

УДК 550.34

*А.А. Гусев*

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВАРИАНТ РАСЧЕТНЫХ  
СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК  
ДЛЯ ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО**

В работе оцениваются характеристики колебаний грунта при сильнейших землетрясениях на восточном побережье Камчатки и на их основе предлагается предварительный вариант расчетных сейсмических нагрузок. Уровень нагрузок установлен, исходя из периода повторяемости расчетной нагрузки, равного 1000 лет. Проведенное исследование имеет в большей мере поисковый характер; во многих случаях принимались строго необоснованные и даже спорные решения. Это, по-видимому, неизбежно на современном уровне знаний в данной проблемной области. Мы старались отмечать подобные случаи, но не всегда приводили полное обоснование нашего выбора.

Конкретная оценка строилась для условий г. Петропавловска-Камчатского, типичных

для восточного побережья Камчатки и Курильских островов. Общее представление о характере сейсмической опасности здесь можно получить из [1]. С учетом этих данных наиболее существенной является угроза, создаваемая следующими тремя основными типами сильных землетрясений.

1. Мелкофокусные (глубина очага 0–60 км) землетрясения с магнитудой  $M = 7^{3/4} - 8^{1/2}$ . Их очаговые зоны достигают 600 км, имеют обычно удлинённые формы и протягиваются вдоль структур полуострова (вдоль побережья). Расстояние от Петропавловска-Камчатского до ближайшего участка осевой зоны подобного землетрясения 80–90 км. Период повторяемости подобных землетрясений в одном и том же месте около 150 лет [20]. Далее этот тип толчков обозначается Р8.

2. Землетрясения на глубине 60–140 км с магнитудой (моментной), равной 7,5–7,8, и гипоцентральной дистанцией 90–120 км от Петропавловска-Камчатского. Период повторяемости подобных толчков составляет приблизительно 200 лет. Этот тип толчков обозначаем РГ.

3. Мелкофокусные землетрясения в непосредственной окрестности города (ближе 20 км) с предельной магнитудой около 6,5. Период повторяемости подобных толчков составляет приблизительно 35 000 лет.

Приведенные оценки локальной повторяемости и гипоцентральных расстояний для трех типов землетрясений были получены при участии В.М. Зобина. Для толчка Р8 перепроверка гипоцентрального расстояния подтвердила старую оценку 80–90 км [1–3]. Повторяемость толчков Р8 определяли, разбив основную сейсмическую зону на две полосы – ближнюю (50–120 км) и дальнюю (120–200 км) от города). В ближней полосе наблюдаемая повторяемость на участке побережья Камчатки длиной около 750 км составляет около 1 раза в 50 лет. При расчетной длине очага 225 км (см. ниже) это дает для периода повторения значение 150 лет, совпадающее с оценкой [2].

Для толчков РГ повторяемость в полосе длиной 650 км, где располагаются очаги землетрясений с  $H = 70$ –140 км, была оценена как 1 раз в 20 лет, а длина участка полосы, занимаемого очагом, 60 лет. Это дает повторяемость толчков напротив заданной точки 1 раз в 200 лет. Гипоцентральное расстояние приняли, далее, за 100 км, исходя из типичной глубины условного центра очага 90 км и типичного эпицентрального расстояния 45 км.

Для близких толчков сначала определяли ожидаемое число толчков с  $M = 6,5$  на площади  $100 \times 100$  км вблизи города, с использованием графика повторяемости по 25-летним данным. Затем нашли повторяемость таких толчков в круге радиусом 20 км, полагая, что толчки с большими эпицентральными расстояниями не смогут создать сотрясения, сопоставимые по силе с сотрясениями от толчков типа Р8 и РГ. Оказалось, что для такого круга повторяемость составляет около 35 000 лет, так что связанной с этими толчками опасностью на данном этапе можно пренебречь. В этом отличие сейсмической опасности района Петропавловска-Камчатского от ситуации в Японии, где близкие толчки гораздо чаще. Для других участков восточного побережья Камчатки значение  $M_{\max}$  может быть иным, и проблему близких толчков следует для них обсуждать отдельно. Надо заметить, что достоверно известен только один мелкофокусный толчок с очагом на территории Камчатки (пос. Жупаново, 18.06.59 г.,  $M = 7$ ,  $I_0 = 10$ ).

Ниже будет показано, что ожидаемые амплитуды колебаний от источников типа Р8 и РГ сопоставимы, а ожидаемые спектры близки. В этих условиях с учетом общей неопределенности необходимо объединить результаты для этих типов источников. При этом целесообразно оценивать амплитуды колебаний для источника типа Р8, увеличивая расчетную частоту сотрясений. Суммируя два потока событий с периодами повторяемости 150 и 200 лет, получим поток с периодом повторяемости 86 лет.

Как известно, при расчетах сотрясаемости [1, гл. 8] считается, что балл и ускорение функционально связаны с магнитудой, в то время как [1, гл. 9] предлагается учитывать разброс силы сотрясений при фиксированной магнитуде. Второй подход в принципе явно предпочтительнее. В наших условиях это означает, что необходимо принимать во внимание наряду с Р8 и РГ и аномальные толчки с меньшими магнитудами.

