

EARTHQUAKES AND SOIL DYNAMICS

E. A. VOZNESENSKY

The disastrous consequences of the earthquakes are conditioned by the shock parameters, design and construction quality, and response of subsurface soils which is often a key factor for the seismic stability of the structures. Seismic behavior of the soils and seismicity of the various regions of the Earth are discussed.

Разрушительные последствия землетрясения определяются силой толчка и характером сотрясений, качеством проектирования и строительства и реакцией приповерхностных грунтов, которая часто бывает решающим фактором сейсмической устойчивости сооружений. Рассматриваются поведение грунтов при землетрясениях и сейсмичность разных регионов Земли.

© Вознесенский Е.А., 1998

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ДИНАМИКА ГРУНТОВ

Е. А. ВОЗНЕСЕНСКИЙ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Землетрясения представляют собой мощные динамические воздействия, имеющие тектоническую природу: под действием накопленных в *очаге* землетрясения тектонических напряжений в его малой области — *фокусе* (или *гипоцентре*) возникает разрыв сплошности материала Земли (о причинах накопления напряжений в земной коре см. [2]). Накопленная энергия переходит в энергию упругих волн напряжений, распространяющихся из фокуса толчка во все стороны со скоростями от сотен метров до нескольких километров в секунду. Проекция гипоцентра на земную поверхность называется *эпицентром*. Судя по величине высвобождаемой при сейсмическом толчке энергии, разрывы в очагах сильных землетрясений могут протягиваться на несколько сот километров. Так, фокальная зона (разрыв) одного из сильнейших землетрясений этого столетия — у о-ва Рэт Алеутской дуги в феврале 1965 года достигла 650 км.

Сила сейсмического толчка в любом заданном месте на поверхности Земли зависит прежде всего от энергии землетрясения, расстояния от заданной точки до его фокуса и строения земной коры на пути распространения сейсмических волн. Большое значение имеют также спектральный состав волн и грунтовые условия вблизи поверхности. Однако разрушительные последствия землетрясения кроме силы толчка в значительной мере определяются еще тремя обстоятельствами. Во-первых, набором возведенных на данной территории сооружений (например, сейсмическое разрушение высокой плотины может вызвать наводнение). Во-вторых, качеством строительства (в Ленинкане было разрешено строительство негодных, но дешевых каркасно-панельных домов: при Спитакском землетрясении 1988 года из 138 таких зданий уцелели 6). И в-третьих, свойствами грунтов, на которых стоят сооружения (при землетрясении 1964 года в Ниигате часть многоэтажных зданий легла на бок, не испытав разрушений).

Вопросы, затрагивающие закономерности поведения грунтов и их взаимодействия с сооружениями при динамических нагрузках разного происхождения, изучаются *динамикой грунтов* — сравнительно молодой областью знаний на стыке инженерной геологии, сейсмологии и строительного дела, возникшей во многом из-за сейсмичности Земли.

СИЛА И ЧАСТОТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Тысячи землетрясений происходят в мире каждый день. Единственный относительно свободный от сейсмических толчков континент — это Антарктида (рис. 1), а остальные в той или иной мере сейсмичны. Однако распределение очагов землетрясений на Земле неравномерно как по площади, так и по глубине. Глубина очага очень важна с точки зрения силы, а значит, и последствий землетрясения: ведь сейсмические волны затухают с расстоянием от источника, однако величина накопленных напряжений обычно заметно возрастает с глубиной. Неглубокий толчок может ощущаться как сильный на небольшой площади, а на больших расстояниях от эпицентра его последствия будут незначительны. Глубокий же толчок может вызвать умеренные сотрясения, но на гораздо большей территории. Расчеты показывают [2], что практически везде земная кора испытывает сжатие. Естественно предположить, что наибольшая плотность сейсмических очагов должна быть в местах концентрации максимальных напряжений. Очаги землетрясений в разных местах планеты сосредоточены в пределах сейсмических зон четырех основных типов, что объясняется с позиций современной тектоники литосферных плит.

Большая часть действительно глубокофокусных толчков происходит вокруг Тихого океана или вблизи его берегов (рис. 2) и связана с зонами субдукции, или поддвига одной плиты (в данном случае Тихоокеанской) под другую (например, Южно-

