток до землетрясения. Отмечено, что количество случаев аномального поведения животных возрастает с увеличением магнитуды последующего толчка. В настоящее время в ряде стран начаты научные исследования биологических предвестников: изучаются воздействия физических полей на животных, инструктируются наблюдатели — добровольцы, которые ежедневно регистрируют поведение животных и отмечают различную степень отклонения от нормы.

ФЛЮИДНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Подготовка землетрясения, которая сопровождается изменением напряженно-деформированного состояния горных пород, должна вызывать реакцию флюидов — вод и газов, заполняющих поры и трещины в породах. Эта реакция проявляется в виде гидрогеодинамических или гидрогеохимических эффектов. К первым относятся изменения уровня, давления или дебита подземных вод, ко вторым — изменения состава подземных вод и газов.

В группу флюидных предвестников следует включить также температурные аномалии перед землетрясениями, ибо наиболее интенсивный перенос тепла в земной коре связан с движением флюидов. Кроме того, глубинные температуры обычно определяют посредством геотермических измерений в скважинах, заполненных жидкостью.

Систематическое изучение флюидных предвестников началось недавно, в конце 1960-х годов. Однако еще в 1911 г. Б. Б. Голицын обратил внимание на изменения режима минеральных источников перед землетрясениями. Ссылаясь на исследования Ф. Мольденгауэра в Боржоме, Б. Б. Голицын отмечал, что резкие изменения режима пульсирующего источника во многих случаях предшествуют землетрясениям. «Возможно, что со временем обнаружатся и другие явления, имеющие связь с возникновением землетрясений, как, например, изменение количества того или иного газа, выделяемого в различных местностях из недр Земли, и т. п.» [1960, с. 71].

Таким образом, известный русский сейсмолог впервые указал на возможность использования флюидных предвестников землетрясений. Б. Б. Голицын разработал приборы для измерения пульсации источников. По его

предложению сейсмическая комиссия постановила начать наблюдения над температурой, пульсацией и дебитом минеральных источников в Боржоми и Ессентуках совместно с сейсмическими работами. Однако эти исследования в дореволюционной России не получили широкого развития.

Такова предыстория изучения флюидных предвестников землетрясений. Интерес, проявившийся к этому вопросу в середине 1970-х годов, побудил японских ученых обратить внимание на легенды и летописные источники. Оказалось, что издавна была известна связь некоторых изменений подземных вод с предстоящим землетрясением. Однако первые научные исследования флюидных предвестников были предприняты в России в начале XX в. и возродились на современной основе после Ташкентского землетрясения 1966 г.

Нужно подчеркнуть, что имеются существенные различия между гидрогеологическими эффектами, сопутствующими и предшествующими землетрясениям. Различия эти обусловлены особенностями длительных процессов подготовки землетрясения, когда постепенно изменяется напряженно-деформированное состояние среды, и быстрой, практически мгновенной разрядки напряжений — сейсмического толчка. Данные особенности определяют разную реакцию подземных вод на подготовку землетрясения и толчок. И если природа основных гидрогеологических эффектов, вызванных землетрясениями, изучается давно и уже достаточно ясна, то исследования таких эффектов, предшествующих землетрясениям, пока находятся в начальной стадии.

Флюидные предвестники землетрясений чаще всего определяют посредством наблюдений за подземными водами и растворенными в них газами. В отдельных случаях используются также наблюдения за газами, содержащимися в почвенном воздухе. Подземные воды реагируют на изменения внешних условий (давления и температуры водовмещающих пород, атмосферного давления и др.), они также подвержены влиянию различных видов деятельности человека. Благодаря подобной чувствительности подземных вод они являются хорошими индикаторами процессов подготовки землетрясений. Вместе с тем изменения подземных вод под влиянием различных внешних факторов затрудняют поиски предвестников землетрясений.

Как изменяются во времени подземные воды

Чтобы использовать подземные воды для водоснабжения и других целей, необходимо знать особенности их режима — изменения уровней, дебитов, химического состава и других показателей. Мы уже касались выше таких изменений подземных вод, их влияния на сейсмическую активность и интенсивность землетрясений.

Режим подземных вод формируется под влиянием ряда факторов — естественных и искусственных. Инфильтрация атмосферных осадков и талых вод приводит к повышению уровня подземных вод. Оно наиболее значительно для неглубоких — грунтовых вод. С увеличением глубины залегания водоносного горизонта амплитуда колебаний уровня заметно сокращается. Для грунтовых вод характерны весенний и осенний максимумы уровня. Летние осадки (из-за сильного испарения) и зимние (вследствие промерзания почвы) не вызывают большой инфильтрации. Инфильтрация осадков сопровождается снижением минерализации неглубоко залегающих вод.

При повышении атмосферного давления уровень воды в скважинах и колодцах снижается, уменьшается также дегазация вод, содержащих растворенные газы. Обратная картина наблюдается при падении атмосферного давления.

Подземные воды неглубокого залегания тесно связаны с поверхностными водами, и в речных долинах уровень подземных вод зависит от уровня реки. В прибрежной зоне морей, испытывающих большие приливы, уровень подземных вод подвергается циклическим колебаниям.

Земные приливы влияют на уровень, дебит и химический состав подземных вод (см. рис. 29). Приливные деформации приводят к циклическим колебаниям уровня подземных вод. Такие колебания происходят с периодами 0,5; 1; 14 и 28 сут. Имеются и более длительные периоды.

При изучении химического режима карстовых вод Кунгурской ледяной пещеры гидрогеологи Ю. А. Ежов и А. В. Лукин обнаружили суточные колебания химического состава вод, величина которых достигает 5—10% от величины общей минерализации. Чл.-кор. АН СССР А. И. Тугаринов и геофизик С. С. Сардаров отмечали

полусуточную изменчивость выделения гелия и аргона в газовых пробах, отобранных из скважин в Дагестане.

Подземные воды очень подвержены различным техногенным воздействиям: эксплуатация подземных вод, мелиоративные работы, дренажи и др. Эксплуатация подземных вод, а также нефти и газа, водоотлив на шахтах и рудниках приводят к значительному понижению уровней и расходов подземных вод. Одновременно изменяется химический и газовый состав вод. Гидрогеолог А. М. Крысенко, изучавший режим Сочинского месторождения минеральных вод за 20 лет его эксплуатации, установил, что в Мацесте в одной из скважин с 1951 по 1968 г. общая минерализация воды снизилась с 62 до 5 г/л, а содержание сероводорода — с 107 до 92 мг/л. Фильтрация поливных или сточных вод вызывает значительное повышение уровня грунтовых и неглубоких напорных вод. При этом резко усиливается испарение грунтовых вод и повышается их минерализация.

Мы перечислили лишь самые основные факторы, влияющие на режим подземных вод. К таким факторам относится воздействие процессов подготовки землетрясения и самого сейсмического толчка.

Изучение режима подземных вод — один из традиционных разделов гидрогеологии. Его главные задачи связаны с потребностями водоснабжения, мелиорации, строительства. Поэтому гидрогеологов интересовали прежде всего сезонные и многолетние изменения подземных вод, защита их от загрязнения, отрицательные последствия эксплуатации подземных вод, орошения и т. д. Поиски флюидных предвестников землетрясений выдвигают новые требования к изучению режима подземных вод: необходимо определять причины кратковременных и часто небольших вариаций показателей режима, которые до последнего времени не имели практического значения и поэтому не привлекали внимания гидрогеологов. Ведь задача поисков флюидных предвестников сводится к тому, чтобы среди многообразных изменений подземных вод, вызванных различными процессами, выявить эффект, обусловленный подготовкой землетрясения.

Изменения во времени ряда характеристик подземных вод представляют интерес для изучения не только флюидных, но также электромагнитных и деформационных предвестников землетрясений.

Фильтрация подземных вод в тонких порах и трещинах вызывает разность электрических потенциалов. При этом изменяется и магнитное поле. Таким образом, электромагнитные явления в горных породах зависят от скорости фильтрации и величины солености подземных вод.

Связь геомагнитных вариаций с режимом поверхностных и подземных вод была обнаружена на Гармском полигоне советскими геофизиками Ю. П. Сковородкиным и Л. С. Безуглой. Уровень подземных вод в аллювиальных отложениях долины реки Сурхоб изменяется в зависимости от уровня реки. Сезонные изменения уровней вызывают локальные геомагнитные вариации (рис. 35), что объясняется усиленной фильтрацией подземных вод.