Таблица 1

Сводка данных о сильных землетрясениях, спектры которых использованы для сравнений

Землетрясение	Индекс записи	Дата	Пункт регистрации	Грунт	$h$ , км	$M$	$\lg M_0$ , дин · см
Керн	K52	21.07.52	Тафт	Средний	—	7,6 (S)	27,2
Токачи	T68X	16.05.68	Хачинохе	Алловиальный	—	8,2 (S)	28,45
	T68M	—, —	Мияко	Скальный	—		
Ивато	И68	12.06.68	„	„	—	7,1 (S)	26,7
Петропавловское	П71	24.11.71	Петропавловск	„	100	7,2 (LH)	27,5
Усть-Камчатское	У71	15.12.71	Усть-Камчатск	Средний	—	7,9 (LH)	28,0
Мяги	M78	12.06.78	Офунато	„	—	7,6 (S)	27,5
Шикотанское	Ш78	06.12.78	Шикотан	Скальный	140	7,5 (LH)	27,6
Усть-Камчатское	У83	17.08.83	Крутоберегово	Средний	80	6,9 (PV)	26,6
„	У84	25.12.84	Африка	„	—	7,5 (LH)	27,35

Аккуратный учет данного фактора требует принятия некоторых гипотез о распределении толчков по магнитуде вблизи верхнего предела, что является дискуссионным вопросом. Альтернативные варианты — закон Гутенберга—Рихтера с  $M_{\max}$  или модель максимальной магнитуды — могут привести к очень широкому диапазону оценок. Автор с оговорками склоняется ко второй из этих моделей, но параметры ее в настоящее время все равно невозможно определить для наших условий. В этой ситуации мы приняли довольно произвольное решение и для учета описанного фактора увеличили расчетную повторяемость на 50%, с 1 раза в 86 лет до 1 раза в 58 лет. Из этой величины мы и будем исходить далее.

**Определение спектра реакции типичного сильнейшего землетрясения для скального грунта.** Первый этап работы — получение оценок типичных спектров реакции с использованием спектров Фурье. Сначала были определены формы спектра Фурье для землетрясений типа Р8 и РГ на расстоянии 80 км от оси очага. В связи с насыщением магнитудных шкал есть определенные трудности в выборе конкретного значения  $M$  для расчетов. Следуя [3], в качестве рабочего решения принято, что расчетный толчок имеет следующие параметры:  $M_{LH} = 8,25$ ;  $M_S = M_{JMA} = 8$ ;  $\lg M_0$  (дин · см) = 28,65;  $M_W = 8,4$ . Землетрясение такого масштаба не является абсолютным верхним пределом. Толчок 4.11.52 имел  $M_W = 8,9$ , но всего 7 баллов в Петропавловске-Камчатском при эпицентральной расстоянии около 100–180 км от оси очага. Толчки 25.06.04 имели  $M_{\max} \approx 8$  при том же удалении от очага, но дали сотрясения в 8 баллов. В выборе значения  $M_{LH} = 8,25$  есть определенный компромисс. Для  $M_W = 8,4$  длина очага  $L \approx 225$  км [4].

Для РГ также возникают сложности, так как шкалы  $M_{LH}$  и  $M_S$  неприменимы. Мы приняли для РГ  $\lg M_0 = 27,5$  ( $M_W = 7,65$ ). Примерно такое значение  $M_W$  имел толчок 24.11.71 (7 баллов в Петропавловске-Камчатском). Можно полагать, что это значение  $M_W$  близко к верхнему пределу.

Основной расчет в данном разделе проведем, положив для Р8 и РГ эффективное гипоцентральное расстояние (до осевой линии или до центра очага)  $r = 80$  км, а затем внесем поправки. Сначала определим форму спектра Фурье ускорения для скального грунта, используя наблюдаемые спектры. Затем отдельно определим уровень спектра на фиксированной частоте 1 Гц и, объединив оценки, найдем спектр Фурье. С учетом длительности определим затем спектры реакции.

Сводка данных об использованных записях и спектрах Фурье (все по литературным

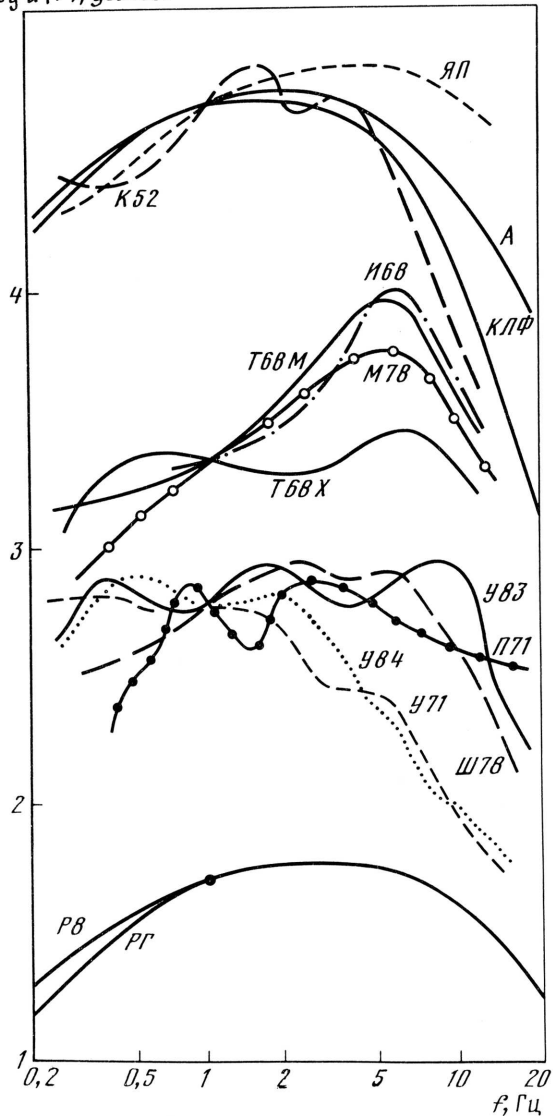


Рис. 1. Форма сглаженных амплитудных спектров Фурье ускорения для сильных землетрясений (см. табл. 1)

материалам и бюллетеням, кроме камчатских) приведена в табл. 1. Спектр И68 приведен для иллюстрации аномальности в пункте наблюдения Мияко, где получена уникальная запись на скальной породе от толчков с  $M \geq 8$  вблизи очага. Спектр У83 дополнительный в условиях малого числа записей на Камчатке.