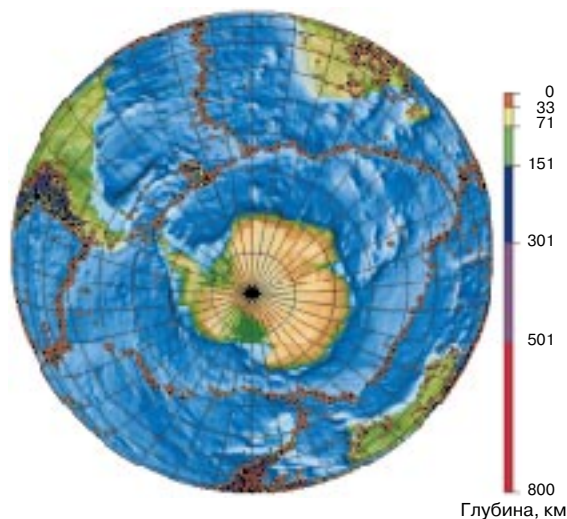


Рис. 1. Сейсмичность южного полушария Земли: показаны эпицентры землетрясений, произошедших за 1975–1995 годы. Цветом обозначена глубина очага в км (шкала глубин приведена справа от рисунка). Видна концентрация очагов у границ литосферных плит (каталог Национального информационного центра землетрясений Геологической службы США)

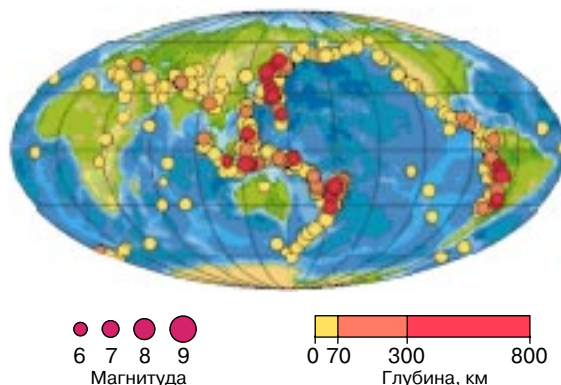


Рис. 2. Распространение очагов сильных землетрясений — с магнитудой более 6,5, произошедших на Земле за 20-летний период с 1.01.1976 по 31.12.1996 года (модифицированная проекция Мольвейде). Размер кружка соответствует магнитуде толчка, цвет — глубине фокуса в км (каталог Совета национальной системы сейсмических сетей США, CNSS)

Американскую). Самый глубокий из известных толчков произошел на глубине около 720 км к востоку от о-ва Ява [4]. С зонами субдукции связаны и многочисленные мелко-среднефокусные очаги землетрясений в зависимости от их положения на погружающейся плите. В результате формируются наклонные сейсмофокальные плоскости (скопления очагов), именуемые зонами Бенъофа.

Вне Тихого океана очаги глубиной более 100 км крайне редки. Так, в Калифорнии, самом сейсмичном районе Северной Америки (не считая Аляски), подавляющее большинство землетрясений происходит на глубинах не более 16 км. Приурочены они к сейсмической зоне другого типа — участку трения между двумя жесткими блоками земной коры, который проявляется как крупный сейсмогенерирующий разлом (например, разломы Сан-Андреас в Калифорнии и Анатолийский в северной Турции).

Преимущественно мелкофокусные землетрясения связаны также с широким поясом горных систем, протянувшимся из Мьянмы (ранее Бирма) через Гималаи и Среднюю Азию в Средиземноморье, где существуют зоны концентрации высоких сжимающих напряжений. Есть и исключения: район Гибралтара, где в 1954 году произошел толчок на глубине 640 км, горы Вранча в Румынии, а также Гиндукуш, где были толчки на глубине около 220 км.

Последний тип сейсмогенерирующих зон — это срединно-океанические хребты, где более тонкая земная кора испытывает растяжение и накапливаемые напряжения сравнительно невелики. В результате вдоль оси такого хребта формируются мелкофокусные очаги с умеренной сейсмической активностью, сопровождающейся вулканизмом.

Пример такого участка — о-в Исландия, пересекаемый Срединно-Атлантическим хребтом.

Примерно 2/3 всех произошедших на нашей планете землетрясений неглубокие (менее 70 км), и лишь несколько процентов толчков были отмечены на глубинах более 450 км [4]. Наиболее же сейсмичные районы, где происходит около 140 сильных землетрясений ежегодно, сосредоточены у границ литосферных плит и составляют порядка 10% площади Земли.

Когда говорят о силе землетрясения, имеют в виду либо *интенсивность* толчка, либо его *магнитуду*. Первая есть мера разрушений, вызванных землетрясением, вторая — мера высвобожденной при толчке энергии сейсмических волн.

Максимальное число градаций сотрясения в современных шкалах интенсивностей — двенадцать (их называют баллами). Наиболее распространенная модифицированная шкала Меркалли (ММ) и международная шкала MSK (Медведев—Спонейер—Карник). Например, 8-балльный толчок по шкале ММ описан следующим образом: “В зданиях, возведенных по специальным проектам, — легкие повреждения, в типовых зданиях — значительные, иногда частичное разрушение... Отрыв панелей от каркасов. Падают печные и фабричные трубы, колонны, памятники... Перемещается тяжелая мебель. Изменяется уровень воды в колодцах и скважинах”. Условность таких шкал очевидна: сила землетрясения получается зависящей от качества строительства, плотности населения и других факторов.

