



ОБЩАЯ ГЕОЛОГИЯ

Процессы внутренней динамики

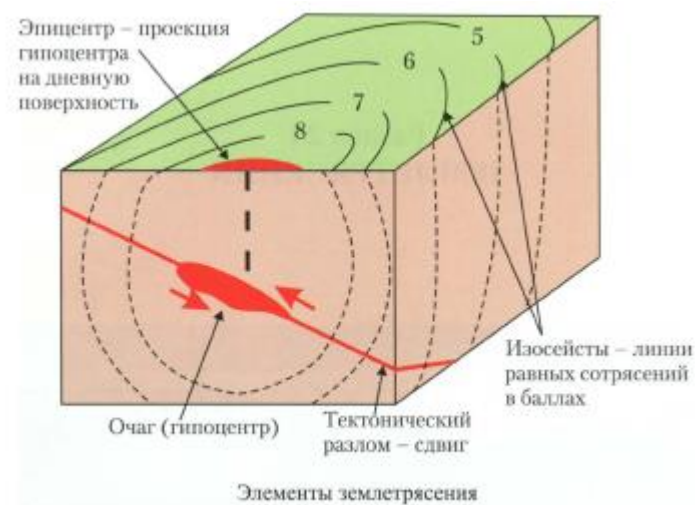
Землетрясения: причины, примеры, связь с геологическим строением Земли, прогноз.

Причины возникновения землетрясений и их параметры

Любое землетрясение - это мгновенное высвобождение энергии за счет образования разрыва горных пород, возникающего в некотором объеме, называемом очагом землетрясения, границы которого не могут быть определены достаточно строго и зависят от структуры и напряженно-деформированного состояния горных пород в данном конкретном месте. Деформация, происходящая скачкообразно, излучает упругие волны. Объем деформируемых пород играет важную роль, определяя силу сейсмического толчка и выделившуюся энергию.

Большие пространства земной коры или верхней мантии Земли, в которых происходят разрывы и возникают неупругие тектонические деформации, порождают сильные землетрясения: чем меньше объем очага, тем слабее сейсмические толчки. Гипоцентром, или фокусом, землетрясения называют условный центр очага

на глубине, а эпицентром - проекцию гипоцентра на поверхность Земли. Зона сильных колебаний и значительных разрушений на поверхности при землетрясении называется плейстосейстовой областью.



По глубине расположения гипоцентров землетрясения делятся на три типа: 1) мелкофокусные (0-70 км), 2) среднефокусные (70-300 км), 3) глубокофокусные (300-700 км). Чаще всего очаги землетрясений сосредоточены в земной коре на глубине 10-30 км. Как правило, главному подземному сейсмическому удару предшествуют локальные толчки - форшоки. Сейсмические толчки,

возникающие после главного удара, называются афтершоками. Происходящие в течение значительного времени афтершоки способствуют разрядке напряжений в очаге и возникновению новых разрывов в толще горных пород, окружающих очаг.

Очаг землетрясения характеризуется интенсивностью сейсмического эффекта, выражаемого в баллах и магнитуде. В России используется 12-балльная шкала интенсивности Медведева-Шпонхойера-Карника (MSK-64). Согласно этой шкале, принята следующая градация интенсивности землетрясений: I-III балла - слабые, IV-V - ощутимые, VI-VII - сильные (разрушаются ветхие постройки), VIII - разрушительные (частично разрушаются прочные здания, падают фабричные трубы), IX - опустошительные (разрушается большинство зданий), X - уничтожающие (разрушаются мосты, возникают оползни и обвалы), XI - катастрофические (разрушаются все сооружения, изменяется ландшафт), XII - губительные катастрофы (вызывают изменения рельефа местности на обширной территории). Магнитуда

землетрясения по Чарльзу Ф. Рихтеру определяется как десятичный логарифм отношения максимальных амплитуд сейсмических волн данного землетрясения (A) к амплитуде таких же волн некоторого стандартного землетрясения (A_x). Чем больше размах волны, тем соответственно больше смещение грунта:

$$M = \log A / A_x .$$

Магнитуда 0 означает землетрясение с максимальной амплитудой 1 мкм на эпицентральной расстоянии в 100 км. При магнитуде, равной 5, отмечаются небольшие разрушения зданий. Опустошительный толчок имеет магнитуду 7. Самые сильные из зарегистрированных землетрясений достигают величины 8,5-8,9 по шкале Рихтера. В настоящее время оценка землетрясений в магнитудах применяется чаще, чем в баллах.

