

С. В. ПУЧКОВ

О ПРОГНОЗЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ СИЛЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНАХ СТРОИТЕЛЬСТВА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ*

На основе теории предельной силы землетрясений на различных грунтах излагаются возможности прогноза максимальной силы сотрясений при сильных землетрясениях в районах строительства гидротехнических сооружений.

1. При проектировании и строительстве гидротехнических сооружений в сейсмических районах возникает проблема прогноза предельной (максимальной) силы землетрясений в данном районе, на которую надо рассчитывать сооружение.

Для этой цели обычно используются исторические сведения о сильных землетрясениях, происшедших в этих районах. Какая была максимальная балльность предыдущего сильного землетрясения, такой она устанавливается и в настоящее время, хотя условия возникновения землетрясений может быть и изменились. В результате такого положения иногда случалось, что на основании прошлого землетрясения балльность в данном районе устанавливалась ниже, чем балльность последующего землетрясения. Так, например, случилось при Ашхабадском землетрясении. Согласно прежнему землетрясению Ашхабадский район был отнесен к 7 баллам, а землетрясение 1948 г. оказалось силою 9—10 баллов.

На основе инструментальных наблюдений строятся графики повторяемости землетрясений для данного района, из которых устанавливается периодичность повторения землетрясений различной силы. Однако построение этих графиков происходит в основном по слабым землетрясениям, а прогноз по ним пытаются делать о сильных землетрясениях.

Правомерность такого метода еще нельзя считать доказанной. Сопоставляя между графиками повторяемости, предельной силой и временем возникновения землетрясения в действительности пока еще не существует. Поэтому построение графиков повторяемости имеет лишь чисто методический характер.

Анализируя историю землетрясений, в принципе можно утверждать, что в тех районах, где имеются очаги слабых тектонических землетрясений, там можно ожидать и сильные разрушительные землетрясения. Примеры подобного рода можно найти в различных зонах землетрясений территории СССР и других стран. В частности, в упоминаемой выше Ашхабадской зоне по историческим данным до 1948 г. сильных разрушительных землетрясений не было свыше 500 лет, но

* Редколлегия считает пока еще недостаточно обоснованной фактами и теорией интересную точку зрения автора о зависимости предельной интенсивности землетрясения в данном пункте от прочности горных пород.

слабые не прекращались в течение всего времени. Они как бы предсказывали, что сейсмическая катастрофа в этом районе постепенно подготавливается и неминуемо произойдет. И есть основания считать, что чем длительнее подготавливается землетрясение, тем сильнее оно будет.

В дальнейшем, по-видимому, откроется возможность прогноза предельной силы землетрясений в очаге. Но распределение этой силы на поверхности земли все равно будет зависеть от грунтовых условий. Вот почему важно уже сейчас в оценке силы сотрясений на поверхности земли в районах строительства земляных плотин учитывать теорию предельной силы землетрясений на скальных породах. Ниже дается изложение этой теории применительно к данному направлению исследований.

2. Детальный инженерный анализ повреждений и разрушений зданий и сооружений, расположенных на различных грунтах, при сильных и разрушительных землетрясениях, происшедших на земном шаре в различное время, показывает, что сила разрушительного землетрясения на скале, расположенной вне зоны разрывов, является наименьшей и находится где-то около 7 баллов. Это наблюдалось при Лиссабонском землетрясении 1755 г., Калифорнийском 1906 г., Мессинском 1908 г.; Фукуйском 1946 г., Ашхабадском 1948 г. и Хаитском землетрясении 1949 г. и др. Можно привести много конкретных примеров [1], из которых следует указанный инженерно-статистический вывод.

3. Попытаемся дать теоретическое обоснование этому инженерно-статистическому выводу. Для этого рассмотрим распространение сейсмической энергии от очага землетрясения к поверхности земли методом геометрической сейсмики [2, 3]. Будем предполагать, что земная кора в окрестности очага землетрясения является однородной и изотропной, а вблизи поверхности земли могут быть, наряду с зонами скальных пород, и зоны песчано-глинистых отложений. Энергия, идущая от очага землетрясения вдоль сейсмических лучей, может прийти к поверхности или только по скальным породам или после скальных пород через слой песчано-глинистых отложений. В этом случае на границе слоя и полупространства поток энергии претерпевает изменение. Его можно учесть, используя законы преломления и отражения сейсмических волн.