Более универсальной и физически обоснованной характеристикой землетрясения служит его магнитуда. Она характеризуется максимальной амплитудой записи, полученной сейсмографом стандартного типа на фиксированном расстоянии от эпицентра толчка. Первая шкала магнитуд землетрясений была изобретена в 1935 году американским профессором Чарлзом Фрэнсисом Рихтером (1900—1985) и носит его имя. В настоящее время используется несколько магнитудных шкал. В шкале локальных магнитуд (первоначальная *шкала Рихтера*) за магнитуду толчка принимается величина $M_L = \lg A_{\max}$, где A_{\max} — максимальная амплитуда колебаний (в мкм) по записи стандартного короткопериодного (0,8 с) крутильного сейсмографа на эпицентральном расстоянии 100 км. Эта шкала была разработана применительно к сейсмогеологическим условиям Калифорнии для изучения землетрясений с удалением эпицентров до 600 км и глубиной фокуса менее 30 км, когда в общем спектре сейсмических нагрузок преобладают поперечные волны.

Для оценки удаленных землетрясений (более 2000 км от эпицентра), где короткопериодные сейсмографы бесполезны, введена *телесеismicкая магнитудная шкала* для поверхностных волн с периодом 18–22 с:

$$M_S = \lg(A/T) + 1,66 \lg D + 3,30,$$

где A — максимальная амплитуда колебаний почвы (в мкм), T — соответствующий период колебаний (в секундах), D — расстояние до эпицентра (в градусах).

Но глубокие толчки не порождают поверхностных волн. Поэтому американский сейсмолог Бено Гутенберг (1889—1960) предложил для эпицентральных расстояний 600–2000 км *унифицированную магнитуду*, определяемую по амплитуде объемных (обычно продольных) волн с периодом 4–5 с:

$$m_b = \lg(A/T) + Q(D, h),$$

с учетом поправки Q , зависящей кроме эпицентрального расстояния и от глубины фокуса толчка h . Эти шкалы позволяют оценивать энергию практически всех значимых землетрясений во всем мире, а также осуществлять международный контроль за ядерными взрывами. Тем более что многочисленные модификации приведенных формул позволяют учитывать специфику разных регионов планеты и конечная величина удовлетворительно согласуется с определением магнитуды по шкале Рихтера.

Оказалось, однако, что при сильном землетрясении с большой площадью разрыва гораздо выше доля энергии длиннопериодных волн и величины m_b и M_S для таких толчков получаются заметно ниже M_L . Поэтому все чаще используются другие характеристики — *сейсмический момент* и *излученная энергия*. Современные методы анализа форм и амплитуд записей сейсмических волн, зарегистрированных на разных расстояниях и по разным азимутам от сейсмогенерирующего разлома, позволяют получить необходимые параметры для расчета сейсмического момента толчка:

$$M_0 = \mu S \langle d \rangle,$$

где μ — сдвиговая прочность пород в зоне разлома, S — площадь поверхности разрыва и $\langle d \rangle$ — среднее смещение по разлому. Сейсмический момент представляется более обоснованной характеристикой величины землетрясения, поскольку при вычислениях учитываются и геометрия разрыва, и положение наблюдателя относительно его. Поэтому появилась и новая шкала, в которой магнитуда определяется по сейсмическому моменту:

$$M_W = \frac{2}{3} \lg M_0 - 10,7.$$

Два самых больших зарегистрированных момента составляют $2,5 \cdot 10^{30}$ дин · см для Чилийского землетрясения 1960 года ($M_S = 8,5$, $M_W = 9,6$) и $7,5 \cdot 10^{29}$ дин · см — для Аляскинского землетрясения 1964 года ($M_S = 8,3$, $M_W = 9,2$).

Для расчетов высвобожденной при толчке упругой энергии с 1956 года обычно пользовались эмпирической зависимостью Гутенберга—Рихтера:

$$\lg E = 11,8 + 1,5 M_S,$$

где энергия E выражена в эргах несмотря на то, что телесеismicкая магнитуда M_S рассчитывается по амплитудам волн в узком частотном диапазоне и игнорирует высокочастотные составляющие толчка. Современные же цифровые сейсмографы чувствительны к колебаниям с периодами от 0,1 до 100 с, что делает возможным определение потока упругой энергии в широком частотном диапазоне. В результате появилась еще одна магнитуда, рассчитываемая непосредственно по энергии толчка:

$$M_e = \frac{2}{3} \lg E - 9,9.$$

При увеличении магнитуды землетрясения на единицу его энергия возрастает примерно в 32 раза (тогда как амплитуда колебаний земной поверхности — в 10 раз). При самых сильных толчках с магнитудой около 9 излучается энергия порядка 10^{25} эрг. Ее хватило бы для обеспечения электроэнергией небольшого города в течение более 500 лет. Энергия, выделяющаяся при землетрясении средней силы, сравнима с энергией ядерных взрывов (мегатонная бомба выделяет около $5 \cdot 10^{22}$ эрг), однако лишь незначительная часть ядерной энергии переходит в этом случае в сейсмическую: только взрыв 50 мегатонн высвободит столько же сейсмической энергии, сколько землетрясение с магнитудой 7,3 по Рихтеру. При этом собственно сейсмическая энергия, уносимая упругими волнами, составляет лишь небольшую (от 1 до 10%) долю всей энергии, выделяющейся при землетрясении. Огромная энергия излучается в виде тепла: об этом свидетельствует плавление горных пород в зоне разлома.

Наличие нескольких магнитудных шкал отчасти запутывает представление о силе толчка для неспециалиста. Тем более что все они рассчитываются по разным данным: M_S и M_W — по записям низкочастотных составляющих колебаний, M_L , M_e и m_b — по относительно более высокочастотным и характеризуют разные физические стороны землетрясения. Поэтому их значения для одного и того же события часто не совпадают (табл. 1). В каталогах землетрясений и базах данных для специалистов указывается несколько магнитуд (обычно M_S , m_b и M_W). Наиболее надежной величиной, особенно для сильных землетрясений, признается моментная магнитуда M_W . Учитывая удовлетворительную сходимости значений магнитуды по разным шкалам для толчков в диапазоне 5,5–7 (это достаточно многочисленны толчки, обычно вызывающие разрушения), любая из них в повседневном употреблении вполне корректно может именоваться магнитудой по Рихтеру. В этом нет противоречия — ведь в основе всех магнитудных шкал лежит исходная идея Ч. Рихтера о наличии эмпирической количественной связи между силой землетрясения (или размерами его фокальной зоны), состоянием от очага до сейсмографа и максимальной амплитудой колебания, зарегистрированной этим сейсмографом. И вся разница

Таблица 1. Эквивалентность силы землетрясений по разным магнитудным шкалам и интенсивности толчка в эпицентре (по: Nuttli, Shieh, 1987)

M	m_b	M_L	M_S	M_W	M_0 , дин · см	Интенсивность (MM, MSK)
Крайние зоны литосферных плит						
4,3	4,0	4,3	3,0	4,1	10^{21}	IV
4,8	4,5	4,8	3,6	4,5	10^{22}	V
5,3	5,0	5,3	4,6	5,2	10^{23}	VI
5,8	5,5	5,8	5,6	5,8	10^{24}	VII
6,6	6,0	6,3	6,6	6,6	10^{25}	VIII
7,3	6,5	6,8	7,3	7,3	10^{26}	IX–X
8,2	7,0	7,3	8,2	8,2	10^{27}	XI–XII
Внутренние зоны литосферных плит*						
4,3	4,0	—	2,9	3,8	10^{21}	IV
4,8	4,5	—	3,4	4,1	10^{22}	V
5,1	5,0	—	4,4	4,8	10^{23}	VI
5,4	5,5	—	5,4	5,4	10^{24}	VII
6,4	6,0	—	6,4	6,1	10^{25}	VIII
7,4	6,5	—	7,4	6,8	10^{26}	IX–X
8,4	7,0	—	8,4	7,4	10^{27}	XI–XII

* M_L для внутренних зон плит обычно не применяется.

лишь в выборе наилучшего способа определения этой зависимости для данного толчка в данном регионе Земли. Поэтому *магнитудой по шкале Рихтера* M называются магнитуды M_L до 5,9, M_S в интервале 5,9–8,0 и M_W до 8,3 в крайних частях плит.

Землетрясение с магнитудой 7 и выше по шкале Рихтера может стать крупной катастрофой в плотно населенных местах земного шара (табл. 2). Недавний пример — землетрясение близ г. Кобе в Японии 17 января 1995 года с $M = 7,2$: погибли 6300 человек, разрушено 200 тыс. зданий, ущерб составил около 100 млрд долларов. Самые сильные из зарегистрированных толчков — это землетрясение в Колумбии и Эквадоре в 1906 году и Санрику в Японии в 1933 году, магнитуда которых достигла $M_L = 8,9$. Землетрясения с магнитудой выше 4,5 регистрируются сейсмографами во всем мире, а близкий толчок с $M = 5$ может повредить дымовые трубы и штукатурку. Воздействия же с $M < 2$ даже ощущаются редко. Сильные землетрясения, особенно мелкофокусные, часто сопровождаются *афтершоками* — многочисленными (до тысячи) толчками меньшей энергии.