Для приведения спектров записей, полученных на разных типах грунта, к скальному грунту были использованы поправки к спектрам Фурье, опубликованные в [5–7]. На рис. 1 приведены группы спектров в билогарифмическом масштабе, произвольно смещенные по вертикали. Спектры сглажены, осреднены две горизонтальные компоненты. Первая группа включает спектр К52 (Калифорния), три осредненных спектра: 1) Калифорния [6]:  $M_L = 7,5, r = 50$  км, скальный грунт, горизонтальная компонента; 2) Япония [7]:  $M_{JMA} = 7,5, r = 100$  км, скальный грунт, горизонтальная компонента (рассчитан по данным о спектральных амплитудах и длительностях); 3) условный "среднемировой" спектр [4]:  $M_w = 8,4, r = 30$  км, скальный грунт. Видно, что, если совместить уровни на 1 Гц, калифорнийские спектры идут существенно ниже японских в полосе 2–10 Гц.

Вторая группа спектров включает японские землетрясения. Спектр Т68Х на с/ст Хачинохе, возможно, искажен (занижен на высоких частотах за

счет частичного нарушения связанности грунта во время землетрясения). Спектр Т68М имеет резкий пик на 5–7 Гц, которого нет на спектре с/ст Хачинохе и на других спектрах того же толчка (с/ст Аомори, Муроран). Подобные пики видны и на спектрах других записей в пункте Мияко. Пример – приводимый спектр И68. Но даже если считать, что этот пик – аномалия, следует учитывать, что несколько менее резкий рост уровня спектра в интервале 2–8 Гц для условий Японии является, по-видимому, реальностью. Это иллюстрируется спектром М78.

Третья группа спектров характерна в основном для землетрясений Камчатки и Курил. Три спектра соответствуют толчкам на глубинах более 80 км. Создается впечатление, что у таких толчков имеется специфическая форма – примерно плоский участок в интервале 2–10 Гц. Для мелкофокусных толчков 1971 и 1984 гг. спектр в этой области спадает с ростом частоты. Отметим, что у толчков с промежуточной глубиной

в разных регионах отмечались различные спектры — как растущие с частотой в интервале 1–10 Гц (Гиндукуш), так и спадающие (Румыния). Форма камчатских спектров для толчков не является необычной.

Для мелкофокусных толчков положение иное. В работе [5] было обнаружено, что макросейсмическая магнитуда землетрясений 1969 г. ( $M_{LH} = 7,7$ ), 1971 г. ( $M_{LH} = 7,8$ ) и 1984 г. ( $M_{LH} = 7,5$ ), происшедших в районе Усть-Камчатка, существенно ниже  $M_{LH}$ , если пользоваться средней зависимостью ( $I - M_{LH} -$  расстояние  $r$ ) для Курило-Камчатской зоны. Аномалия интенсивности для расстояния 70 км составляет примерно  $\Delta I = 1,5-2$ , что соответствует относительному снижению максимальных ускорений в 3–4 раза. Максимальное ускорение обычно формируется участком спектра 3–10 Гц. Тот факт, что толчки с аномально низким уровнем спектра в этой области имеют одновременно аномально высокие  $\Delta I$ , может означать, что в среднем для мелкофокусных толчков Курило-Камчатской зоны более вероятно примерно плоская форма спектра. Район Усть-Камчатка, скорее всего, аномален. В то же время для толчка 28.03.73 с  $M = 7,6$  вблизи г. Северо-Курильска, а также для толчков П71 и У83 макросейсмическая магнитуда близка к  $M_{LH}$ .

С учетом изложенных фактов и соображений мы приняли на данном этапе в качестве типовой для камчатских толчков с  $M = 7,5-8,5$  примерно плоскую форму спектра Фурье ускорений (см. рис. 1). На низких частотах спектр дан в двух вариантах: нижняя ветвь (РГ) для промежуточных толчков, верхняя (Р8) для мелкофокусных (для которых дополнительно к объемным волнам следует учесть вклад поверхностных волн [9]).

Для толчков типа Р8 и РГ определим оценку спектра Фурье ускорения, а затем на ее основе — спектра реакции для скального грунта следующим способом. На первом этапе выявили уровень очагового спектра вблизи частоты  $f = 1$  Гц для камчатских толчков средней силы по кода-волнам. На втором этапе, используя среднемировую зависимость очагового спектра от  $M_0$ , оценили уровень его на частоте 1 Гц для сильных землетрясений. На третьем этапе рассчитали уровень спектра ускорений на расстоянии 80 км от очага по формулам из [4] и откорректировали с учетом фактического материала о сильных толчках. На четвертом этапе определили уровень спектра в полосе 0,3–10 Гц, комбинируя найденный уровень и форму, определенную в предыдущем разделе.