Другой предвестник землетрясений — изменение электрического сопротивления горных пород зависит от распределения и минерализации воды, насыщающей породу. Как отмечает О. М. Барсуков, впервые предложивший использовать этот

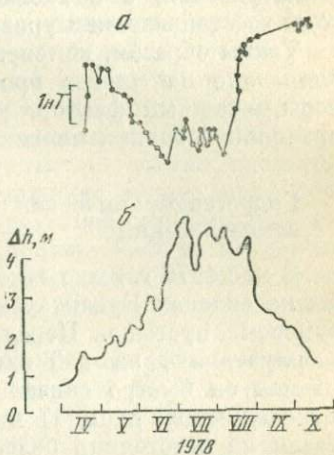


Рис. 35. Вариации геомагнитного поля по пункту наблюдений 2589 (а) и изменения уровня реки Сурхоб (б) на Гармском полигоне (по Ю. П. Сковородкину и Л. С. Безуглой)

предвестник, наблюдаемые вариации электропроводности пород перед землетрясением связаны с образованием трещин, заполненных водой и создающих токопроводящие каналы. Сопротивление сухой породы на несколько порядков больше, чем той же породы, насыщенной водой, причем с повышением минерализации воды сопротивление снижается. Следовательно, изменения уровня и минерализации подземных вод сказываются на сопротивлении горных пород.

Выше уже приводились примеры оседания земной поверхности под влиянием водопонижения и эксплуатации нефтегазовых месторождений. Деформации земной поверхности происходят и под влиянием естественных колеба-

ний уровней или давлений подземных вод. Поэтому результаты высокоточных геодезических, наклономерных и деформографических измерений могут различаться в зависимости от изменений уровня подземных вод, связанных с выпадением осадков или другими причинами. Советский геофизик Л. А. Латынина обнаружила четкую корреляционную зависимость между медленными деформациями земной коры и атмосферными осадками.

Японские специалисты сделали прогноз о возможности землетрясения в районе Кавасаки, где по данным густой сети нивелирных измерений обнаружено поднятие земной поверхности на 1—3 см. Было, однако, высказано предположение, что поднятие это связано не с подготовкой землетрясения, а с наблюдающимся здесь в последние годы восстановлением уровня подземных вод.

Таким образом, изменения режима подземных вод, влияющие на многие процессы в верхней зоне земной коры, — важный фактор, учет которого необходим для правильной оценки многих предвестников землетрясений.

Гидрогеодинамические предвестники землетрясений

В мае 1976 г. было закончено бурение водяной скважины на склонах Букантауского горного массива в Кызылкумской пустыне. Перед тем как сдать скважину в эксплуатацию, на ней измеряли уровень воды. Вечером 16 мая он быстро снизился и скважина была осушена. На следующий день, 17 мая, произошло землетрясение в Газли на расстоянии более 200 км к югу от скважины. Вода появилась в скважине через 26 час. после толчка, а спустя сутки уровень достиг первоначального положения. Ташкентские гидрогеологи Р. Ишанкулов и Г. П. Калугин, описавшие этот случай, считают, что снижение уровня воды перед Газлийским землетрясением вызвано растяжением земной коры в трещиноватой зоне, где пробурена скважина.

В настоящее время уже известно значительное количество проявлений гидрогеодинамических эффектов перед землетрясениями в ряде сейсмоактивных регионов. Эти эффекты, предвещающие землетрясения с различной заблаговременностью, могут служить как краткосрочными, так и долгосрочными предвестниками.

Краткосрочные гидрогеодинамические предвестники наблюдаются обычно за несколько часов или суток до землетрясения. В Дагестанском филиале АН СССР получены интересные данные об изменении дебита и уровня подземных вод перед естественными и возбужденными землетрясениями (Д. Г. Осика, Ш. Г. Идармачев и др.). За один—три дня до Дагестанского землетрясения 14 мая 1970 г. резко снизился дебит воды, поступающей из скважины в поселке Гаша, расположенном в 100 км от эпицентра. На берегу Чиркейского водохранилища проводились наблюдения в скважине, пробуренной для изучения режима подземных вод. Обычно уровень воды в скважине изменялся синхронно с уровнем водохранилища. Но перед местными землетрясениями происходило снижение уровня воды в скважине, не зависящее от уровня водохранилища. Амплитуда таких колебаний достигала 2,5 м.

Наблюдения, проводившиеся в Узбекистане, позволили установить гидрогеодинамические эффекты, предшествующие некоторым сильным землетрясениям. По скважине в поселке Улугбек близ Ташкента в течение последних лет отмечается постепенное снижение напора воды, обусловленное интенсивной эксплуатацией минеральных вод. Однако в сентябре 1976 г. и в июне 1977 г., по данным чл.-кор. АН УзССР А. Н. Султанходжаева и гидрогеолога И. Г. Чернова, падение напоров в этой скважине приостановилось, напоры увеличивались на 0,1—0,2 ат. Эти аномалии рассматриваются как предвестники землетрясений. Первое землетрясение с магнитудой 6,3 произошло 31 января 1977 г. в районе Исфары, в 210 км от скважины, второе — 6 декабря 1977 г., в 25 км от скважины — имело магнитуду 5. В обоих случаях аномалии появлялись за 4,5 месяца до землетрясения, т. е. раньше, чем обычно наблюдаются краткосрочные предвестники.

В предыдущем разделе упоминалось о прогнозе землетрясения 2 ноября 1978 г. в Заалайском хребте, который был дан узбекскими учеными. Одним из основных предвестников послужило прекращение излива воды из скважины в Ходжабаде (в 20 км к юго-востоку от Андижана). Дебит ее в течение нескольких месяцев, предшествовавших землетрясению, составлял 10—14 л/с и за несколько дней до толчка начал резко сокращаться. 26 октября излив воды прекратился, а после землетрясения вновь восстановился.

Систематическое изучение гидрогеодинамических предвестников землетрясений проводится в последние годы на южных Курильских островах и Сахалине под руководством геофизика Ф. И. Монахова. Наблюдения ведутся по скважинам на островах Кунашир, Итуруп и в южной части Сахалина. Эта система скважин образует треугольник со сторонами 230, 420 и 450 км. В дальнейшем к ней была подключена и скважина на севере Сахалина.

Курильско-Сахалинский полигон представляет особый интерес для разработки методов прогноза землетрясений, ибо сильные землетрясения здесь бывают часто и в короткий период может быть накоплен большой опытный материал. Но высокая сейсмичность этого региона может служить помехой, ибо не всегда удается определить, к какому землетрясению относится тот или иной предвещающий эффект.

Ф. И. Монахов установил, что колебания уровня воды в трех кунаширских скважинах очень близки и проявляются обычно за три—семь дней до землетрясения в виде снижения уровня и последующего подъема, в начале которого происходит толчок. Аналогичный эффект — снижение уровня воды за несколько суток до землетрясений — отмечен по сахалинской и итурупской скважинам. В тех случаях, когда происходил не одиночный толчок, а серия сильных землетрясений, наблюдалось более длительное снижение уровня воды; подъем его начинался лишь в конце серии землетрясений. Подобная аномалия зафиксирована в марте 1978 г., когда в этом регионе было девять сильных толчков.

В июне — октябре 1978 г. по кунаширским, итурупской и сахалинской скважинам отмечались предвестники землетрясений, эпицентры которых расположены в Тихом океане и Охотском море (рис. 36). Для двух землетрясений — 15 сентября и 11 октября — по гидрогеодинамическим предвестникам Ф. И. Монахов дал прогноз, который оправдался.

Гидрогеодинамические предвестники землетрясений на Курильско-Сахалинском полигоне наблюдались многократно. Интересная особенность этих наблюдений — однородная форма сигнала перед землетрясением с разной амплитудой и глубиной очага и появление предвестников на больших (до 1000 км) расстояниях от будущего эпицентра.

На Ленинабадском прогностическом полигоне Института физики Земли АН СССР в западной части Ферганской долины изучение гидрогеодинамических предвестников землетрясений проводится по группе скважин глубиной от 100 м до 4 км. Скважины эти оборудованы чувствительными датчиками уровня, позволяющими автоматически регистрировать колебания уровня с амплитудой 0,5—1 мм. Здесь по двум скважинам были обнаружены аномальные изменения уровня перед Назарбекским землетрясением. Это землетрясение с эпицентром в 30 км западнее Ташкента и магнитудой 5,5 произошло вечером 11 декабря 1980 г. и сопровождалось многими афтершоками.