К счастью, слабых землетрясений гораздо больше, чем сильных (табл. 3): во всем мире ежегодно происходит около 20 толчков с $M > 7$, порядка 1000 с $M > 5$ и более 100 тыс. ощутимых толчков вообще. В последнее десятилетие наблюдается уменьшение среднегодового количества сильных землетрясений по сравнению с их среднеголетним числом (табл. 3). За 1975–1997 годы во всем мире произошло всего 308 толчков с магнитудой более 7, и из них

Таблица 2. Самые разрушительные землетрясения мира (данные Национального информационного центра землетрясений (NEIC) при Геологической службе США, 1997)

Дата	Место	Число жертв	Магнитуда
23 января 1556 года	Шанси, Китай	830 000	–
27 июля 1976 года	Таншань, Китай	255 000	8,0
9 августа 1138 года	Алеппо, Сирия	230 000	–
22 мая 1927 года	Кхининг, Китай	200 000	8,3
22 декабря 856 года	Дамган, Иран	200 000	–
16 декабря 1920 года	Гансю, Китай	200 000	8,6
23 марта 893 года	Ардабил, Иран	150 000	–
1 сентября 1923 года	Кванто, Япония	143 000	8,3
28 декабря 1908 года	Мессина, Италия	100 000	7,5
Сентябрь 1290 года	Чихли, Китай	100 000	–
Ноябрь 1667 года	Шемаха, Кавказ	80 000	–
18 ноября 1727 года	Табриз, Иран	77 000	–
1 ноября 1755 года	Лиссабон, Португалия	70 000	8,7
25 декабря 1932 года	Гансю, Китай	70 000	7,6
31 мая 1970 года	Перу	66 000	7,8

лишь 32 глубокофокусных (глубже 70 км). Существует и верхний предел силы землетрясений: он определяется прочностью пород, что ограничивает возможную величину накопленных напряжений. Иначе в соответствии с законом повторяемости землетрясений разной силы хотя бы раз в столетие должны были происходить землетрясения с $M = 10$, а такой ужасный толчок сотряс бы целиком всю планету.

Подчеркнем еще раз разницу между энергией землетрясения, оцениваемой по шкале магнитуд, и интенсивностями по шкалам Меркалли, MSK и др. Интенсивности толчка в разных пунктах разные, их столько же, сколько наблюдателей, магнитуда же у него лишь одна, даже если ее оценки на разных сейсмостанциях расходятся. И если неграмотный

Таблица 3. Частота землетрясений разной силы во всем мире (с 1900 года) (по данным Национального информационного центра землетрясений (NEIC) при Геологической службе США, 1997)

Категория землетрясения	Магнитуда	Среднегодовое количество землетрясений
Катастрофические	8 и выше	1
Очень сильные	7–7,9	18
Сильные	6–6,9	120
Умеренные	5–5,9	800
Легкие	4–4,9	6 200*
Слабые	3–3,9	49 000*
Очень слабые	< 3,0	2–3, около 1000 ежедневно 1–2, около 8000 ежедневно

* Расчетные значения.

телекомментатор говорит, что где-то произошло землетрясение “силой 10 баллов по шкале Рихтера” – не дайте себя запутать этой бессмыслицей: магнитуда не измеряется в баллах, а шкалы интенсивности по Рихтеру не существует.

ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ И ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЙ

Как видно из табл. 2, массовая гибель людей при разрушительных землетрясениях случалась в разные исторические эпохи и при разном уровне развития строительного дела. Еще около 10 года до н.э., во времена Августа, будущий император Тиберий, по сообщению Светония, “поддержал перед сенатом просьбу городов Лаодикеи, Фиатир и Хиоса, пострадавших от землетрясения и умолявших о помощи”. Между тем причины, вызывающие разрушения сооружений и человеческие жертвы, могут быть разнообразны. Так, землетрясение Кванто (табл. 2) 1923 года, разрушившее Токио и Иокогаму, сопровождалось пожарами, которые и вызвали огромное число жертв: японские деревянные дома с внутренними перегородками, затянутыми бумагой, традиционно отапливаются открытыми жаровнями с древесным углем, которые, естественно, переворачиваются при землетрясении. Водопроводные системы тоже выходят из строя. Разрушение Сан-Франциско при землетрясении 18 апреля 1906 года с $M = 7,7$ также во многом связано с последовавшими пожарами. В прибрежных районах сейсмические толчки часто сопровождаются цунами, как это произошло при Мессинском землетрясении 1908 года в Италии и Лиссабонском землетрясении 1755 года (табл. 2). Но основная масса несчастных случаев

связана с разрушением самих зданий. Отчего же это происходит?