На первом этапе мы пользовались методикой Т.Г. Раутиан [10]. Сначала путем сравнения амплитуд коды и прямых  $S$ -волн в частотной полосе вблизи  $f = 1$  Гц (конкретно в полосе  $1,5 \pm 0,5$  Гц) нашли коэффициенты для расчета уровня очагового спектра  $M_0(f)$  (далее использовано краткое обозначение  $M_f$ ) по уровню амплитуд кода-волн. Затем, определив уровень кода-волн для 12 землетрясений Камчатки с  $M = 6-7$ , нашли с помощью этих коэффициентов оценки  $M_f = 1,5$  для этих землетрясений и зависимость  $M_f = 1,5 (M_{LH})$  для Камчатки (эта работа выполнялась совместно с В.Н. Мельниковой). Используя связь  $M_{LH} (M_0)$  [4], получили оценку эмпирической зависимости  $M_f = 1,5 (M_0)$  для Камчатки, для области  $M_{LH} = 6-7$  (рис. 2). Там приведены "среднемировые" кривые  $M_f (M_0)$  [4]. Видно, что при  $M_{LH} = 7$  камчатские землетрясения дают значения  $M_f = 1,5$  на 0,07 ед. лог. выше мирового среднего. Используя форму кривых для экстраполяции при  $M = 7$ , найдем значение  $M_f = 1$  для Р8 (при  $\lg M_0 = 28,65$ ). Оно отмечено на рис. 2 на штриховой экстраполирующей кривой.

По точкам этой кривой был рассчитан уровень спектра ускорения  $a(f)|_{f=1} = a(1)$  для расстояния  $r = 80$  км от центра очага, с помощью формулы и методики [4]. Соответствующая зависимость изображена на рис. 3. При переходе от связи ( $M_f, M_0$ ) к ( $a(f), M_0$ ) заметное влияние при больших  $M_0$  оказывает протяженность очага, которая здесь явно учитывалась. Полученная точка для Р8 соответствует 47 Гал/Гц (при  $f = 1$  Гц,  $r = 80$  км). Для сопоставления приведены к  $r = 80$  км и к скальному грунту уровни спектров записей, перечисленных в табл. 1; расчет выполнялся по формулам [4], использованы грунтовые поправки [6]. Данные об уровнях спектров отражены в табл. 2, где указаны принятое расстояние до условного центра протяженного очага, принятый линейный размер очага  $L$ , исходный уровень спектров в точке реги-

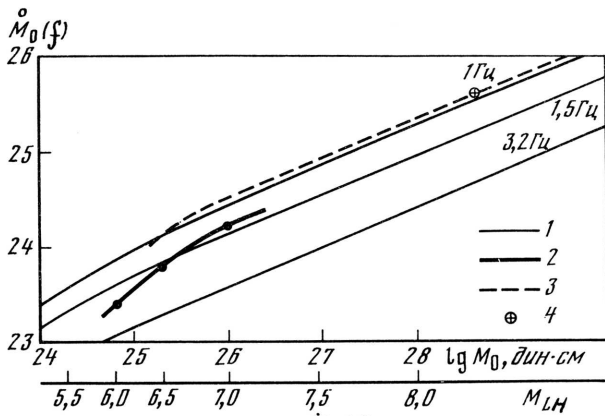


Рис. 2. Зависимость уровня очагового спектра  $M_0(f)$  от сейсмического момента  $M_0$  и магнитуды  $M_{LH}$

1 — по [4]; 2 — экспериментальная оценка  $M_0(1,5)$  по кода-волнам для Камчатки; 3 — экстраполяция для 1 Гц; 4 — оценка  $M_0(1)$  для Р8

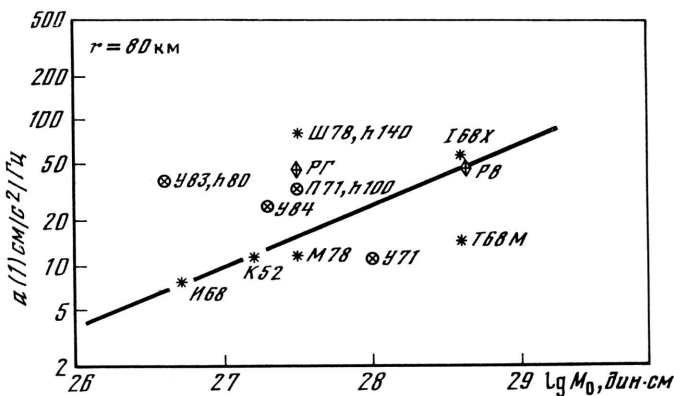


Рис. 3. Уровень амплитудного спектра Фурье ускорения (см. табл. 1, 2) линия соответствует штриховой на рис. 2

страции  $-a_r$  (1), результирующее значение  $a_{80}$  (1). Значения  $a_{80}(1)$  даны на рис. 3. Наблюдаемая здесь степень согласия экстраполированной кривой для Камчатки и уровней спектров реальных сильных мелкофокусных землетрясений удовлетворительная. Иное положение с более глубокими толчками. Видно, что для всех курилокамчатских толчков с  $H > 80$  км точки заметно выше линии экстраполяции. Поэтому ожидаемый уровень спектра для РГ мы сочли необходимым поднять выше линии экстраполяции. С учетом фактического расположения точек (см. рис. 3) значение  $a_{80}(1)$  для РГ также принято равным  $47 \text{ см/с}^2 \text{ Гц}$ . Комбинируя эту оценку и форму спектра (см. рис. 1), получаем оценки модуля спектра Фурье ускорения для  $M = 8$ ,  $r = 80$  км и скального грунта (рис. 4).