По скважине, расположенной близ поселка Ашт, на расстоянии 180 км от эпицентра, за несколько часов до толчка резко снизился уровень воды — на 3,5 см (рис. 37). Вскоре после толчка уровень восстановился, и в последующие дни были отмечены колебания уровня с меньшей амплитудой. По другой скважине Ленинабадского полигона аномальное снижение уровня началось за полтора месяца до толчка, а через месяц после землетрясения уровень восстановился.

За рубежом краткосрочные гидрогеодинамические предвестники были использованы для прогноза Хайченского землетрясения на северо-востоке Китая. Это разрушительное землетрясение произошло вечером 4 февраля 1975 г. в провинции Ляонин. Магнитуда его была 7,3.

Наблюдения проводились по нескольким скважинам. По скважине в Таньганци, в 40 км от эпицентра, уровень воды с 28 по 30 января понизился на 10 см, а к 4 февраля восстановился. Толчок сопровождался резким подъемом уровня — на 1 м. В этом же районе в течение нескольких дней до землетрясения прекращался излив горячих минеральных вод из другой скважины. По двум неглубоким скважинам, расположенным в 145 км от эпицентра, наблюдались аномальные изменения уровня в течение пяти дней до землетрясения. В нескольких неглубоких скважинах и колодцах близ эпицентра, где уровень воды был ниже поверхности Земли, утром 4 февраля начался излив воды. После толчка он прекратился. По сообщению зарубежных специалистов, в течение января наблюдалось изменение уровня воды в некоторых колодцах: в одних — повышение, в других — снижение.

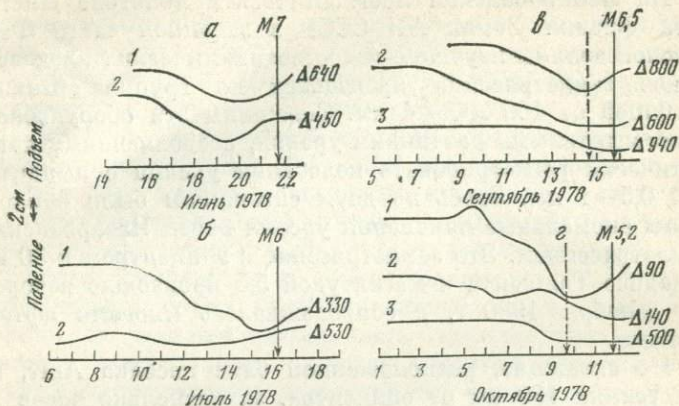


Рис. 36. Изменение уровня подземных вод перед землетрясениями в Тихом океане и Охотском море

а — 21.VI 1978 г.; б — 16.VII 1978; в — 15.IX 1978; г — 11.X 1978 г. (по Ф. И. Монахову, И. Г. Киссину и др.). Скважины: 1 — кунаширские (осредненные данные по трем скважинам); 2 — итурупская; 3 — сахалинская. Сплошные вертикальные стрелки — моменты землетрясений, пунктирные — время, когда делались пробные прогнозы землетрясений; М — магнитуда землетрясения, Δ — расстояние от эпицентра до скважины, км

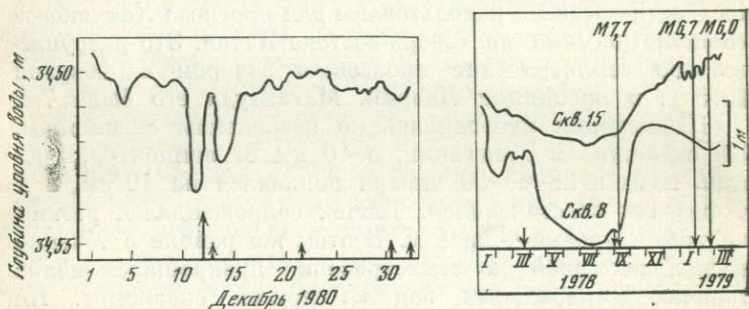


Рис. 37. Изменение уровня подземных вод в скважине Ленинадского прогностического полигона перед Назарбекским землетрясением 11 декабря 1980 г.

Большая стрелка — момент основного толчка, маленькие стрелки — афтершоки землетрясения

Рис. 38. Изменение уровня подземных вод по глубоким скважинам Ашхабадского района в сопоставлении с местными и удаленными землетрясениями (по М. К. Курбанову, В. И. Лыкову, В. И. Мячкину)

Местные землетрясения с магнитудой 4,4—4,8 (короткие стрелки) произошли на расстояниях 145 и 30 км. Сильные удаленные землетрясения с магнитудой 6—7,7 (длинные стрелки) были на территории Ирана, на расстояниях 400—550 км от скважин

В США гидрогеодинамические эффекты перед землетрясениями были обнаружены в процессе наблюдений по скважине, пробуренной в зоне разлома Сан-Андреас. Эффекты эти проявлялись в виде снижения и последующего подъема уровня воды перед толчком. Продолжительность аномального изменения уровня составляла один-два месяца.

Более долговременные эффекты перед землетрясениями были отмечены в районе Ашхабада, где в течение нескольких лет проводятся наблюдения за уровнем воды в глубоких скважинах. Интересная особенность этих скважин, пробуренных в предгорьях Копет-Дага, — значительные изменения уровня воды (до 4 м), обычно не характерные для глубоких водоносных горизонтов. Ашхабадские геофизики связывают эти изменения с подготовкой землетрясений.

Как видно из рис. 38, перед местными землетрясениями средней силы и удаленными сильными толчками уровень воды сильно менялся. Наиболее четкие изменения уровня были по скважине 8. Подтверждением того, что данные эффекты могут рассматриваться как предвестники землетрясений, служит хорошая корреляция изменений уровня воды с ходом наклонов земной поверхности. Такое совпадение разных показателей и характерные изменения уровня по обоим скважинам стали основой для заключения о высокой вероятности сильного землетрясения в ближайшие дни. Этот прогноз был сделан ашхабадскими геофизиками В. И. Лыковым и М. К. Курбановым 9 сентября 1979 г., а 16 сентября произошло разрушительное землетрясение с магнитудой 7,7 в Иране, на расстоянии 550 км от Ашхабада. После землетрясения уровень в скважинах быстро повышался [Физические процессы в очагах землетрясений, 1980].

Последующие изменения уровней воды, наклонов земной поверхности и некоторых других показателей в конце 1978 г. позволили геофизикам Института сейсмологии АН ТССР и Института физики Земли АН СССР сделать вывод о подготовке еще одного сильного землетрясения. Это землетрясение с магнитудой 6,7 произошло 16 января 1979 г. в 400 км к юго-востоку от Ашхабада.

Американский ученый Рейнхарт провел статистический анализ деятельности гейзеров в Йеллоустонском парке. Выяснилось, что существует корреляционная зависимость частоты извержения гейзеров от земных приливов и

землетрясений. На периодичность работы гейзеров особенно сильно влияет 18,6-летний цикл приливов. По мере того как при подготовке сильного землетрясения усиливаются напряжения в земной коре, интервал между извержениями гейзеров сокращается. За два-три года до каждого сильного землетрясения извержения гейзеров в радиусе 100 км учащаются. Сразу же после землетрясения интервал между извержениями резко увеличивается.

В мае 1974 г. у берегов полуострова Идзу в Японии произошло землетрясение с магнитудой 6,9. Этому землетрясению предшествовали аномальные изменения дебита и температуры горячего источника, расположенного в 10 км от эпицентра. По данным японских ученых, общее увеличение дебита источника наблюдалось в период с 1968 г. до начала 1973 г., затем дебит стал снижаться и после землетрясения несколько повысился. Перед землетрясением в течение нескольких лет также снижалась температура воды.

Длительные изменения уровня воды по нескольким десяткам скважин предшествовали Таншаньскому землетрясению 1976 г. Магнитуда его достигала 7,8. Согласно наблюдениям гидрогеологов аномальное снижение уровня подземных вод в эпицентральной зоне началось за три-четыре года до землетрясения (рис. 39). В первый период снижение уровня происходило в периферийной части этой зоны, а к концу 1973 г. приблизилось к эпицентру, что указывало на концентрацию здесь напряжений. Темп падения уровня по ряду скважин замедлился в 1975 г. и заметно ускорился весной 1976 г., за три-четыре месяца до землетрясения. За несколько дней до толчка уровень стал быстро повышаться. После толчка было отмечено скачкообразное восстановление уровня воды. Величина скачка, как уже упоминалось, достигала 4—10 м.

Гидрогеодинамические эффекты, предшествовавшие Таншаньскому землетрясению, проявлялись в виде четко выраженных крупномасштабных изменений уровня подземных вод. Но некоторые другие предвестники перед этим землетрясением не наблюдались, и оно предсказано не было.