Сейсмический толчок вызывает низкочастотные колебания сооружений. Поскольку они обладают большой массой, то при колебаниях возникают значительные силы инерции, в результате чего в различных местах конструкций генерируются высокие механические напряжения (сжатия–растяжения и сдвига), которые могут превысить прочность материала в том или другом месте и привести к повреждениям или даже к обрушению всего сооружения. Поэтому в сейсмичных районах возводятся здания с антисейсмическим усилением в уязвимых местах конструкции. Проектирование осложняется тем, что в зависимости от спектра толчка, угла подхода волн к поверхности, типа и жесткости сооружения, формы и глубины заложения фундамента и других факторов могут одновременно возбуждаться разные пространственные формы (или *моды*) колебаний как сооружения в целом, так и его конструктивных частей (рис. 3). В общем случае сооружение как свободное тело в пространстве имеет шесть степеней свободы и соответствующие им разные пространственные формы, или моды колебаний: три простых поступательных перемещения (вертикальное – 1 и два горизонтальных – 2, 3) и три вращательных перемещения: маятниковые колебания, или боковая качка, – колебания вокруг продольной оси (4); галопирование, или продольная качка, – колебания вокруг поперечной оси (5); вилияние – колебания вокруг вертикальной оси (6). Вибрации произвольного сооружения с фундаментом являются результатом наложения разных мод колебаний, для каждой из которых существует собственная частота колебаний.

Очевидно, что на колебания сооружения влияют и грунты, на которых оно стоит. Важнейшей задачей при расчете колебательной системы сооружение–основание по всем модам является прогноз ее резонансных частот и пиковых амплитуд смещения, рассматриваемых как предельные – самые неблагоприятные условия работы сооружения. Дело в том, что в спектре сейсмической волны присутствуют колебания с частотами, близкими к собственной

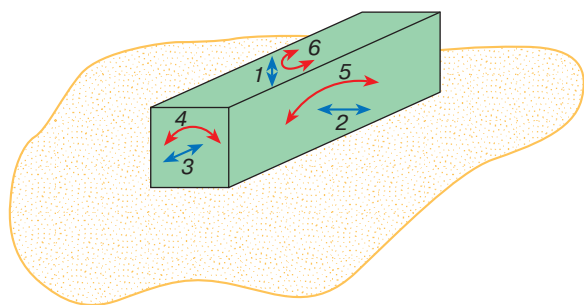


Рис. 3. Моды колебаний (пояснения в тексте)

частоте ряда сооружений, которая для разных мод часто составляет от долей до первых герц (характерные периоды от 0,2 до 2 с). При возникновении резонанса резко возрастают напряжения по контакту фундамента с грунтом, а также в самой конструкции сооружения и вероятность его разрушения повышается. Особенно опасно резонансное усиление маятниковых колебаний – когда центр тяжести сооружения значительно удален от точки его опоры, что характерно для мостовых опор, труб и высотных зданий вообще.

Итак, сейсмический эффект определяется в основном тремя параметрами: уровнем амплитуд, преобладающим периодом и продолжительностью колебаний. Последний фактор может иметь решающее значение для устойчивости сооружений, и кратковременная нагрузка даже с весьма высоким ускорением может оказаться неопасной для многих из них. Показательна запись, полученная у Паркфилда при Калифорнийском землетрясении 27 июня 1966 года: максимальные ускорения на поверхности достигали 0,5g, что соответствует 10-балльному толчку, но из-за краткости воздействия не было существенных повреждений зданий. А длящееся сравнительно долго (несколько десятков секунд) малоамплитудное воздействие может привести к серьезным разрушениям. Яркий пример этого – полное разрушение многоэтажных зданий в центре Мехико при землетрясении 28 июля 1957 года с максимальными ускорениями лишь 0,05–0,1g.

Задача усложняется плохо прогнозируемыми эффектами резонансного усиления сейсмических колебаний рыхлыми приповерхностными грунтами: в зависимости от их типа и мощности пластов колебания одних частотных интервалов могут избирательно усиливаться, а других практически полностью поглощаться. Явление это связано с возбуждением собственных колебаний самого пласта вблизи свободной поверхности в волнах данного типа. Так, при землетрясении Лома Приета в Калифорнии (1989 год) с $M = 7,1$ более всего пострадала часть Сан-Франциско, расположенная на молодых морских глинистых отложениях. Сейсмограммы показали, что по сравнению с другими участками амплитуды сейсмических колебаний на этих грунтах были усилены в 6–10 раз для колебаний с частотами около 1 Гц и в 2–3 раза с частотами 3–5 Гц. Собственные же частоты многих разрушенных 3–4-этажных домов составляли как раз 2,5–3 Гц. Еще более драматичен пример Мехико, расположенного в 300 км от эпицентра землетрясения 1985 года с $M = 8,1$. В отдельных частях города резонансное усиление сейсмических колебаний с периодами около 2 с достигло 75 раз. Это привело к избирательному тотальному разрушению 15–25-этажных зданий с близкими резонансными периодами и к гибели 10 тыс. человек.