Для оценки спектра реакции по спектру Фурье мы применили известный подход, использующий теорию случайных процессов [11]. Для получения в его рамках компактной расчетной формулы допустим, что акселерограмма  $a(t)$  есть кусок реализации стационарного гауссова процесса со спектром мощности  $P(f)$  ( $f = \omega/2\pi$ ), где  $f \in (-\infty, +\infty)$ , и с прямоугольной огибающей длительностью  $s$ . Математическое ожидание квадрата модуля спектра Фурье акселерограммы в этом случае есть  $\langle |a(f)|^2 \rangle = sP(f)$ . Пусть  $a(f)$  действует на механический осциллятор с собственной частотой  $f_0$  и

Т а б л и ц а 2

Приведение уровней спектров ускорения к  $r = 80$  км и скальному грунту

Индекс записи	$r$ , гипоцентра, км	$r$ центра очага, км	$L$ , км	$a_r(1)$	$a_{80}(1)$
K52	45	45	60	35	11,5
T68X	120	95	180	102	53
T68M	120	95	180	12,5	14
И68	65	65	40	7,5	5,9
П71	130	105	80	24	35
У71	55	65	100	21	11
М78	55	55	60	26	11,5
Ш78	160	130	80	45	80
У83	155	135	40	28	38
У84	30	30	40	96	25

П р и м е ч а н и е.  $a_r(1)$  – наблюдаемый уровень спектра Фурье на расстоянии  $r$  и на частоте  $f$  (в  $\text{см}/\text{с}^2$ ); все данные при  $f = 1$  Гц. Расчет вели по расстоянию  $r$  от условного центра очага (“центра тяжести”), который, как и  $L$ , определяли по фактическим данным.

безразмерным затуханием  $D$ ; дисперсия смещения осциллятора к моменту  $s$  достигает значения приблизительно [12]

$$\sigma^2(s) = \sigma^2(1 - e^{-2s/\tau}),$$

где  $\tau = (2\pi f_0 D)^{-1}$  – характерное время переходного процесса в осцилляторе;  $\sigma^2$  – дисперсия стационарного режима, равная

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f)|^2 df \approx P(f_0) / 4(2\pi f_0)^3 D,$$

где  $H(f)$  – передаточная функция осциллятора. Объединив формулы, получим

$$\sigma^2(s) = \frac{P(f)}{4(2\pi f_0)^3 D} (1 - e^{-2s/\tau}) = \frac{sP(f_0)}{4q(2\pi f_0)^2} (1 - e^{-2q}) = \frac{\langle |a(f_0)|^2 \rangle}{4q(2\pi f_0)^2} (1 - e^{-2q}),$$

где  $q = s/\tau$ . При  $q \ll 1$  будем полагать, что наибольший экстремум реакции (смещения)  $\langle X^2 \rangle$  (обозначим его  $RX$ ) расположен вблизи момента  $s$ , так что для среднего квадрата псевдоскорости  $RV$  можно записать

$$\langle (RV)^2 \rangle = (2\pi f_0)^2 \langle (RX)^2 \rangle = 2(2\pi f_0)^2 \sigma^2(s)$$

(угловые скобки означают средние значения по набору). Здесь учтено, что квадрат экстремума  $\langle X^2 \rangle$  вдвое больше дисперсии  $\sigma^2(s)$ . Выражая отсюда  $\sigma^2(s)$  через  $\langle (RV)^2 \rangle$  и приравнивая два выражения для  $\sigma^2(s)$ , можно получить формулу для искомого безразмерного отношения:

$$C_V^2 = \frac{(2\pi f_0)^2 \langle X^2 \rangle}{\langle |a(f_0)|^2 \rangle} \approx \frac{(RV)^2}{|a(f_0)|^2}.$$

Первое отношение содержит средние значения, второе – отношение квадрата  $RV$  в реализации к сглаженному квадрату спектра Фурье реализации. При  $q \ll 1$  упомянутая формула имеет вид

$$C_V^2 = \frac{1'}{2q} (1 - e^{-2q}) = \frac{A(q)}{2(q)} (1 - e^{-2q}),$$

где  $A(q) = 1$  при  $q \ll 1$ . При  $q \gg 1$   $A(q) > 1$  за счет того, что квадрат наибольшего

$a(f), \text{см/с}^2/\Gamma\text{ц}$   
 $RA, \text{см/с}^2$

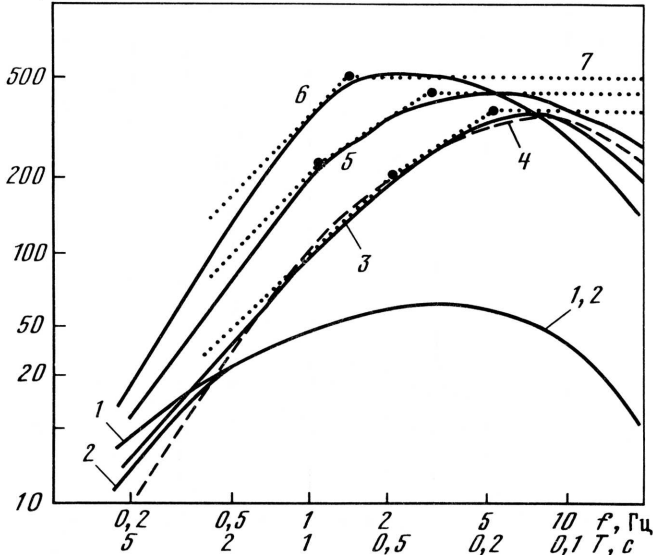


Рис. 4. Спектры Фурье ускорения  $a(f)$  и спектры реакции ускорения  $RA$  для типичных сильнейших толчков