Между интенсивностью (I₀) землетрясения в эпицентре, которое выражается в баллах, и магнитудой (M) существует соотношение

$$I_0 = 1,7 \cdot M - 2,2; M = 0,6 \cdot I_0 + 1,2.$$

Более сложное уравнение характеризует связь между интенсивностью колебания I_0 , магнитудой M и глубиной очага H :

$$I_0 = aM - b \log H + c$$

где a , b , c - коэффициенты, определяемые эмпирически для конкретного района землетрясения.

Линии, соединяющие пункты с одинаковой интенсивностью колебаний, называются изосейстами. В эпицентре землетрясения поверхность Земли испытывает в основном вертикальные колебания. При удалении от эпицентра возрастает роль горизонтальной составляющей колебаний.

Энергия, выделяющаяся при землетрясениях, $E = \frac{1}{2} \rho V^2 a^2 T$ (а / Т), где V - скорость распространения сейсмических волн, ρ - плотность верхних слоев Земли, a - амплитуда смещения, T - период колебаний. Исходным материалом для расчета энергии служат данные

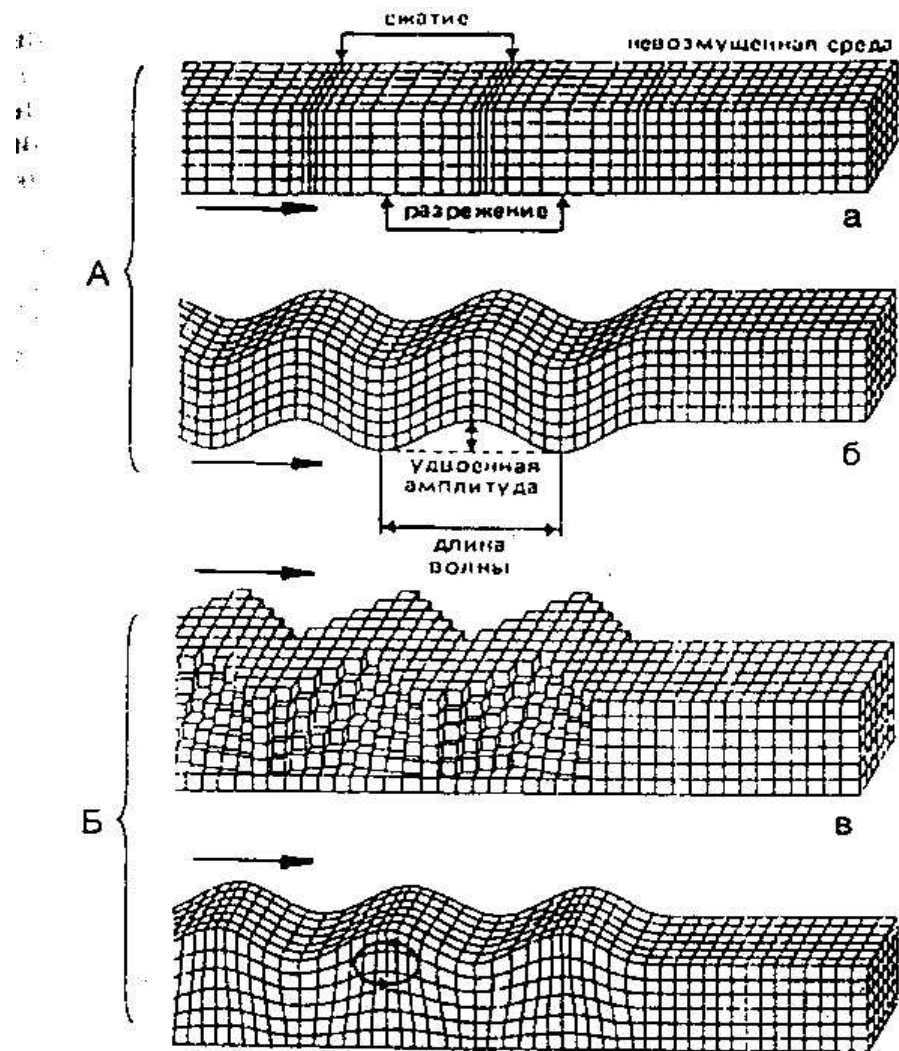
сейсмограмм. Б. Гутенберг, как и Ч. Рихтер, работавший в Калифорнийском технологическом институте, предложил связь между энергией землетрясения и его магнитудой по шкале Рихтера:

$$\log E = 9,9 + 1,9M - 0,024M^2.$$

Данная формула показывает колоссальное возрастание энергии при увеличении магнитуды землетрясения. Энергия землетрясений в несколько миллионов раз превышает энергию стандартной атомной бомбы в 100 кт ($1000 \cdot 10^{18}$ эрг). Например, при Ашхабадском землетрясении 1948 году выделилось энергии 1023 эрг, при Хаитском в Таджикистане в 1949 году - $5 \cdot 10^{24}$ эрг, в 1960 году в Чили - 10^{25} эрг. По всему земному шару в среднем за год за счет землетрясений выделяется около $0,5 \cdot 10^{26}$ эрг энергии.

Важным понятием в сейсмологии является удельная сейсмическая мощность, то есть количество энергии, выделившейся в единице объема, например в 1 м³, за единицу времени 1 с. Сейсмические волны,

образующиеся при мгновенной деформации в очагах землетрясений, производят основную разрушающую работу на поверхности Земли. Известны три главных типа упругих волн, создающих такие сейсмические колебания, которые ощущаются людьми и вызывают разрушения: объемные продольные (Р-волны) и поперечные (S-волны), а также поверхностные волны.



Типы сейсмических волн. А – объемные волны: а – продольные, б – поперечные. Б – поверхностные волны: в – Лява, г – Релэя. Стрелками показано направление движения волны

Продольные волны представляют собой чередование зон сжатия и растяжения горных пород, и они проходят через твердые, жидкие и газообразные вещества. При своем распространении продольные волны как бы попеременно сжимают горные породы или растягивают их. Часть энергии Р-волн, выходя из недр Земли на ее поверхность, передается в атмосферу в виде звуковых волн, которые воспринимаются людьми при частоте более 15 Гц. Р-волны являются самыми быстрыми из объемных волн.

Поперечные волны при своем распространении сдвигают частицы вещества под прямым углом к направлению своего пути. Они не распространяются в жидкой среде, так как модуль сдвига в жидкости равен нулю. Скорость поперечных волн меньше продольных. Эти сейсмические волны раскачивают и смещают поверхность грунта как по вертикали, так и по горизонтали.

Ко второму типу относятся поверхностные сейсмические волны, распространение которых

ограничено зоной, близкой к поверхности Земли. Они подобно ряби, расходящейся по глади озера. Различают поверхностные волны Лява и волны Рэлея.

Волны Лява (L) заставляют частицы грунта колебаться из стороны в сторону в горизонтальной плоскости, параллельной земной поверхности под прямым углом к направлению своего распространения. Волны Рэлея (R) возникают на границе раздела двух сред и воздействуют на частицы среды, заставляя их двигаться по вертикали и горизонтали в вертикальной плоскости, ориентированной по направлению распространения волн. Скорость волн Рэлея меньше, чем волн Лява, и обе они распространяются медленнее, чем продольные и поперечные сейсмические волны и довольно быстро затухают с глубиной, а также с удалением от эпицентра землетрясения.

Регистрация землетрясений

Сейсмические волны, распространяющиеся от очага землетрясения во все стороны, достигая поверхности