К числу гидрогеодинамических предвестников землетрясений нужно отнести и аномалии давления или дебита нефти и газа. Краткосрочные (в течение нескольких дней) изменения дебита нефти предшествовали нескольким

ильным землетрясениям Северного Кавказа [Осика, 1979].

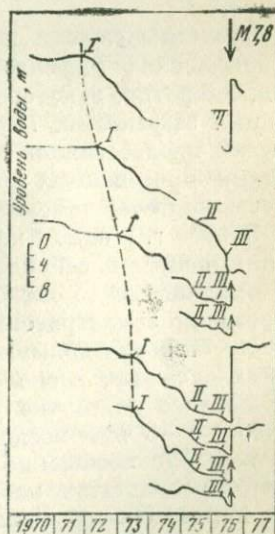
При разработке нефтяных месторождений многие скважины дают не чистую нефть, а смесь нефти с водой в различных пропорциях. Нередко в таких скважинах перед землетрясением резко изменялось соотношение нефти и воды при небольшом изменении суммарного дебита жидкости. Не исключено, что соотношение дебита нефти и воды, которому до сих пор не уделялось внимания, может послужить интересным прогностическим признаком. Ведь нефтяная залежь и окружающие ее законтурные воды по-разному реагируют на изменение напряженно-деформированного состояния перед землетрясением.

По данным М. Н. Смирновой и других грозненских геологов, перед Дагестанским землетрясением 14 мая 1970 г. изменился режим нефтяных месторождений. На Гудермесском и Новогрозненском месторождениях, расположенных на расстоянии 75—100 км от эпицентра, с начала марта 1970 г. во всех скважинах уменьшился дебит нефти, а в апреле он стал возрастать. На Колодезном месторождении, удаленном от эпицентра на 300 км, с октября 1969 г. по май 1970 г. увеличилось пластовое давление нефти в скважине 5 с 260 до 278 кгс/см² [Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г., 1980].

Краткосрочные предвестники наблюдались перед землетрясением с магнитудой 3,6 и интенсивностью до 6 баллов на окраине города Грозного 26 сентября 1972 г. В эпицентре, на Октябрьском нефтяном месторождении, за три дня до землетрясения суточная добыча нефти в ряде скважин увеличилась,

Рис. 39. Изменение уровня подземных вод по некоторым скважинам в районе Таншаня (Китай) перед землетрясением 28 июля 1976 г. (по Ван Ченмину и др.)

Штриховая линия — начало аномального снижения уровня; I, II, III — точки перегиба кривых уровня



после толчка вновь уменьшилась. Давление нефти на устье одной из скважин, по сведениям грозненских геологов, в течение семи дней, предшествовавших землетрясению, снизилось с 50 до 33 ат в день толчка, а после землетрясения возросло. Температура на устье скважины накануне землетрясения упала на 4°C .

На двух газовых месторождениях в США, разделенных сейсмогенным разломом, отмечалось изменение продуктивности скважин и давления газа перед землетрясением с магнитудой 6,75. На одном из этих месторождений за 10 месяцев до толчка дебит газа уменьшился, после толчка восстановился. На другом — давление газа в скважинах повысилось за 10 дней до землетрясения.

Имеющиеся данные по гидрогеодинамическим эффектам перед землетрясениями позволяют относить их к числу наиболее перспективных предвестников. Однако количество достоверных наблюдений таких предвестников пока невелико. Недостаточно изучены их характерные черты применительно к различным гидрогеологическим и сейсмическим условиям. Приведенные выше примеры показывают, что эффекты перед землетрясениями могут иметь разные масштабы: в одних случаях уровень воды изменяется всего на 2—3 см, в других — на несколько метров.

Известны случаи, когда после характерных гидрогеодинамических эффектов землетрясения не происходили или, напротив, некоторые землетрясения не предварялись такими эффектами. Подобные случаи, отмеченные и для других предвестников землетрясений, объясняются недочетами проведенных наблюдений и многообразием процессов подготовки землетрясений.

В 1970 г. в одном из американских журналов, освещающих вопросы сейсмологии, появилась информация из Австралии, где 14 октября 1968 г. в районе города Перта произошло землетрясение с магнитудой 7. Землетрясению предшествовало повышение уровня воды в группе неглубоких скважин, расположенных в 110 км от эпицентра. За 1,5 часа до толчка уровень воды повысился на 3 см, а через 2—3 часа после землетрясения начал плавно снижаться. Это сообщение было одной из первых публикаций о результатах наблюдений за реакцией подземных вод перед землетрясениями. И оно вызвало большой интерес в научных кругах. Однако в 1976 г. в том же журнале была напечатана другая статья. В ней указывалось,

что повышение уровня воды в упомянутых скважинах совпадало по времени с прошедшим здесь дождем и, следовательно, не связано с землетрясением. Предвестник оказался ложным.

Действительно, различные помехи затрудняют выделение гидрогеодинамических предвестников или могут стать причиной появления ложных предвестников. Если наблюдения ведутся в неглубоких водоносных горизонтах, серьезным препятствием служит инфильтрация атмосферных осадков, вызывающая значительные изменения уровня подземных вод. Поэтому, например, на Курильско-Сахалинском полигоне периоды дождей из наблюдений исключаются. Но в большинстве случаев помехи поддаются учету и их можно устранить.

Сложнее обстоит дело в тех случаях, когда гидрогеодинамические эффекты связаны с несейсмическими, так называемыми криповыми подвижками. Подвижки, при которых разрядка напряжений происходит сравнительно медленно, без толчка, характерны для некоторых зон тектонической активности. Ф. И. Монахов считает, что в отдельных случаях, когда на Курильско-Сахалинском полигоне после аномальных гидрогеодинамических эффектов землетрясения не происходили, причиной эффектов служили криповые подвижки.

В апреле 1979 г. на Сахалине отмечались криповые подвижки в пределах Центрально-Сахалинского глубинного разлома, обусловленные сжатием литосферных блоков. Акад. Ю. А. Косыгин с сотрудниками Сахалинского комплексного научно-исследовательского института АН СССР установили, что с криповыми явлениями был связан подъем уровня подземных вод по скважинам в Южно-Сахалинске, Охе и на острове Кунашир. Амплитуда подъема, который продолжался 7 сут., достигала 47 см. Одновременно приборами на острове Шикотан были зарегистрированы деформации сжатия.

Изменения уровня подземных вод неоднократно сопровождали криповые смещения в зоне разлома Сан-Андреас. Эти изменения были зафиксированы по скважине близ города Холлистера. По сообщению американских геофизиков (Джонсона, Вессона и др.), с июля 1971 г. по декабрь 1973 г. аномальные гидрогеодинамические эффекты, связанные с крипом, наблюдались 7 раз. Криповые подвижки имели амплитуду 2—4 мм и продолжались от 16 до 54 час. При этом уровень воды изменялся на 1—6 см

в течение 2—4 сут. В пяти случаях уровень повысился, в двух — понизился.

Из-за недостаточного объема наблюдений мы пока не знаем, каковы различия гидрогеодинамических эффектов, сопровождающих крип или предшествующих землетрясениям. Можно надеяться, что в дальнейшем такие различия будут установлены, и это повысит достоверность гидрогеодинамических предвестников землетрясений.

Какова природа гидрогеодинамических предвестников землетрясений? Прежде чем ответить на этот вопрос, нужно коснуться тех главных особенностей данных предвестников, которые можно считать выясненными.

Гидрогеодинамические предвестники были неоднократно зарегистрированы на больших расстояниях от эпицентра готовящегося землетрясения. Так, перед землетрясением 15 сентября 1978 г. с магнитудой 6,5 наблюдались изменения уровня воды по скважинам на островах Кунашир, Итуруп и Сахалин. Расстояния скважин от эпицентра были соответственно 800, 600 и 940 км (см. рис. 36). Подобные эффекты перед удаленными землетрясениями были отмечены и в других сейсмических областях.

Гидрогеодинамические эффекты наблюдаются перед землетрясениями с разной глубиной очага — как мелкофокусными, так и достаточно глубокими. На Курильско-Сахалинском полигоне были отмечены такие эффекты для землетрясений с глубиной очага 200 км и более.

Реакция подземных вод отражает ход подготовки землетрясения в пространстве и времени. Автор в 1970 г. высказал предположение, что на первых стадиях подготовки землетрясений должны происходить постепенные изменения уровней, напоров или дебитов подземных вод, а завершающим этапам подготовки должны соответствовать резкие вариации этих показателей со сменой их знака. Действительно, наблюдения долговременных предвестников показывают, что в разные периоды подготовки землетрясения изменяется скорость снижения уровней вод (например, перед Таншаньским землетрясением, что видно на рис. 39). Особый интерес представляет завершающая стадия гидрогеодинамического предвестника, которая часто характеризуется более или менее быстрым подъемом уровня подземных вод.