1 —  $r = 80$  км, грунт I категории,  $a(f)$  для P8; 2 — то же для PГ; 3 —  $r = 85$  км, грунт I категории,  $RA$  для P8; 4 —  $r = 100$  км, грунт I категории,  $RA$  для PГ; 5 —  $r = 85$  км, грунт II категории,  $RA$  для P8; 6 — то же, грунт III категории; 7 — аппроксимация кривых 3, 5, 6, использованная для построения  $\beta$ -графиков

$\langle X_N^2 \rangle$  экстремума среди  $N$  однотипных экстремумов превышает средний квадрат  $\langle X^2 \rangle$  экстремума. Отношение  $Z_n = X_n^2 / \langle X^2 \rangle$  для гауссова процесса распределено экспоненциально. Для наибольшей из  $n$  независимых величин типа  $Z_n$ , следуя [13], имеем

$$\langle Z_n \rangle = \sum_{i=1}^n 1/i \approx \ln n + 0,577.$$

Число  $N$  следует определить на почти стационарном участке процесса, при  $t \in (\tau, s)$ , так что  $N \approx 2f_0(s - \tau)$ . В силу узкополосности соседние экстремумы зависимы и эквивалентное число  $n$  независимых экстремумов равно примерно  $DN$ , так что

$$n = 2f_0D(s - \tau) = (q - 1)/\pi.$$

Итак,

$$A(q) = \begin{cases} 1, & q < 1, \\ \sum_{i=1}^n 1/i, & n = [(q - 1)/\pi], 1 < q < 16, \\ \ln((q - 1)/\pi) + 0,577, & q > 16. \end{cases}$$

Применен приведенный способ пересчета, чтобы определить  $RV(f)$  и спектр реакции по ускорению  $RA(f) = 2\pi fRV(f)$  для P8 и PГ при  $r = 80$  км ( $D = 0,05$ ). Величина  $\tau$  определялась по способу, предложенному в [4], как  $0,4 (T_{\text{очаг}}^2 + T_{\text{среда}}^2)^{0,5}$ , где  $\lg T_{\text{очаг}} \approx \frac{1}{3} \lg M_0 - 7,59$ ;  $T_{\text{среда}} \approx 0,2r$ , км. Для PГ  $\tau = 16$  с. Для P8 оценка равна 36 с, но не вполне приемлема, так как построена на основе оценки ( $\approx 90$  с) полной длительности очагового процесса в очаге длиной около 240 км (по связи  $L(M_0)$  [4]). В тоже время при удалении  $r = 85$  км лишь часть столь большого очага может дать вклад в участок



максимальных амплитуд на акселерограмме. Выбрав несколько условно размер этой части очага равным  $2r = 170$  км, снизим пропорционально оценку  $\tau$ , это дает  $\tau \approx 25$  с. Именно эта величина использована как эквивалентная длительность (при прямоугольной огибающей) для Р8.

Используя найденные выше значения гипоцентрального расстояния  $r$  для Р8 (85 км) и для РГ (100 км) и приведя спектры от  $r = 80$  км к этим значениям  $r$ , получим окончательный вариант спектров  $RA$  для Р8 и РГ (см. рис. 4). Видно, что спектры практически совпадают. Это значит, что для инженерных целей действительно можно объединить угрозу от толчков типа Р8 и РГ, просуммировав интенсивности потоков для соответствующих событий. Дальнейшие расчеты велись со спектром Р8.

**Проблема грунтовых поправок и определение спектров реакции и максимальных ускорений для разных типов грунтов.** Проблема соотношения амплитуд сейсмических колебаний и расчетных нагрузок в условиях различного литологического состава верхней толщи далека от своего окончательного решения. Стандартным подходом в СССР является классификация грунтов на категории I, II, III (скальные, средние, рыхлые) с коэффициентами к максимальному ускорению 0,5; 1,0; 2,0 относительно "среднего грунта", или 1, 2, 4 относительно "скального грунта". Эти коэффициенты логически связаны с "приращением балльности"  $\Delta I$ , которое в этом контексте есть двоичный логарифм амплитудного коэффициента. При переходе к расчетным спектрам столь большое различие амплитуд на грунтах разных типов немного снижается из-за различия формы спектра ( $\beta$ -кривой) для разных категорий.