Поэтому для того, чтобы спроектировать устойчивое здание, необходимы не только сведения о силе

и месте возможных землетрясений, но и надежные данные о вынужденных колебаниях сооружения на тех или иных грунтах основания. Для этого определяются некоторые характеристики грунта, такие, как его динамические модули сжатия и сдвига, коэффициент затухания, а в зависимости от них для расчетов принимается одна из возможных моделей поведения грунтового основания. Например, во многих случаях оказывается возможным применение достаточно простой модели упругого полупространства: при этом можно свести задачу к расчету колебаний твердого тела с известной массой на поверхности упругой, однородной, изотропной и непрерывной среды. Но существуют и более сложные модели, учитывающие вязкие свойства грунтов, их неизотропность, слоистость [1], и поиски более корректных моделей продолжаются.

Однако коварство многих рыхлых увлажненных грунтов (песков, глин, суглинков, то есть таких, которые обычно залегают с поверхности земли) заключается в способности менять свои механические свойства при прохождении через них упругих волн. Суть такого эффекта заключается в следующем. Указанные грунты состоят из мелких и мельчайших (до сотых и тысячных долей миллиметра) минеральных частиц, в промежутках (порах) между которыми находятся вода и газы. Все сопротивление такого грунта внешней нагрузке, например весу стоящего на нем здания, осуществляется за счет огромного числа контактов между этими частицами, многие из которых очень слабые. При прохождении упругой волны возбуждаются колебания частиц грунта с разными скоростями и часть контактов (тем большая, чем выше энергия волны) разрушается. В результате прочность грунта заметно (иногда в несколько раз) снижается, а стоящее на нем сооружение может осесть вглубь, перекошиться или опрокинуться. Некоторые водонасыщенные грунты (в особенности мелкие рыхлые пески) могут даже разжижаться при достаточно сильном сейсмическом воздействии: при исчезновении непосредственного

контакта между песчаными зернами они в какой-то момент оказываются как бы взвешенными во вмещающей их воде (рис. 4). Вода при этом стремится отжаться, но процесс этот требует некоторого времени, поскольку ограничивается водопроницаемостью грунта. В результате сейсмическое разжижение грунтов обычно сопровождается тяжелыми авариями даже сейсмостойких сооружений: здания успевают “утонуть” или перекошиться, дороги разрываются на поверхности разжиженных отложений, а подземные емкости с горючим, наоборот, всплывают на поверхность, затопленную невесть откуда взявшейся грязной водой. Происходят даже выбросы разжиженного грунта на поверхность с образованием песчаных кратеров. Катастрофическое разжижение водонасыщенных пылевато-песчаных грунтов, вызвавшее жертвы и огромный экономический ущерб, произошло при двух сильных землетрясениях 1964 года: 27 марта у берегов Аляски близ Анкориджа с $M = 8,4$ и 16 июня в Ниигате (Япония) с $M = 7,5$.

Сейсмическое воздействие может нарушить равновесие значительного объема горных пород на склоне и привести к образованию крупных оползней и обвалов, которые сами по себе могут стать еще одной причиной жертв и разрушений. Оползни срываются вниз вместе с расположенными на них сооружениями, сметая все на своем пути, и могут похоронить целые поселки и даже города. Так, при Хаитском землетрясении 1949 года с $M = 8,0$ в Таджикистане 25 тыс. человек погибли под обвалами и оползнями. С ними была связана гибель людей при землетрясениях в Гансю в 1920 году и в Перу в 1970 году (см. табл. 2). Список этот можно продолжать. Первые документальные свидетельства о сейсмогенных оползнях относятся к 372 году до н.э. (еще до рождения Александра Македонского). Разжижение или частичная потеря прочности грунтов способствуют возникновению оползней при землетрясениях, но могут быть и их непосредственной причиной. Так, 264 жертвы Гиссарского толчка

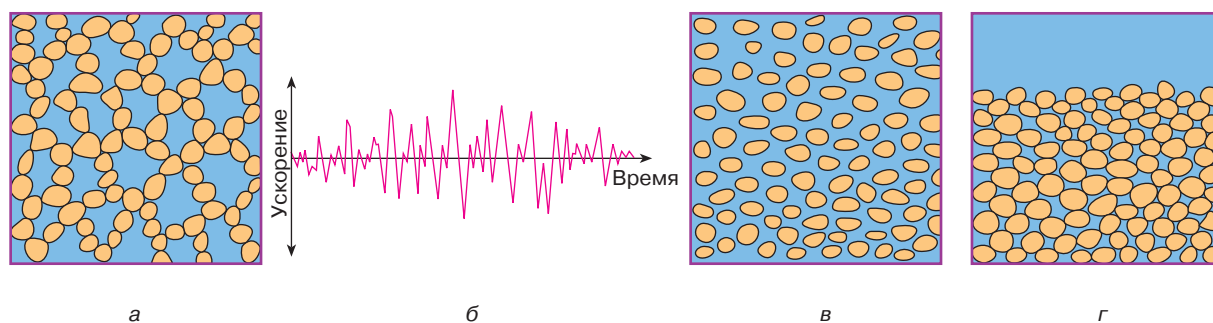


Рис. 4. К пояснению причины разжижения грунтов: а – рыхлый водонасыщенный песок с крупными порами до землетрясения; б – сейсмический толчок – характерная запись изменения ускорения колебаний во времени; в – момент разжижения – связи между частицами грунта разорваны, и они оказываются взвешенными в воде; г – уплотненный песок после отжатия воды и оседания частиц