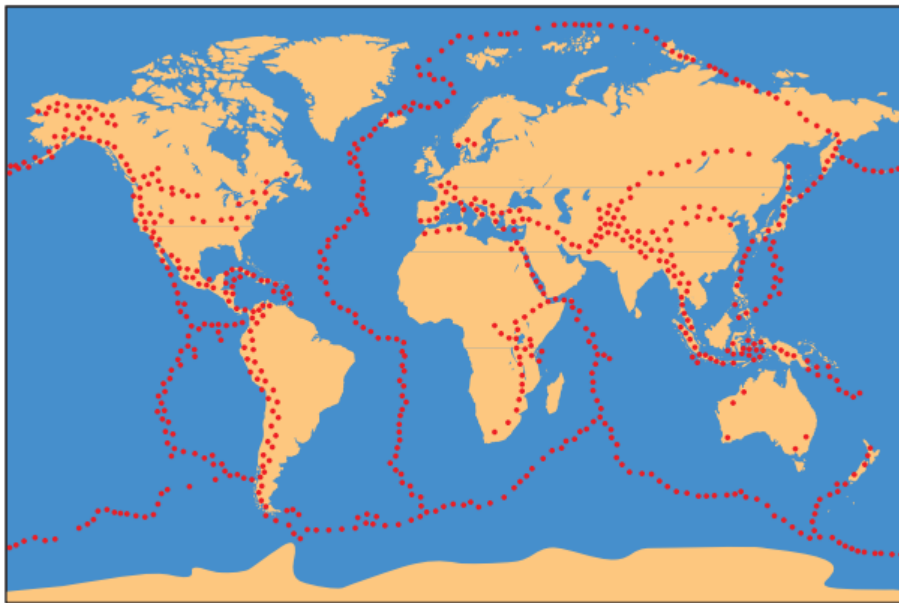
Земли, могут быть зафиксированы специальными приборами - сейсмографами, которые записывают ничтожные колебания грунта от землетрясений, произошедших даже на противоположной стороне земного шара.

Первые сейсмографы появились только около 100 лет тому назад, и записи сейсмических волн - сейсмограммы, сделанные ими, позволяют определить магнитуды землетрясений и местоположение (эпицентры) последних. Та часть сейсмографа, которая непосредственно записывает сейсмограмму, называется сейсмометром и состоит из маятника, подвешенного на тонкой пружине, реагирующего на малейшие колебания грунта. Собственно запись этих колебаний осуществляется либо на вращающемся барабане пером с чернилами, либо на магнитной ленте с помощью электромагнитной системы, преобразующей колебания в ток, либо световым лучом на движущейся фотобумаге. Сейсмограммы должны отражать перемещение грунта в двух взаимно перпендикулярных горизонтальных

направлениях и одном вертикальном, для чего необходимы три сейсмометра. Расшифровка сейсмограмм заключается в интерпретации и фиксировании точного времени прихода различных волн P, S, L и R, которые не только распространяются с различной скоростью, но и поступают на сейсмограф с разных сторон. Определяя время вступления разных волн и зная скорости их распространения можно установить расстояние до очага землетрясения - гипоцентра. Существующая мировая сеть сейсмических станций с многими сотнями сейсмографов позволяет немедленно регистрировать землетрясения, происходящие в любой точке земного шара. Ежегодно регистрируется более нескольких сот тысяч землетрясений, ощущаемых людьми, однако только около 100 землетрясений можно отнести к разрушительным. Эта непрерывная сейсмическая активность является следствием современных тектонических движений в самой поверхностной оболочке Земли - литосфере.

Распространение землетрясений и их геологическая позиция

Размещение землетрясений на земном шаре носит вполне закономерный характер и в целом хорошо объясняется теорией тектоники литосферных плит. Наибольшее количество землетрясений связано с конвергентными и дивергентными границами плит, то есть с такими зонами, где плиты либо сталкиваются друг с другом, либо расходятся и наращиваются за счет образования новой океанической коры.



Распространение поясов сейсмичности на земном шаре

Высокосейсмичный район - активные окраины Тихого океана, где океанические плиты субдуцируют, то есть погружаются под континентальные и напряжения, возникающие в холодной и тяжелой плите, разряжаются в виде многочисленных землетрясений, гипоцентры которых образуют наклонную сейсмофокальную зону, уходящую в верхнюю мантию до глубин в 600-700 км. Такие наклонные сверхглубинные сейсмофокальные зоны были установлены и описаны голландским геофизиком С.В. Виссером в 1936 году, японским геофизиком К. Вадати в 1938 году и русским ученым А.Н. Заварицким в 1946 году. Однако благодаря более поздним исследованиям американского сейсмолога Х. Беньофа в 1949 году они получили название сейсмофокальных зон Беньофа.

Землетрясения сопровождают и образование рифтов в срединно-океанических хребтах и на континентах, но там они в отличие от обстановок сжатия в зонах субдукции происходят в геодинамических условиях растяжения или сдвига.