Рекомендуемая процедура экспериментального определения приращения балльности по РСМ-73 [14] использует в первую очередь отношение амплитуд  $S$ -волн слабых землетрясений, причем на практике эти амплитуды (либо отношения  $A/T$ ) снимаются с записей короткопериодных сейсмографов. По существу, неявно предполагается, что то же соотношение будет иметь место для нагрузок от сильных толчков. Это допускает по крайней мере два слабых места. Во-первых, пластические деформации верхней толщи ведут к амплитудной зависимости поглощения в ней, так что при сильном толчке рост амплитуды относительно скального (условно-упругого) грунта будет меньше, чем при слабом. Во-вторых, при сильном толчке ( $sM = 6,5$  или более) колебания обычно близки к квазистационарным, в то время как при слабом толчке (и вплоть до  $M \sim 5$ ) регистрируется короткий цуг (или импульс), длительность которого для скального грунта обычно заметно короче, чем для среднего или рыхлого. Для квазистационарного сигнала увеличение амплитуд на данном грунте относительно скального описывается в линейном случае передаточной функцией, т.е. отношением спектров Фурье. Если оценивать эту функцию по слабым точкам, нужно использовать отношение их спектров Фурье, которое при условно-постоянной передаточной функции и условно-прямоугольной огибающей превышает амплитуду в  $k_\tau = \sqrt{\tau_1/\tau_0}$  раз, где  $\tau_1$  и  $\tau_0$  — длительность на данном и скальном грунте. Расхождения такого рода между отношениями амплитуд и спектров наблюдаются на практике. Если отношение амплитуд — опорная величина, приходится допускать взаимную компенсацию двух видов ошибок — за счет неучета нелинейности и за счет замены отношения спектров отношением амплитуд. Косвенно наличие подобного явления подтверждается в работе [15, с. 226], где при использовании отношения амплитуд непрерывного сигнала — микросейсм рекомендуется считать, что приращение амплитуд "на одну категорию грунта" составляют 3,16 раза, а не 2 раза, как для  $S$ -волн. Таким образом, нет оснований удивляться заметным различиям грунтовых поправок, рассчитанных разными способами.

Важнейшая проблема, возникающая при оценке грунтовых поправок, — их упомянутая зависимость от амплитуды, возникающая за счет пластического поведения некоторых слоев грунта. В этой ситуации для каждого уровня нагрузки следует давать свою систему грунтовых поправок. Эта задача усложняется за счет явной зависимости нелинейных свойств от литологии. Для максимального ускорения  $a_{\max}$  определен вариант амплитудно-зависимых поправок предложен В.В. Штейнбергом [15].

Для спектров мощности (или Фурье) и реакции амплитудно-зависимые поправки

## Поправки к спектрам Фурье и реакции за грунтовые условия

Параметр	$f, \text{ Гц}$								
	0,20	0,32	0,5	1	2	3,2	5	10	20
$\delta \lg A_1$ (С)	10	15	20	28	28	28	28	28	—
$\delta \lg A_2$ (С)	10	15	20	27	25	22	17	0	—
$k_{\text{нел}}$ (С)	1	1	1	0,95	0,9	0,8	0,6	0	—
$\delta \lg A_1$ (М)	15	30	37	42	46	47	38	10	—
$\delta \lg A_2$ (М)	15	30	37	40	41	25	0	-43	—
$\delta \lg A_2$ (III)	27	40	48	55	43	27	11	-10	-30
$\delta \lg A_2$ (II)	15	22	26	29	23	18	11	0	-10

Примечание:  $\delta \lg A_1$  — поправка для малых амплитуд;  $\delta \lg A_2$  — поправка для ускорений  $100-200 \text{ см/с}^2$ ;  $k_{\text{нел}} = \delta \lg A_2 / \delta \lg A_1$ . Пометки (С) и (М) означают поправки на основе графиков [17] для иллюстрированных случаев среднего и мягкого грунта относительно условно-скального грунта с  $V_S = 600-700 \text{ м/с}$ . Пометки (II) и (III) означают принятые поправки для грунтов категорий II и III относительно I для условий Петропавловска-Камчатского. Все поправки умножены на 100.

были рассчитаны М. Сугито [17] с использованием нелинейной модели поведения грунтовой толщи, построенной по теории Хардина—Дрневича. Параметры модели подбирались на основе экспериментальных данных о сильных японских землетрясениях. Наблюдаемый в табл. 3 выраженный спад амплитуд высоких частот на рыхлом грунте относительно скального грунта при колебаниях последнего с амплитудами порядка  $0,1-0,2g$  — реальное явление, которое проявляется на ряде записей японских толчков (Ниигатское 1964 г., пункт Ниигата; Токачи 1968 г., пункты Аомори и Хачинохе).

Определенные проблемы при применении названной модели возникают в связи с ее региональным характером и ограниченной апробацией. Поэтому рассмотрим экспериментальные оценки грунтовых поправок для сильных колебаний. У разных авторов они не вполне сопоставимы по причинам различия принципов классификации грунта. Начнем со средней части спектра вблизи частоты 2 Гц. Здесь приращение логарифма спектра Фурье "на I категорию грунта"  $\delta \lg a(f) = 0,084$  [18, с. 42], а для спектров реакции  $\delta \lg RA = 0,085$  [19, с. 64]. Согласно [20], при двухуровневой классификации грунтов скальные—мягкие  $\delta \lg RA = 0,14$ . Согласно [21], при переходе от группы I к группе II  $\delta \lg RA \approx 0,28$ , при переходе от группы II к группе III  $\delta \lg RA \approx 0$  (группы примерно соответствуют категориям СНИП). На частотах 5–10 Гц многие авторы указывают на стабильность или даже на спад  $a(f)$  и  $RA$  с категорией. Напротив, на 1 Гц  $\delta \lg RA$  "на I категорию" растет до 0,25 и более. В целом с учетом разнообразных источников можно принять следующие значения  $\delta \lg A$  "на I категорию" в области 2–3 Гц: 1) амплитуда скорости  $S$ -волн, слабые колебания: 0,25–0,30; 2) спектр Фурье  $S$ -волн и амплитуда коры, слабые колебания: 0,35–0,40; 3) спектр Фурье и реакции, сильные колебания: 0,20–0,25.