(Таджикистан) с $M = 5,5$ 22 января 1989 года были накрыты катастрофическим оползнем-потоком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, что же мы знаем и умеем для обеспечения относительной сейсмической безопасности? Мы умеем измерять силу толчка и даже частично усмирять ее с помощью *демпферов* – устройств, поглощающих энергию сейсмических волн. Например, специальные резиновые элементы устанавливаются на опорах мостов под пролетным строением, предотвращая их разрушение. Мы умеем строить карты сейсмичности, возводить здания с антисейсмическим усилением, в момент толчка блокировать магистральные трубопроводы и городские коммуникации – ведь многие пожары при землетрясениях начинались из-за разрывов городских газопроводов. Так, японская корпорация “Akashi” выпускает сейсмические заглушки для трубопроводов, срабатывающие по радиосигналу от удаленного сейсмографа, установленного возможно ближе к предполагаемому эпицентру. Растет чувствительность измерительной аппаратуры. Но многого мы еще не умеем, и Земля постоянно напоминает нам об этом.

Мы не умеем надежно предсказывать место, время и силу землетрясений, а наша оценка вероятности будущих толчков, особенно сильных, во многих регионах оказывается далека от реальности. Это усугубляется быстрым ростом городского населения, особенно в развивающихся странах, где и качество проектов и строительства, и соблюдение строительных норм, и надежность оценки сейсмической опасности очень низки. В результате число жертв землетрясений равной силы в городах развитых стран в сотни раз меньше: при двух последних землетрясениях в густонаселенной Калифорнии (Лома Приета, 1989 год и Нортридж, 1994 год) погибли 130 человек, а при двух толчках такой же силы в Армении (Спитак, 1988 год) и на Сахалине (Нефтегорск, 1995 год) – более 27 тыс. человек. По данным “GeoHazards International”, существует высокая вероятность землетрясения силой не менее 9 баллов MSK вблизи одной из столиц государств Средней Азии в ближайшие 20 лет. При нынешнем состоянии сооружений в этих городах от него может погибнуть от 25 тыс. до 75 тыс. человек.

Но и в развитых странах землетрясения разрушают дороги, мосты и самые надежные здания со стальным каркасом, прерывают подачу воды и электроэнергии, вызывают взрывы и пожары. Один из

недавних и впечатляющих примеров – Калифорнийское землетрясение 17 января 1994 года с $M_s = 6,8$ и эпицентром в Нортридже близ Лос-Анджелеса. При толчке погибли 63 человека. Но по уровню нанесенного ущерба (свыше 30 млрд долларов) это землетрясение стало самым “дорогостоящим” за всю историю США. При толчке были зафиксированы невероятно высокие вертикальные и горизонтальные ускорения колебаний – до $1,8g$, а большая часть аварий оказалась связана с разжижением грунтов и оползнями, а также с усилением колебаний в приповерхностных грунтах.

Разрушение современных надежных сооружений при землетрясении обычно связано не с низким качеством строительства, а с неблагоприятным поведением рыхлых грунтов основания и вызывается эффектами: а) избирательного усиления колебаний определенных частот, б) разжижением грунтов или частичной потерей их прочности, в) возникновением оползней на склонах, в том числе и в результате разжижения грунтов. Дополнительные сложности создают пока еще плохо поддающиеся аналитическому рассмотрению особенности взаимодействия колеблющегося сооружения с грунтами его основания. Решением этих важных и интересных проблем и занимается современная динамика грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский Е.А. Динамические свойства грунтов и их учет при анализе вибраций фундаментов разного типа // Геоэкология. 1993. № 5. С. 37–65.
2. Короновский Н.В. Напряженное состояние земной коры // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 1. С. 51–56.
3. Сейсмический риск и инженерные решения: Пер. с англ. / Под ред. Ц. Ломнитца, Э. Розенблюта. М.: Недра, 1981. 375 с.
4. Эйби Дж.А. Землетрясения: Пер. с англ. М.: Недра, 1982. 263 с.

* * *

Евгений Арнольдович Вознесенский, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии и охраны геологической среды геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Специалист в области грунтоведения и инженерной геодинамики. Основная область научных интересов: динамика грунтов и сейсмостойкое проектирование. Автор более 50 научных работ и двух учебных пособий.