Еще один регион сильных и частых землетрясений - это Альпийский горно-складчатый пояс, простирающийся от Гибралтара через Альпы, Балканы, Анатолию, Кавказ, Иран, Гималаи в Бирму и возникший всего 15-10 млн лет тому назад в результате коллизии грандиозных литосферных плит: Африкано-Аравийской и Индостанской, с одной стороны, и Евразийской - с другой. Процесс сжатия продолжается и в настоящее время, поэтому постоянно накапливающиеся напряжения непрерывно разряжаются в виде землетрясений. Наибольшее количество гипоцентров землетрясений в этом поясе приурочено к земной коре, то есть к глубинам до 50 км, хотя есть и глубокие (до 300 км), однако наклонные сеймофокальные зоны выражены плохо и встречаются редко. Интересно, что распространение эпицентров в плане очерчивает, например, в Иране и Афганистане почти асейсмичные крупные блоки, которые оказались "спаянными" вместе в процессе коллизии, зоны их сочленения все еще активны. В пределах СНГ к наиболее сейсмически активным регионам относятся

Восточные Карпаты, Горный Крым, Кавказ, Копетдаг, Тянь-Шань и Памир, Алтай, район оз. Байкал и Дальний Восток, особенно Камчатка, Курильские острова и о-в Сахалин, где 28 мая 1995 года произошло разрушительное Нефтегорское землетрясение с магнитудой 7,5, а число погибших составило 2 тыс. человек.

Все перечисленные регионы обладают горным, часто высокогорным рельефом, свидетельствующим о том, что они в настоящее время испытывают активные тектонические движения, а вертикальная скорость подъема поверхности земли превышает скорость эрозии. Во многих регионах, например в Закарпатье, на Кавказе, на Байкале, последние извержения вулканов происходили геологически недавно, а на Камчатке и Курильских островах происходят и в наши дни. Именно такие районы и характеризуются высокой сейсмической активностью, прямо коррелирующей с тектонической. Следует отметить, что и на стабильных участках земной коры, на платформах, в том числе и на древних, также случаются землетрясения. Правда, эти землетрясения достаточно

редкие и в целом относительно слабые. Однако бывают и сильные, как, например, на эпипалеозойской молодой Туранской плите в Кызылкумах в районе Газли в 1976 и 1984 годах, причем поселок Газли был дважды полностью разрушен.

Подавляющая часть землетрясений (более 85%) происходит в условиях обстановки сжатия, и только 15% - в обстановке растяжения, что согласуется с современной геодинамикой геологических структур и характером перемещений литосферных плит.

Механизм землетрясений

Механизм землетрясений - весьма сложный процесс, к пониманию которого сейсмологи только приближаются. Очаг сильного землетрясения представляет собой некоторое внезапное смещение в определенном объеме пород по относительно обширной плоскости разрыва, поэтому механизм землетрясения представляет собой кинематику движения в очаге.

Существуют несколько наиболее распространенных моделей механизма очага землетрясений.

Наиболее ранняя модель, разработанная Х. Рейдом в 1911 году, основана на упругой отдаче при сколовой деформации горных пород, в которых превышен предел прочности. Модель Н.В. Шебалина (1984 год) предполагает, что главную роль в возникновении короткопериодных колебаний с большими ускорениями играют осложнения, шероховатости или "зацепы" вдоль главного разрыва, по которому происходит смещение. "Зацепы" препятствуют свободному скольжению - крипу, и именно они ответственны за накопление напряжений в очаге. Модель лавинонеустойчивого трещинообразования (ЛТН), развиваемая в России В.И. Мячкиным, заключается в быстром нарастании количества трещин, их взаимодействии между собой и в конце концов возникновении главного или магистрального разрыва, смещение по которому мгновенно сбрасывает накопившееся напряжение с образованием упругих волн. Еще одна модель американских геофизиков У. Брейса и

А.М. Нура, сформированная в конце 60-х годов, предполагает важную роль дилатансии, то есть увеличения объема горной породы при деформации. Возникающие при этом микроскопические трещины при попадании в них воды не способны вновь закрыться, объем породы увеличивается, а напряжения возрастают, одновременно увеличивается поровое давление и снижается прочность породы. Все это приводит к разрядке напряжения - к землетрясению.

Существует модель неустойчивого скольжения, полнее всего разработанная американским геофизиком К. Шольцем в 1990 году и заключающаяся в "залипании" контактов взаимно перемещающихся блоков пород при относительно гладком строении поверхности сместителя. Залипание приводит к накоплению сдвиговых напряжений, разрядка которых трансформируется в землетрясение.