С помощью метода геометрической сейсмики можно установить, что интенсивность волны, идущей вдоль сейсмического луча, оценивается произведением

$$v^2 c \rho = F = \text{const}, \quad (1)$$

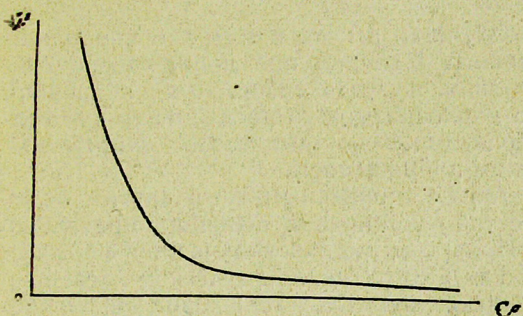
где v — скорость колебаний частиц среды, c — скорость распространения волн и ρ — плотность среды.

Если откладывать по оси абсцисс акустические жесткости грунтов в порядке их возрастания, а по оси ординат — квадраты скоростей колебаний частиц, то графиком этой зависимости будет гиперболическая кривая (фиг. 1). Согласно этой кривой на слабых грунтах с малыми значениями акустической жесткости сейсмические колебания будут обладать большими скоростями колебаний частиц. По мере перехода к плотным породам акустическая жесткость увеличивается, а скорость колебаний частиц уменьшается. В пределе, когда акустическая жесткость стремится к наибольшему значению, скорость колебаний частиц стремится к некоторой постоянной величине. Тогда можно записать

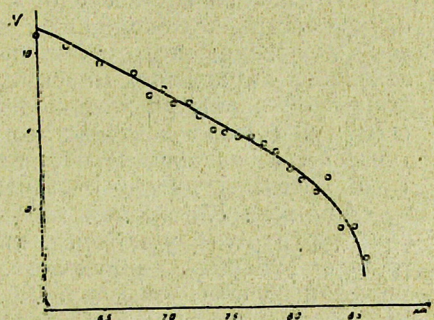
$$v^2 = f(c\rho) \rightarrow \text{const}. \quad (2)$$

$c\rho \rightarrow \infty$

По современным воззрениям напряжения в земной коре распределяются неравномерно. В районах будущих сильных землетрясений происходит процесс постепенного накопления напряжений, которые, достигая предела временного сопротивления, доводят материал земной коры до разрушения, сопровождающегося землетрясениями. Сейсмические волны, образующиеся в результате землетрясения в этих породах, по своей природе не могут вызвать напряжений выше прочности материала, в котором они распространяются. С другой стороны, мы имеем график повторяемости сильных землетрясений (фиг. 2), составленный Гутенбергом и Рихтером [4] для глубины от 0 до 60 км. Здесь по оси ординат отложена частота N землетрясений одной и той же величины в год, а по оси абсцисс — интенсивность землетрясений или магнитуда M . В области сильнейших землетрясений этот график наклоняется внутрь к направлению, параллельному оси ординат. Он стремится как бы отсечь на оси абсцисс предельную величину энергии сильного землетрясения, выше которой они не бывают.



Фиг. 1. Изменение скорости колебаний в зависимости от акустической жесткости.



Фиг. 2. Кривая повторяемости сильных землетрясений земного шара.

Таким образом, можно считать установленным, что энергия землетрясения, определяемая предельными разрушающими напряжениями горных пород, беспредельно не увеличивается. Поэтому сила землетрясения ограничена и не превосходит определенного предела. В соответствии с этим поток энергии не может быть выше наперед заданной величины, хотя от одного землетрясения к другому она может измениться. Ввиду этого формула (1) переписывается в следующем виде:

$$v^2 c_p = F \leq F_0. \quad (3)$$

Напряжение в проходящей сейсмической волне равно

$$v c_p = \sigma. \quad (4)$$

Для того, чтобы при знакопеременных динамических напряжениях порода не разрушалась, необходимо ввести известный запас прочности n . Тогда будем иметь:

$$v c_p = \sigma \leq n \sigma, \quad (5)$$

где n для плотных пород обычно бывает порядка 5—10.