Сторонники дилатантно-диффузионной модели подготовки землетрясений связывают изменения уровней или дебитов подземных вод перед толчком с оттоком воды в

зону очага. Но реакция подземных вод на подготовку удаленных или глубоких землетрясений не подтверждает такого объяснения: отток воды на большие расстояния невозможен.

Основной причиной гидрогеодинамических эффектов в области подготовки землетрясения нужно считать изменение напряженного состояния и развитие упругих деформаций: сжатие водонасыщенных пород приводит к повышению уровня подземных вод, растяжение — к снижению. Это подтверждается соответствием таких эффектов с результатами измерений наклонов или деформаций на Ашхабадском полигоне и Курильских островах. Восстановление уровня подземных вод перед толчком может быть хорошо объяснено моделью лавинно-неустойчивого трещинообразования, согласно которой на последней стадии подготовки землетрясения неустойчивая деформация стягивается в узкую зону, а в большей части объема напряжение падает, что неизбежно отражается и в режиме подземных вод.

Гидрогеохимические предвестники землетрясений

После землетрясения 26 апреля 1966 г. обнаружилось резкое снижение концентрации радона в Ташкентской термоминеральной воде. Вода эта используется для бальнеологических целей и поступает из скважин, расположенных недалеко от эпицентра землетрясения. Радон — радиоактивный инертный газ, период его полураспада 3,82 сут. Он входит в состав некоторых типов подземных вод. Происхождение радоновых вод связывают с распадом урана и радия, содержащихся в минералах.

В 1967 г. В. И. Уломов и Б. З. Мавашев опубликовали первые результаты исследований вариаций радона в Ташкентской минеральной воде. Выяснилось, что с 1957 г. содержание радона заметно увеличивалось. Особенно быстрый его рост происходил в 1965 г., а с октября 1965 г. до апреля 1966 г. изменение концентрации радона было небольшим (рис. 40). Количество радона в воде вновь возрастало перед некоторыми сильными афтершоками Ташкентского землетрясения.

В 1968 г. появилось сообщение группы японских ученых, наблюдавших изменения содержания радона в газах вулкана Хаконе. Концентрация радона возрастала с

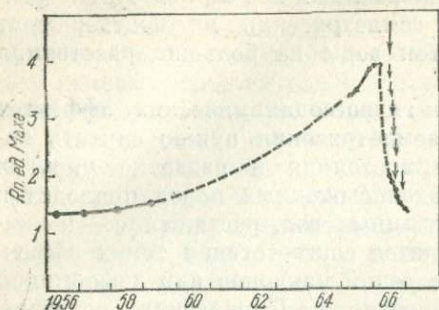


Рис. 40. Изменение содержания радона в термоминеральных водах Ташкента до и после землетрясения 26 апреля 1966 г. (по В. И. Уломову и Б. З. Мавашеву)

Большая стрелка — основной толчок, маленькие стрелки — афтершоки землетрясения

1960 по 1965 г. и резко упала после землетрясений 1966 г. Результаты работ советских, а затем и японских специалистов привлекли широкое внимание к радону как предвестнику землетрясений. И несмотря на то что последующие наблюдения, проведенные в нашей стране и за рубежом, не позволяют однозначно оценивать надежность радонового предвестника, радон до сих пор остается наиболее распространенным объектом гидрогеохимических исследований для прогноза землетрясений.

Радоновый эффект Ташкентского землетрясения послужил основой научного открытия, сделанного советскими учеными (Г. А. Мавлянов, А. Н. Султанходжаев, В. И. Уломов и др.), которые обнаружили явление изменения химического состава подземных вод при землетрясениях*.

Изменение содержания радона в подземных водах было отмечено в разных районах Узбекистана перед некоторыми местными и удаленными землетрясениями. По данным А. Н. Султанходжаева и других ученых, на Восточно-Ферганском полигоне землетрясениям чаще всего предшествовал рост концентрации радона. Перед Газлийским землетрясением 17 мая 1976 г. в воде из скважины Улугбек под Ташкентом содержание радона в течение нескольких дней до толчка резко увеличивалось, затем начало падать.

Неоднозначные данные по радоновому эффекту были получены при наблюдениях в Таджикистане. На скважине Оби-Гарм таджикские сейсмологи обнаружили за месяц до сильного землетрясения снижение количества ра-

* Открытия в СССР. М.: Центральный научно-исследовательский институт патентной информации, 1973, с. 24.

дона в воде, за пять дней до толчка концентрация его возросла и затем перед толчком резко снизилась. По скважинам Душанбинского полигона чл.-кор. АН СССР В. Л. Барсуков и другие ученые не установили определенной зависимости содержания радона от сейсмической активности.

Исследования, проведенные в Киргизии, в Северо-Тяньшаньской сейсмической зоне, под руководством П. И. Чалова, показали, что длительные радоновые аномалии перед землетрясениями проявляются недостаточно четко. Лучше выражены кратковременные аномалии в виде значительных колебаний содержания радона в подземных водах перед толчком.

По зарубежным данным, радоновые аномалии перед землетрясениями были обнаружены в Японии и Китае. Понижение концентрации радона в воде из скважины на полуострове Идзу в Японии началось за три месяца до землетрясения 14 января 1978 г. с магнитудой 7. Это понижение усилилось за пять дней до толчка. Изменение содержания радона по некоторым скважинам предшествовало Хайченскому землетрясению в Китае 4 февраля 1975 г. Зарубежные исследователи отмечают, что в ряде случаев радоновый эффект перед землетрясениями обнаружен не был.

В последние годы к числу наиболее перспективных гидрогеохимических предвестников землетрясений стали относить гелиевые аномалии. Гелий — инертный газ, образующийся при радиоактивном распаде. Происхождение гелия в земной коре связано преимущественно с гранитной оболочкой, которая отличается повышенной радиоактивностью. В 1969 г. советскими учеными было сделано научное открытие* — установлена связь гелиевых аномалий с глубинными разломами. В подземных водах гелий находится в растворенном состоянии, и водно-гелиевая съемка (определение концентрации гелия в подземных водах) служит хорошим способом выявления тектонических разломов. Над разломом содержание гелия в воде резко возрастает.

Изменение напряжений в земной коре влияет на раскрытие трещин, их проницаемость и, таким образом, отражается на концентрации гелия в подземных водах.

* Открытия в СССР. М.: Центральный научно-исследовательский институт патентной информации, 1968—1969, с. 14.

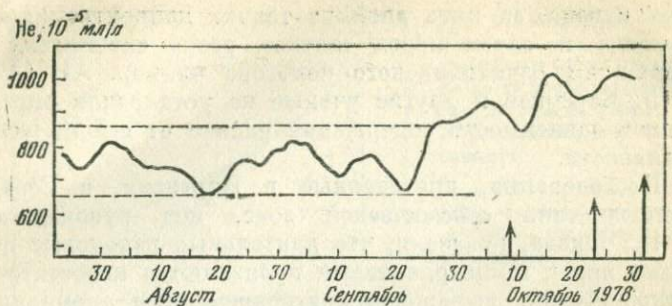


Рис. 41. Вариации средних содержаний гелия в воде «горячей» скважины месторождения Явроз (по В. Л. Барсукову и др.)

Вертикальные стрелки — моменты землетрясений; штриховыми линиями ограничен интервал колебаний концентрации гелия в сейсмически спокойное время

Итак, вариации содержания гелия в подземных водах могут служить признаком подготовки землетрясения.

Работы Института геохимии и аналитической химии АН СССР на Душанбинском полигоне показали, что гелиевые аномалии — краткосрочный предвестник землетрясений. Величина и длительность проявлений таких аномалий пропорциональны силе предстоящего землетрясения. На рис. 41 приведены графики изменений концентрации гелия в воде одной из скважин Душанбинского полигона с августа по октябрь 1978 г. В августе-сентябре, когда землетрясений в радиусе 500 км от скважины не было, содержание гелия изменялось в небольших пределах. Рост содержания гелия в конце сентября — начале октября и последующее его снижение предшествовали землетрясению. Аналогичные аномалии стали предвестниками еще двух землетрясений [Барсуков и др., 1979].