Цунами

Если землетрясение происходит в океане, над его эпицентром при внезапном вертикальном смещении дна во всей массе воды возникают своеобразные подводные волны,двигающиеся со скоростью до 800 км/ч во все стороны от эпицентра. В открытом океане эти длинные волны практически неощутимы, но с приближением к пологому берегу, в заливах, бухтах высота волн многократно увеличивается, образуется крутая водяная стена высотой до 10-15 м, а нередко и более, с колоссальной силой и грохотом обрушивающаяся на берег, сметая все на своем пути. Так, например, город Хило на Гавайских островах в 1946 и 1960 годах подвергся разрушительному цунами, погибло более 200 человек. Интересно, что цунами 22 мая 1960 года зародилось при землетрясении около Чили и волны достигли гавани Хило только через 15 ч, пройдя путь в 10 500 км со скоростью около 700 км/ч. Цунами 1996 года на Японском побережье привело к гибели 26 тыс. человек. В России опасность цунами грозит восточному побережью Камчатки и Курильским островам, где создана служба

предупреждения, а поселки строятся на высоких местах, недоступных волнам.

Прогнозирование землетрясений

Прогноз землетрясений - наиболее важная проблема, которой занимаются ученые во многих странах мира. Однако, несмотря на все усилия, этот вопрос еще далек от разрешения. Прогнозирование землетрясений включает в себя как выявление их предвестников, так и сейсмическое районирование, то есть выделение областей, в которых можно ожидать землетрясение определенной магнитуды или бальности. Предсказание землетрясений состоит из долгосрочного прогноза на десятки лет, среднесрочного прогноза на несколько лет, краткосрочного на несколько недель или первые месяцы и объявление непосредственной сейсмической тревоги. Наиболее впечатляющий достоверный прогноз землетрясения был сделан зимой 1975 года в городе Хайчен на северо-востоке Китая. Наблюдая этот район в течение нескольких лет разными методами, был сделан

вывод о возможном сильном землетрясении в ближайшем будущем. Возрастание числа слабых землетрясений позволило объявить всеобщую тревогу 4 февраля в 14 ч. Людей вывели на улицы, были закрыты магазины, предприятия и подготовлены спасательные команды. В 19 ч 36 мин произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,3, город Хайчен подвергся разрушению, жертв было мало. Но даже наряду с другими удачными предсказаниями землетрясений они скорее исключение, чем правило.

Сейсмическое районирование разного масштаба и уровня проводится на основании учета множества особенностей: геологических, в частности тектонических, сейсмологических, физических и др. Составленные и утвержденные карты обязаны учитывать все строительные организации несмотря на то, что увеличение предполагаемой силы землетрясения хотя бы на 1 балл влечет за собой многократное удорожание строительства, так как связано с необходимостью дополнительного укрепления построек.

Сейсмическое районирование территории предполагает несколько уровней от мелко- к крупномасштабным. Например, для городов или крупных промышленных предприятий составляют детальные карты микросейсмического районирования, на которых необходимо учитывать особенности геологического строения небольших участков, состав грунтов, характер их обводненности, наличие скальных выступов горных пород и их типы. Наименее благоприятными являются обводненные грунты (возникновение гидравлического удара), рыхлые суглинки, лессы, обладающие большой просадочностью. Аллювиальные равнины более опасны при землетрясении, чем выходы скальных пород. Все это надо учитывать при строительстве и проектировании зданий, гидроэлектростанций, заводов.

Сейсмостойкому строительству во всех странах уделяется очень большое внимание, особенно для таких ответственных объектов, как атомные электростанции, гидроэлектростанции, химические и нефтеперерабатывающие заводы. Проектирование и

строительство зданий в сейсмоопасных зонах требуют сделать их устойчивыми к землетрясениям. Как метко отмечено в книге Дж. Гира и Х. Шаха (1988 год), самое главное в проектировании сейсмостойких зданий - это "связать" здание, то есть соединить все элементы постройки: балки, колонны, стена и плиты в единую прочную, но вместе с тем и гибкую конструкцию, способную противостоять колебаниям грунта. Благодаря таким мерам в Мехико строят здания по 35-45 этажей, а в Токио, высокосейсмичном районе, - даже в 60 этажей. Такие постройки обладают гибкостью, то есть способностью качаться, изгибаться, как деревья при сильном ветре, но не разрушаться. Хрупкие же материалы, например кирпич или кирпич-сырец, разрушаются сразу. Не забудем также, что в Японии много атомных электростанций, но конструкция их зданий рассчитана на очень сильные землетрясения. Старые постройки стягивают стальными обручами или тросами, укрепляют снаружи железобетонной рамой, скрепляют арматурой, проходящей через все стены.