Так как правая часть выражения (5) не может быть выше разрушающего напряжения σ_R материала породы, то получаем

$$n \sigma = \sigma_R. \quad (6)$$

Сочетание формул (3), (5) и (6) дает

$$v \leq \frac{F_0}{R}.$$

(7)

При этом мы не учитываем возможные случаи преломления и отражения потока энергии, идущего от очага землетрясения к поверхности земли; не учитываем поглощения энергии с расстоянием, ибо оно, как известно, мало по сравнению с расхождением, которое оценивается формулой (8), и не может существенно изменить результата. Здесь имеется в виду наименьшая прочность при динамическом разрушении породы. Величина ее оценивается следующим образом. В результате землетрясения возникают сейсмические волны, которые распространяются от источника в окружающую среду и создают в ней ряд перемен давления, ограниченной продолжительности. Число этих перемен обычно исчисляется от 100 до 1000. Из-за отсутствия опытных данных о пределе прочности скальных пород при действии сейсмических нагрузок мы отождествим его с пределом прочности при статическом разрушении. По некоторым косвенным опытным данным отклонение в этом случае составляет около 20%.

Объяснение этого, по-видимому, надо искать в том, что продолжительность нарастания максимального давления при прохождении сейсмической волны значительно больше периода собственных колебаний скалы, и поэтому действие этого давления можно расценивать как статическое, и, следовательно, разрушающее динамическое напряжение можно отождествить со статическим напряжением.

Формула (7) применима не только к скальным, но и другим более слабым грунтам, у которых имеется устойчивая величина предельного разрушающего напряжения. Проведем анализ полученной формулы применительно к этим случаям. Так как поток сейсмической энергии в эпицентральной зоне или двух близких пунктах наблюдения на различных грунтах остается постоянным, во выражение (7) в координатах (v , σ_R), представляет собой гиперболу. Она показывает, что при малых разрушительных напряжениях, которые соответствуют слабым грунтам, скорость колебаний частиц оказывается наибольшей. По мере перехода к большим напряжениям, отвечающим более плотным и скальным грунтам, эта скорость уменьшается и в пределе, когда $\sigma_R \rightarrow \infty$, она становится почти постоянной и наименьшей из всех возможных скоростей колебаний частиц на различных грунтах при сильных землетрясениях. Таким образом, при выборе площадок для строительства можно заранее оценить возможные сотрясения при будущих сильных землетрясениях. Но для этого необходимо иметь достаточно точное значение разрушающего напряжения грунта под будущим сооружением.

4. Принимая наименьшую прочность для скалы равной 50 кг/см², рассчитаем предельную величину скорости колебаний частиц на поверхности скальных пород достаточно большой мощности при разрушительном землетрясении. По данным инструментальных измерений наиболее часто встречающаяся максимальная величина энергии разрушительного землетрясения составляет 10²⁵ эргов. Она связана с потоком энергии формулой

$$E = \int_S \int_T F_0 dS dt = F_0 ST. \quad (8)$$

Полагая, что $S = 2\pi R^2$, где R — гипоцентральное расстояние, а $T = \Sigma \tau_i$ — продолжительность колебательного процесса в точке наблюдения от ряда последовательных толчков сильного землетрясения.

Пусть гипоцентральное расстояние $R=30$ км, а длительность T процесса сейсмических колебаний при сильном землетрясении порядка 5 мин. Последнее основывается на том, что продолжительность колебательного процесса при Верненском землетрясении 1887 г. была 5 мин., при разрушительном Японском землетрясении 1923 г. свыше 4 мин. и при катастрофическом землетрясении в Чили в 1960 г. составляла 4—5 мин. Тогда величину потока энергии будем иметь равной

$$F_0 = 600 \text{ кг/см. сек.}$$

Откуда по формуле (7) получаем

$$v \leq 12 \text{ см/сек.}$$

что соответствует приблизительно силе землетрясения в 7 баллов.

Нейман [5] для такой силы землетрясения дает скорость колебаний частиц 9 см/сек. По данным инструментальных наблюдений в Прибайкальской экспедиции на известняках при 6-балльном сотрясении 29 августа 1959 г. скорость колебаний частиц была в пределах от 5 до 6 см/сек, что для 7 баллов будет соответствовать 10—12 см/сек.