П. И. Чалов и другие ученые обнаружили длиннопериодные (в течение нескольких месяцев) гелиевые аномалии — возрастание его концентрации в водах — перед некоторыми землетрясениями Северо-Тяньшаньской зоны. Однако не все такие аномалии сопровождалось землетрясениями. По наблюдениям ташкентских ученых, перед Газлийским землетрясением 1976 г. за три-семь дней снизилось содержание гелия в подземных водах. Таким образом, гелиевые аномалии не дают однозначного эффекта перед землетрясениями в разных районах.

Интересно, что существенные изменения концентрации гелия в подземных водах с течением времени были зафиксированы и в несейсмичных районах. По-видимому, гелиевые аномалии появляются не только при подготовке землетрясений, но и в результате некоторых других внутриземных процессов.

В последние годы делались попытки использовать для поисков предвестников землетрясений вариации различных химических характеристик подземных вод — их газового, ионно-солевого, микрокомпонентного, изотопного состава.

Среди газовых компонентов большой интерес представляет углекислота. Образование углекислых вод связано с глубинными процессами, и содержание углекислоты в таких водах может служить показателем интенсивности этих процессов. Снижение концентрации углекислого газа в подземных водах было установлено ташкентскими сейсмологами за 13—20 дней до Газлийского землетрясения 1976 г. Перед землетрясениями в Дагестане в ряде случаев также отмечалось изменение концентрации углекислоты в подземных водах и газах. Например, Дагестанскому землетрясению 14 мая 1970 г. предшествовало снижение количества углекислоты в районе Талги и резкое повышение в Заузенбаше.

Содержание ионов хлора, гидрокарбоната и других главных компонентов ионно-солевого состава подземных вод может также изменяться при подготовке землетрясений. Д. Г. Осика придает особое значение хлору, который он относит к наиболее информативным гидрогеохимическим предвестникам землетрясений Северного Кавказа [1979]. Так, за несколько дней до Анапского землетрясения 1966 г. и Сочинского землетрясения 1970 г. увеличилось в 2—4 раза содержание хлоридов в подземных водах близлежащих районов. А Дагестанскому землетрясению 1970 г. предшествовал пятикратный рост содержания хлоридов в воде из скважины в районе Грозного, расположенной в 80 км от эпицентра.

В. Л. Барсуков и др. [1979] по наблюдениям в Таджикистане установили изменение гидрогеохимических показателей подготовки землетрясений с разной глубиной очага. Глубокофокусным землетрясениям предшествуют аномалии хлор-иона, а местным коровым землетрясениям — аномальные содержания гидрокарбонатов в подземных водах.

Изменения ионно-солевого состава и общей минерализации подземных вод отражаются на физических показателях вод, которые также могут служить предвестниками землетрясений. Например, перед некоторыми землетрясениями в Дагестане наряду с повышением общей минерализации подземных вод возрастала их удельная электропроводность.

В подземных водах повышенной минерализации обычно содержится набор различных микроэлементов. Изменение их концентрации перед землетрясениями мало изучено, но уже получены данные, указывающие на перспективность отдельных микроэлементов как предвестников землетрясений. А. Н. Султанходжаев, Г. Ю. Азизов и др. [1978] отметили снижение концентрации фтора в водах глубоких горизонтов по скважинам Восточно-Ферганского полигона перед Газлийскими землетрясениями. Местным землетрясениям здесь предшествует резкое повышение содержания фтора.

В последнее время большое внимание уделяется изучению предвестников на основе изменений изотопного состава различных компонентов подземных вод и газов. При этом определяют изотопные характеристики отдельных элементов или изотопные отношения в парах элементов.

В Ленинградском физико-техническом институте АН СССР создана установка для изотопного анализа, позволяющая, в частности, выполнять с достаточной точностью изотопный анализ гелия. Сотрудники этого института (Б. А. Мамырин и др.) предложили использовать отношения изотопов $^3\text{He}/^4\text{He}$ для целей прогноза землетрясений. В природных газах существенно преобладает ^4He . Изотопом ^3He обогащен гелий мантийного происхождения, а в гелии из земной коры этого изотопа меньше. Если при подготовке землетрясения изменяются потоки гелия и появляются дополнительные его источники, соответственно изменяются величины изотопных отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$.

В Институте физики и математики АН КиргССР были изучены радиоактивные изотопы в подземных водах Северо-Тяньшаньской сейсмической зоны [Чалов и др., 1980]. Был сделан вывод, что для прогноза землетрясений, помимо гелия и радона, может быть использовано отношение концентрации радона к радию в подземных водах. Другие изотопные показатели (по радию и урану в подземных водах), по данным киргизских ученых, мало при-

годны в качестве предвестников землетрясений, ибо изменения этих показателей связаны не только с процессами в очаге, но и со смещением вод разных горизонтов.

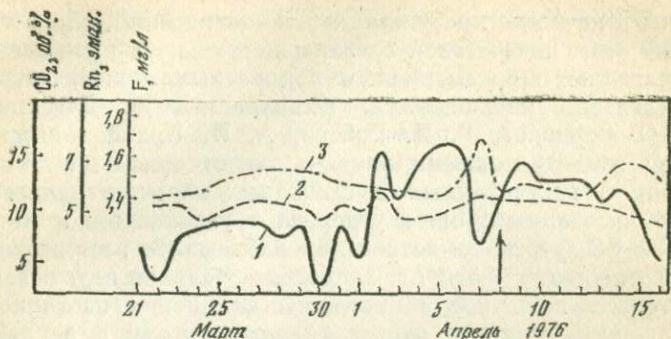
Согласно наблюдениям, выполненным в Дагестане (С. С. Сардаров, Г. И. Войтов, А. И. Кравцов и др.), перед землетрясениями изменяются отношения гелия к аргону в растворенных и свободных газах, изменяется также изотопный состав углерода в углекислоте и метане. За 1,5 сут. до землетрясения наблюдался рост изотопного отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$. В термоминеральных водах Тапкентского полигона обнаружены изменения изотопного отношения гелия к радиоактивному аргону в периоды усиления сейсмической активности.

Делаются попытки использовать в качестве предвестников землетрясений вариации газового состава почвенного воздуха. С этой целью начаты замеры радона, метана, гелия, паров ртути в приповерхностных слоях. Восходящие потоки газов фиксируются в зонах тектонических разломов, и интенсивность таких потоков может быть связана с изменением проницаемости разломов под действием напряжений, возрастающих при подготовке землетрясения.

Мы упомянули лишь некоторые гидрогеохимические показатели из их большого количества, привлекаемого для прогностических исследований. Сейчас достаточно ясно, что трудно надеяться на обнаружение какого-то универсального гидрогеохимического предвестника. По-видимому, в процессе дальнейших исследований будут найдены сочетания гидрогеохимических эффектов, наиболее перспективные в качестве предвестников для того или иного района.

Оценка гидрогеохимических предвестников по группе показателей уже практикуется и дает положительные результаты. Примером могут служить аномальные изменения концентрации углекислоты, радона и фтора в водах одной из скважин Восточно-Ферганского полигона перед Газлийским землетрясением 8 апреля 1976 г. На графике (рис. 42) видны аномалии этих показателей (особенно четкие для углекислоты и фтора), которые проявились за несколько дней до землетрясения.

Природа гидрогеохимических аномалий перед землетрясениями, условия их формирования пока еще недостаточно изучены. Первая попытка объяснить такие аномалии, увязать их с механизмом подготовки землетрясе-



Уис. 42. Изменение содержания углекислого газа, радона и фтора в воде из скважины Южный Аламышик перед Гаалийским землетрясением 8 апреля 1976 г. (стрелка) (по А. Н. Султанходжаеву, Г. Ю. Азизову и др.)

1 — углекислый газ; 2 — радон; 3 — фтор

ния принадлежит В. И. Уломову [1974]. Изменение содержания радона в подземных водах Ташкента перед землетрясением 1966 г. он связывает с деформированием горных пород в области очага, которое развивалось поэтапно.

Первый этап — возрастание напряжений и уплотнение пород. В результате повысилось поровое давление и увеличился выход радона в пластовые воды. Второй этап — сдвиговые деформации и растрескивание пород, сопровождавшиеся ультразвуковыми колебаниями и быстрым ростом концентрации радона в воде. Третий этап — деформация пород, близкая к пластическому течению, когда поступление радона стабилизировалось. Четвертый этап — основной толчок, который снял напряжение в области очага, содержание радона при этом резко упало. Такое объяснение радонового эффекта соответствует картине, наблюдавшейся перед Ташкентским землетрясением, — длительному нарастанию концентрации радона. Но в ряде других случаев радоновый эффект проявлялся иначе.