Существующие нормы и правила не в состоянии, конечно, полностью обеспечить сохранность объектов при землетрясении, но они значительно снижают последствия ударов стихии и поэтому требуют неукоснительного выполнения.

Существует большое количество разнообразных предвестников землетрясений, начиная от собственно сейсмических, геофизических и кончая гидродинамическими и геохимическими. Можно проиллюстрировать их несколькими примерами. Так, сильные землетрясения в противоположность слабым в конкретном районе происходят через значительные промежутки времени, измеряемые десятками и сотнями лет, так как после разрядки напряжений необходимо время для их возрастания до новой критической величины, а скорость накопления напряжений по Г.А. Соболеву не превышает 1 кг/см^2 в год. К. Касахара в 1985 году показал, что для разрушения горной породы необходимо накопить упругую энергию в 10^3 эрг/см^3 и объем горных пород, высвобождающий энергию при

землетрясении, связан прямой зависимостью с количеством этой энергии. Следовательно, чем больше магнитуда землетрясения, а соответственно и энергия, тем больше будет временной интервал между сильными землетрясениями. Данные по сейсмически активной Курило-Камчатской островной дуге позволили С.А. Федотову установить повторяемость землетрясений с магнитудой $M = 7,75$ через 140 ± 60 лет. Иными словами, выявляется некоторая периодичность или сейсмический цикл, позволяющий давать хотя и очень приблизительный, но долгосрочный прогноз.

Сейсмические предвестники включают рассмотрение группирования роев землетрясений; уменьшение землетрясений вблизи эпицентра будущего сильного землетрясения; миграции очагов землетрясений вдоль крупного сейсмоактивного разрыва; асейсмические скольжения по плоскости разрыва на глубине, возникающие перед будущим внезапным сдвигом; ускорение вязкого течения в очаговой области; образование трещин и подвижек по ним в области

концентрации напряжений; неоднородность строения земной коры в зоне сейсмичных разрывов. Особый интерес в качестве предвестников представляют форшоки, предваряющие, как правило, основной сейсмический удар. Однако главная непреодоленная сложность заключается в трудности распознавания настоящих форшоков на фоне рутинных сейсмических событий.

В качестве геофизических предвестников используют точные измерения деформаций и наклонов земной поверхности с помощью специальных приборов - деформаторов. Перед землетрясениями скорость деформаций резко возрастает, как это было перед землетрясением в Ниигата (Япония) в 1964 году. К предвестникам относится также изменение скоростей пробега продольных и поперечных сейсмических волн в очаговой области непосредственно перед землетрясением. Любое изменение напряженно-деформированного состояния земной коры сказывается на электрическом сопротивлении горных пород, которое

можно измерять при большой силе тока до глубины 20 км. То же относится и к вариациям магнитного поля, так как напряженное состояние пород влияет на колебания величины пьезомагнитного эффекта в магнитных минералах.

Довольно надежны в качестве предвестников измерения колебания уровня подземных вод, поскольку любое сжатие в горных породах приводит к повышению этого уровня в скважинах и колодцах. С помощью гидрогеодеформационного метода были сделаны успешные краткосрочные предсказания: например, в Японии в Изу-Ошима 14 января 1978 года, в Ашхабаде перед сильным землетрясением 16 сентября 1978 года с $M = 7,7$. В качестве предвестников используется также изменение содержания родона в подземных водах и скважинах.

Все многообразие предвестников землетрясений неоднократно анализировалось с целью выявления общих закономерностей и устранения ошибок. Геофизик Т.

Рикитаки провел статистический анализ связей длительности аномалий T и ее амплитуды A и ожидаемой магнитуды M , выделив три класса предвестников. Для среднесрочных предвестников он получил уравнение

$$\log DT = aM - b,$$

где $a = 0,76$; $b = -1,83$, а T - сутки. При $M = 5-7$ время проявления предвестников составляет первые месяцы - первые годы.