По многочисленным исследованиям эффекта взрывов на сооружениях установлено, что при скорости колебаний частиц 12—14 см/сек в зданиях и сооружениях трескается и обваливается штукатурка, падают печные трубы, а иногда появляются трещины в капитальных стенах. Подобные повреждения обычно относятся к 7-балльному толчку.

Инструментальная оценка балльности на различных грунтах представляет очень редкое явление. Нейман [6] приводит ускорения 10 сильных землетрясений на различных породах. Он показал, что наибольшая интенсивность, записанная на граните при сильных землетрясениях в Элена, Эль-Центро и Олимпия была 7,2 балла при периоде 0,3 сек и 6,7 балла при периоде 2 сек и выше. При этом период 0,3 сек на всех расстояниях соответствовал наибольшему измеренному ускорению.

Таким образом, всестороннее исследование рассматриваемой проблемы приводит к убеждению, что на скальных породах сила землетрясения бывает около 7 баллов. Для сильно трещиноватых и выветренных скальных пород, а также сложного рельефа, предельная балльность может несколько увеличиваться. Исключаются движения по разрывам, оползни и обвалы.

5. Предельная скорость колебаний на скале дает возможность построить спектральную кривую ускорений, которая может быть принята в качестве эталона. На других грунтах скорости колебаний будут выше, и соответственно этому возрастут и спектры ускорений. Для их построения можно воспользоваться приращением интенсивности сейсмических колебаний на основе инструментальных наблюдений при слабых близких землетрясениях.

В этом случае следует применить формулу приращения балльности на основе записей колебаний на различных грунтах. Приведем вывод этой формулы. Как известно, при изменении силы землетрясения на один балл ускорение колебательного движения увеличивается по закону геометрической прогрессии со знаменателем 2. Опытные данные, полученные за последние годы, подтверждают эту точку зрения [7]. Поэтому мы можем написать, что приращение балльности при переходе от одних грунтовых условий к другим определяется формулой вида

$$2^{\Delta B} = \frac{w_{gp}}{w_{ск}}. \quad (9)$$

Логарифмируя это выражение, получим приращение балльности

$$\Delta B = \frac{1}{\lg 2} \cdot \lg \frac{w_{zp}}{w_{ск}}$$

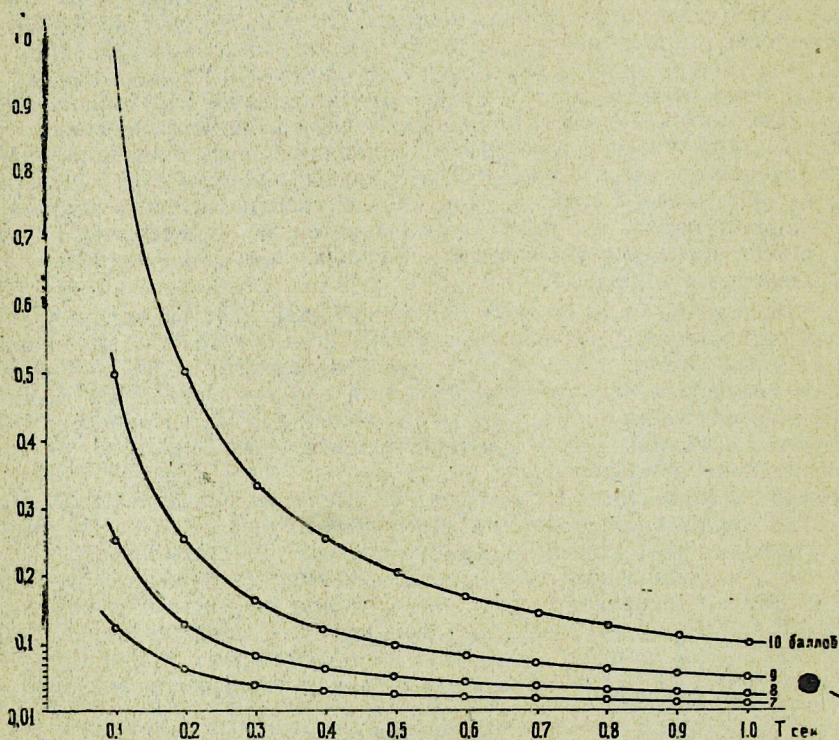
Или, если $w_{zp} = 2w_{ск}$, то сила землетрясения изменилась на $\Delta B = 1$ балл. Следовательно, при переходе от одного балла к другому ускорение сейсмического движения увеличивается в 2 раза. Если принять, что колебательное движение гармоническое, тогда для ускорений можно написать