Основные этапы подготовки землетрясений, конечно, должны отразиться на химическом режиме подземных вод и газов. Но связанные с ними изменения химического режима могут быть различными в зависимости от конкретных условий того или иного района. Чтобы объяснить природу гидрогеохимических предвестников, нужно учи-

тывать две их важные особенности: предвестники эти наблюдаются как вблизи будущего эпицентра землетрясения, так и на большом удалении (сотни километров) от него; гидрогеохимические предвестники могут быть краткосрочными и долгосрочными.

Каковы основные причины образования гидрогеохимических аномалий перед землетрясениями? Это, конечно, изменение напряжений и развитие упругих деформаций в толще горных пород. Это — процессы трещинообразования, предшествующие главному разрыву, и порожденное ими излучение упругих волн. Наконец, это — физико-химические процессы, сопутствующие подготовке землетрясения.

Некоторые исследователи считают, что ультразвуковые колебания, связанные с появлением трещин, играют основную роль в образовании радоновых и других гидрогеохимических аномалий [Горбушина и др., 1972]. Опыты показали, что под действием ультразвука интенсивно выделяются газы, растворенные в воде, или газы из сухих горных пород. Ультразвук влияет также на процессы взаимодействия воды с породой и на переход в растворенное состояние ряда компонентов. Известно, однако, что ультразвук не распространяется далеко от источника излучения. Поэтому таким путем нельзя объяснить аномалии, наблюдаемые на большом расстоянии от очага.

Влияние растрескивания пород и физико-химических процессов также распространяется лишь на зону, прилегающую к очагу землетрясения, и не может простираться на сотни километров от него. И только напряжения и упругие деформации (сжатие или растяжение) проявляются на больших расстояниях от готовящегося очага землетрясения, что установлено непосредственными измерениями. Поэтому изменения напряжений и деформаций можно считать наиболее общим источником образования гидрогеохимических предвестников землетрясений.

Сжатие или растяжение водонасыщенных горных пород приводит к изменению их проницаемости, давления воды, раскрытию или смыканию существующих трещин. При этом нарушаются пути фильтрации подземных вод, усиливаются или ослабляются перетоки воды между разными пластами или зонами. Подобное изменение фильтрационных потоков вызывает образование различных гидрогеохимических аномалий.

Совместно с геофизиком Ю. И. Сткляниным автор рассмотрел условия формирования гидрогеохимических предвестников землетрясений за счет воздействия изменяющихся напряжений на неоднородную водонасыщенную породу. Любой массив горных пород неоднороден, он складывается породами, различными по своему составу, пористости и трещиноватости. Особенно сильно фильтрационная неоднородность проявляется в массивах плотных пород, которые в основном состоят из блоков с низкой пористостью и трещиноватостью, разделенных узкими зонами тектонических трещин. По этим зонам происходит наиболее активная циркуляция вод.

Подземные воды в зонах тектонических трещин и более монолитных блоках, а также в высокопроницаемых пластах и контактирующих с ними слоях глин обычно неодинаковы по составу и минерализации. Между слабо- и высокопроницаемыми частями массива устанавливается определенный равновесный водообмен, и при отсутствии внешних воздействий состав вод в них со временем изменяется мало. Но если напряжение в массиве при подготовке землетрясения возрастает, то это приводит к нарушению равновесия, усиливается переток вод между разными частями массива и состав вод изменяется. Расчеты показывают, что рост напряжения в неоднородном массиве способен вызвать заметную гидрогеохимическую аномалию — изменение ионно-солевого и газового состава вод, изотопных соотношений.

Таким образом, основной (но не единственной) причиной образования гидрогеохимических предвестников землетрясений можно считать изменение условий движения вод, вызванное дополнительными напряжениями. Эти предвестники должны проявляться более контрастно при быстром нарастании напряжений и в условиях большой неоднородности массивов по физическим свойствам пород и химическим показателям насыщающих их вод.

Подобный механизм образования гидрогеохимических предвестников, по-видимому, согласуется с разнообразием проявлений этих предвестников.

Поиски гидрогеохимических предвестников землетрясений ведутся сравнительно недавно. Сейчас исследования эти разворачиваются во многих сейсмоактивных зонах Советского Союза. Оборудуются специальные скважины, разрабатывается аппаратура для автоматической непрерывной регистрации содержания различных компонен-

тов в подземных водах. И уже получены обнадеживающие результаты использования гидрогеохимических предвестников для прогноза землетрясений.

Проблема прогноза землетрясений, к решению которой подключились гидрогеологи и геохимики, находится на переднем крае современной науки. Здесь уже упоминалось о трех научных открытиях, связанных с этой проблемой. Для прогностических исследований привлекаются новейшие методы и сложная аппаратура: мощные ЭВМ и лазерные установки, магнитогидродинамические генераторы и искусственные спутники Земли. И можно не сомневаться в том, что проблема прогноза землетрясений будет успешно решена.

ЛИТЕРАТУРА

- Арбузов В. А., Берри И. Л., Казарян С. В.* О влиянии землетрясений на режим месторождений углекислых минеральных вод горно-складчатых областей (на примере Арзнинского месторождения в Армянской ССР).— В кн.: Труды Центрального научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии. М., 1979, вып. 39, с. 101—111.
- Барсуков В. Л., Серебрянников В. С., Варшал Г. М., Гаранин А. В.* Геохимические методы прогноза, землетрясений.— *Геохимия*, 1979, № 3, с. 323—337.
- Бюс Е. И.* К вопросу о влиянии землетрясений на Кавказе на источники.— В кн.: Труды Института физики и геофизики АН ГССР. Тбилиси, 1946, т. 9, с. 103—122.
- Введенская А. В.* Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений с помощью теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
- Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим.* М.: Наука, 1977. 192 с.
- Возбужденная сейсмичность вблизи Нурекского водохранилища.* Душанбе: Дониш, 1975. 89 с.
- Войтов Г. И., Гречухина Т. Г.* Геохимические и гидрогеологические эффекты, сопровождающие землетрясения.— *Природа*, 1980, № 10, с. 90—95.
- Волков Ю. М., Журавлев В. И., Нерсесов И. Л., Сидорин А. Я.* Применение импульсного МГД-генератора «Памир-1» для электрического зондирования земной коры в целях прогноза землетрясений. Препринт Института атомной энергии. М., 1980. 28 с.
- Гвишиани А. Д., Кейлис-Борок В. И.* Прогноз сильных землетрясений.— *Земля и Вселенная*, 1980, № 5, с. 8—14.
- Геологические стихии* / Б. А. Болт., У. Л. Хорн, Г. А. Макдональд, Р. Ф. Скотт. М.: Мир, 1978. 440 с.
- Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Гоби-Алтайское землетрясение.* М.: Изд-во АН СССР, 1963. 392 с.
- Голицын Б. Б.* Избранные труды: В 2-х т. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 1. Сейсмология. 460 с.
- Горбушина Л. В., Тыминский В. Г., Спиридонов А. И.* К вопросу о механизме образования радиогидрогеологических аномалий в сейсмоактивном районе и их значение при прогнозировании землетрясений.— *Сов. геология*, 1972, № 1, с. 153—156.
- Гупта Х., Расоги Б.* Плотины и землетрясения: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.
- Гутенберг Б., Рихтер Ч.* Сейсмичность Земли: Пер. с англ. М.: ИЛ, 1948, с. 160.

- Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г.: Сейсмология, геология, геофизика. М.: Наука, 1980. 220 с.
- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. 192 с.
- Киссин И. Г. Об исследованиях роли воды в сейсмических процессах.— Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1971, № 3, с. 39—48.
- Киссин И. Г. О проблеме землетрясений, вызванных инженерной деятельностью.— Сов. геология, 1972, № 2, с. 68—80.
- Киссин И. Г. Вода под землей. М.: Наука, 1976. 224 с.
- Комарова М. В., Штенгелов Е. С. О связи между сейсмичностью и режимом подземных вод.— Геофиз. журн., 1980, т. 2, № 4, с. 63—68.
- Коноплянец А. А., Ковалевский В. С., Семенов С. М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 231 с.
- Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
- Котлов Ф. В. Антропогенные геологические процессы и явления на территории города. М.: Наука, 1977. 172 с.
- Лившиц Л. Д., Рябинин Ю. Н. О возможном участии фазовых превращений в процессах в очаге землетрясения.— В кн.: Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука, 1970, с. 28—37.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 379 с.
- Медведев С. В., Шебалин Н. В. С землетрясением можно спорить. М.: Наука, 1967. 132 с.
- Мирзоев К. М., Негмагуллаев С. Х. Возбуждение сейсмичности в зонах водохранилищ на примере района Нурекской ГЭС.— В кн.: Сборник Советско-Американских работ по прогнозу землетрясений. Душанбе; Москва: Дониш, 1979, т. 2, кн. 1, с. 124—151.
- Мячкин В. И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
- Мячкин В. И. Физические основы прогноза землетрясений.— Земля и Вселенная, 1978, № 6, с. 15—19.
- Николаев Н. И. Искусственные землетрясения.— Природа, 1973, № 7, с. 2—17.
- Никонов А. А. Голоценовые и современные движения земной коры. М.: Наука, 1977. 240 с.
- Никонов А. А. Современные движения земной коры. М.: Наука, 1979. 184 с.
- Никонов А. А. Землетрясения и поведение животных.— Земля и Вселенная, 1980, № 6, с. 31—35.
- Осика Д. Г. Опыт разработки и перспективы практического использования геохимических и гидрогеологических методов прогноза места, силы и времени мелкофокусных землетрясений.— Геохимия, 1979, № 3, с. 354—364.
- Основы гидрогеологии: Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1980. 232 с.
- Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: Фан, 1976. 263 с.
- Ревбиндер П. А. Физико-химическая механика как новая область знания.— Вестн. АН СССР, 1957, № 10, с. 32—42.

- Рибиндер П. А., Щукин Е. Д.* Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения.— В кн.: *Успехи физических наук*, 1972, т. 108, вып. 1, с. 3—42.
- Резанов И. А.* Великие катастрофы в истории Земли. М.: Наука, 1972, 163 с.
- Рикигакэ Т.* Предсказание землетрясений: Пер. с англ. М.: Мир, 1979, 388 с.
- Рихтер Ч. Ф.* Элементарная сейсмология: Пер. с англ. М.: ИЛ, 1963, 670 с.
- Робертс Э.* Когда сотрясается земля: Пер. с англ. М.: Мир, 1966, 176 с.
- Садовский М. А.* Предсказание времени землетрясений.— *Земля и Вселенная*, 1978, № 6, с. 6—10.
- Садовский М. А., Монахов Ф. И., Семенов А. Н.* Гидрогеодинамические предвестники южнокурильских землетрясений.— *Докл. АН СССР*, 1977, т. 236, № 1, с. 50—53.
- Садовский М. А., Нерсесов И. Л.* Вопросы прогноза землетрясений.— *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 1978, № 9, с. 13—30.
- Сейсмическое районирование территории СССР.* М.: Наука, 1980, 308 с.
- Семерчан А. А. и др.* Исследование крупномасштабного разрушения на Большом прессе Института физики высоких давлений АН СССР.— *Докл. АН СССР*, 1980, т. 251, № 2, с. 326—330.
- Соболев Г. А.* Предвестники землетрясений.— *Земля и Вселенная*, 1980, № 6, с. 10—14.
- Соловченко В. П.* Прогноз землетрясений — желаемое и достигнутое.— *Природа*, 1976, № 2, с. 13—20.
- Султанходжаев А. Н.* Современное состояние и перспективы развития гидрогеосейсмологии.— *Узб. геол. журн.*, 1977, № 5, с. 30—36.
- Султанходжаев А. Н., Азизов Г. Ю. и др.* Гидрогеосейсмологические исследования в Восточной Фергане. Ташкент: Фан, 1978, 190 с.
- Тазиев Г.* Когда земля дрожит. М.: Мир, 1968, с. 252.
- Уломов В. И.* Внимание! Землетрясение! Ташкент: Узбекистан, 1971, 160 с.
- Уломов В. И.* Динамика земной коры и прогноз землетрясений. Ташкент: Фан, 1974, 216 с.
- Физические процессы в очагах землетрясений.* М.: Наука, 1980, 284 с.
- Фомин В. М., Волейшо В. О.* Механизм формирования напряженного состояния в очагах землетрясений, вызванных деятельностью человека.— *Сов. геология*, 1978, № 3, с. 103—113.
- Хитаров Н. И., Войтов Г. И. и др.* Об изотопных сдвигах углерода углекислоты и углеводородов в газах после афтершоков землетрясения.— *Докл. АН СССР*, 1972, т. 204, № 5, с. 1104—1107.
- Ходжсон Дж.* Землетрясения и строение Земли: Пер. с англ. М.: Мир, 1966, 197 с.
- Чалов П. И., Тузова Т. В., Алехина В. М.* Изотопные параметры вод разломов земной коры в сейсмически активной зоне. Фрунзе: Илим, 1980, 106 с.
- Шебалин Н. В.* Парадоксы сильных землетрясений.— *Земля и Вселенная*, 1971, № 1, с. 4—19.
- Штенгелов Е. С.* О природе Гаалийских землетрясений.— *Докл. АН СССР*, 1979, т. 245, № 1, с. 59—62.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Разрушительная стихия	5
Из летописи сильнейших землетрясений	5
Землетрясения и ландшафт	10
Где происходят землетрясения	19
Очаг и процессы подготовки землетрясений	27
Что такое очаг землетрясения	27
Подготовка землетрясений	32
Вода в недрах Земли	37
Горные породы — коллекторы подземных вод	38
Генетические типы подземных вод	40
Физические свойства и химический состав подземных вод	44
Современные представления о воде в различных зонах земной коры и верхней мантии	47
Влияние подземных вод на подготовку и проявления землетрясений	58
Вода и механические процессы в очаге землетрясения	59
Участие эффекта Ребиндера и других физико-химических явлений в подготовке землетрясений	65
Связь сейсмичности с режимом подземных вод	71
Влияние подземных вод на интенсивность и последствия землетрясений	76
Возбужденные, или техногенные, землетрясения	79
Землетрясения и водохранилища	79
Землетрясения и нагнетательные скважины	88
Основные особенности возбужденных землетрясений	93
Вода — основной фактор возбужденных землетрясений	95
Гравитационная нагрузка или давление подземных вод?	95
Гидрогеологические условия возбужденной сейсмичности	99
Возможное влияние эффекта Ребиндера на возбужденную сейсмичность	102
Снижение порово-трещинного давления и сейсмичность	104
Перспективы контроля землетрясений	109

Воздействие землетрясений на подземные воды	113
Гидрогеологические эффекты землетрясений	113
Влияние землетрясений на минеральные воды	123
Землетрясения и добыча нефти	128
Можно ли предсказывать землетрясения	129
Трудные пути прогноза землетрясений	129
Предвестники землетрясений	137
Флюидные предвестники землетрясений	145
Как изменяются во времени подземные воды	147
Гидрогеодинамические предвестники землетрясений	150
Гидрогеохимические предвестники землетрясений	161
Литература	172

Исмау Гаврилович Киссин

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Утверждено к печати редколлегией серии
научно-популярных изданий Академии наук СССР

Редактор издательства Л. И. Приходько

Художник М. М. Бабенков

Художественный редактор Н. А. Фильчагина

Технический редактор А. М. Сатарова

Корректоры М. С. Бочарова, Ю. Л. Косорыгин

ИБ № 24588

Сдано в набор 14.01.82. Подписано к печати 26.03.82. Т-04280

Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2. Гарнитура обыкновенная

Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр. отт. 9,5. Уч.-изд. л. 9,9

Тираж 66 000 экз. Тип. зак. 1283. Цена 60 коп.

Издательство «Наука»

417864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90

2-я типография издательства «Наука»

421099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

60 коп.



3737

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКА»
ГОТОВИТСЯ
К ПЕЧАТИ
КНИГА:

БОРИСЕНКОВ Е. П.
Климат и деятельность человека.
1982, 10 л. 65 к.

Проблема климата и его изменений стала в последнее время в ряд первоочередных научных и практических проблем мирового масштаба. Состояние ее, пути решения и полученные на сегодняшний день результаты — тема предлагаемой вниманию читателей книги. Значительное место в ней уделено истории климата, анализу его изменений под влиянием естественных процессов и факторов антропогенного происхождения, связанных с хозяйственной деятельностью человека, рассматриваются также международные проекты по изучению климата.

Для читателей, интересующихся проблемами климатологии.

Книги можно предварительно заказать в магазинах Центральной конторы «Академкнига», в местных магазинах книготоргов или потребительской кооперации без ограничений.

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресу: 117192 МОСКВА В-192, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга-почтой» Центральной конторы «Академкнига»; 197110 ЛЕНИНГРАД П-110, Петрозаводская ул. 7, магазин «Книга-почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайший магазин «Академкнига», имеющий отдел «Книга-почтой».