$$w_{zp} = 4\pi^2 \frac{A_{zp}}{T_{zp}^2} \text{ и } w_{ск} = 4\pi^2 \frac{A_{ск}}{T_{ск}^2}.$$

При этих условиях приращение балльности будем иметь

$$\Delta B = 3,3 \lg \frac{A_{zp}}{A_{ск}} + 6,7 \lg \frac{T_{ск}}{T_{zp}}, \quad (10)$$

где A_{zp} и $A_{ск}$ — амплитуды колебаний при землетрясении на искомым грунте и эталонном или скальном грунте, T_{zp} и $T_{ск}$ — соответствующие им преобладающие периоды колебаний. Спектры приведенных сейсмических ускорений на различных грунтах при сильных землетрясениях в зависимости от величины периода колебаний в проходящих сейсмических волнах представлены на фиг. 3.



Фиг. 3. Спектры ускорений сильных землетрясений на различных грунтах.

Таким образом, в каждой сейсмической области за пределами зон разрывов, по которым возникают сильные землетрясения, для любого распределения грунтов можно прогнозировать предельную силу сотрясений при разрушительном землетрясении. На скальных грунтах она будет где-то около 7 баллов, а на слабых песчано-глинистых отложениях может достигать 9—10 баллов.

Опыт показывает, что подобная дифференциация силы сотрясения между различными типами грунтов останется даже и в том случае, когда произойдет сильное, но не разрушительное землетрясение. В этом случае сила землетрясения на скале может оказаться меньше предельной, и соответственно этому она уменьшится также и на песчано-глинистых грунтах, но всегда останется выше, чем на скале. Это указывает на существование определенной закономерности в распределении интенсивности сейсмических колебаний на различных грунтах при землетрясениях.

Шкала балльности сильных землетрясений на различных грунтах

Наименование породы	Баллы	Скорость колебаний частиц, см/сек
Скальные породы (граниты, известняки, песчаники). Скорость продольных волн $\alpha=5,6-2,1$ км/сек	7	12
Меловые отложения (мергели, галечники, плотные сухие пески и глины). Скорость продольных волн $\alpha=2,1-0,9$ км/сек	8	25
Грунты средней прочности (пески, глины, суглинки). Скорость продольных волн $\alpha=0,9-0,6$ км/сек	8—9	25—50
Слабые грунты (пески, глины, суглинки и супеси). Скорость прод. волн $\alpha=0,6-0,2$ км/сек	9—10	50—100

Эта шкала дает примерную характеристику изменения интенсивности сейсмических колебаний при переходе от одних грунтов к другим. Основы построения шкалы балльности и спектров ускорения изложены в работе [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Пучков. О предельной силе землетрясений на скальных породах. Изв. АН СССР, сер. геофизическая, № 8, 1965.
2. С. В. Пучков. Инструментальное сейсмическое микрорайонирование зоны Ашхабадского землетрясения 1948 г. Тр. ИФЗ АН СССР, № 5, 1959.
3. С. В. Пучков. Об основах комплексного метода сейсмического районирования. Изв. АН СССР, сер. геофизическая, № 1, 1958.
4. В. Gutenberg, C. F. Richter. Seismicity of the earth, 1949.
5. F. Neumann. A broad formula for estimate earthquake forces on oscillators. Proc. of the second Conference on earthquake engin Voll. 2, 1960, P. 849.
6. F. Neumann. Earthquake intensity and related ground motion. 1954.
7. Б. К. Карапетян. Экспериментальное исследование вопросов инженерной сейсмологии, 1964. Автореф. докт. дисс.
8. С. В. Пучков. Спектры ускорений и скоростей сильных землетрясений, отнесенные к различным грунтам. Инженерная сейсмология, № 3—4, Душанбе, 1966.

Институт физики Земли
АН СССР