Экспериментальное определение спектральных поправок  $\delta \lg A$  для средних грунтов (относительно скальных) для района Петропавловска-Камчатского по слабым толчкам выполнялось в двух отдельных исследованиях. В первом из них [22] использовались отношения сглаженных спектров Фурье  $S$ -волн. Во второй работе с участием В.Д. Феофилактова и В.Н. Мельниковой использовались отношения ЧИСС-спектров коды, что должно в теории давать тот же результат, что и спектры Фурье. Параллельно определяли и отношения амплитуд скорости в  $S$ -волнах, которые обычно составляли 0,6–0,8 от отношения спектров. Результаты двух работ, проведенных на различных площадках, неплохо согласуются (табл. 4). В обеих работах за эталонный был принят грунт сейсмической станции "Петропавловск" — монолитные габбро-диабазы в корен-

Таблица 4

Поправки за грунт по данным двух экспериментальных исследований (А и Б) в районе Петропавловска-Камчатского

Эксперимент	Параметр	f, Гц									
		0,6	0,7	0,8	1	1,5	2	3	5	6	12
А	$\delta \lg A_0$	0,29	—	0,45	0,50	0,65	0,56	0,56	0,45	—	—
	$\delta \lg A_1$	(0,09)	—	0,25	0,30	0,45	0,36	0,36	0,26	—	—
Б	$\delta \lg A_0$	—	0,48	—	—	0,61	—	0,52	—	0,35	(0,10)
	$\delta \lg A_1$	—	0,28	—	—	0,41	—	0,32	—	0,15	(-0,10)

Примечание.  $A_0$  — относительно плотного скального грунта с/ст "Петропавловск";  $A_1$  — относительно грунта I категории.

ном залегании. Для него приращение балльности относительно среднего грунта составляет около 1,5. Поэтому в наблюдаемые значения  $\delta \lg A$  была внесена поправка — 0,20 (в предположении  $\delta \lg A(f) = 0,40$  "на I категорию грунта") (см. табл. 4).

Затем была сделана попытка построить обобщенную систему грунтовых поправок для сильных колебаний в условиях Восточной Камчатки. По данным табл. 4 были построены определенные поправки для слабых колебаний. Пик на частоте 1,5 Гц приписан резонансу конкретных грунтовых толщ и был "срезан". Для среднего грунта на основании данных [17] был построен набор "поправок за нелинейность"  $k_{нел}$  (см. табл. 3). С использованием табл. 4, поправок  $k_{нел}$ , данных [17], а также с учетом результатов [3] был построен первый вариант спектральных грунтовых поправок для сильных колебаний грунта ( $a_{max} = 100-200 \text{ см/с}^2$ ) в условиях Петропавловска-Камчатского (см. табл. 3). Можно полагать, что эти поправки дают разумное первое приближение. Использование единых поправок и для спектров Фурье, и для спектров реакции на данном этапе можно считать допустимым.

Объединяя спектр реакции для скального грунта и описанные грунтовые поправки, получим ожидаемые спектры реакции толчка Р8 на среднем и рыхлом грунте (см. рис. 4, 5).

Для получения  $\beta$ -графика необходимо также иметь значение максимального ускорения  $a_{max}$ ; оно имеет и самостоятельный интерес. Значение  $a_{max}$  оценивали через среднеквадратический экстремум акселерограммы в окрестности ее максимума  $a_{скэ}$ , который нашли из равенства Парсевала по величинам  $a(f)_{max}$ , ширины полосы  $\Delta f$  и эффективной длительности  $\tau$  с поправкой  $\langle Z_n \rangle$ , описанной выше [4]. Этим же способом оценили и максимальную скорость  $V_{max}$ . Считая для Р8  $\tau = 25$  с для любого грунта (так как длительность велика), получили оценки  $a_{max}$  и  $V_{max}$  для  $r = 85$  км, а также аналогичные оценки для  $r = 100$  км и значения типичных видимых периодов ускорения  $T_a$  и скорости  $T_V$  (табл. 5).

**Сопоставление оценок Камчатки с данными по другим регионам и выбор  $\beta$ -графиков.** Данные по максимальным ускорениям сами по себе не очень важны для данной работы, но их доступность для разных регионов позволяет делать широкие сопоставления. Были рассчитаны оценки максимального ускорения для очага с  $M = 8$  и  $r = 100$  км для среднего и, при возможности, для скального грунта (в скобках). Для Японии, по [23],  $a_{max} = 240(250) \text{ см/с}^2$ , по [21] —  $205(145) \text{ см/с}^2$ . Для запада США, по [20], —  $59(59) \text{ см/с}^2$  (для  $M_w = 8,4$ ). По [24], мировые данные —  $73(48) \text{ см/с}^2$  по общей формуле, но с учетом взбросового типа очага  $160(105) \text{ см/с}^2$ . В.В. Штейнберг (мировые данные) [16] дает  $125 \text{ см/с}^2$  при  $M = 7$ ; полагая  $b = \partial \lg a / \partial M = 0,25$ , для  $M = 8$  получим  $220 \text{ см/с}^2$ . Последняя цифра относится не к среднему грунту, а к результату усреднения по типам грунта. Мы построили аналогичную оценку сами, подобрав данные о шести толчках с  $M > 7,3$  вне Японии и США (Соломоновы острова, 1971; Южные Ку-

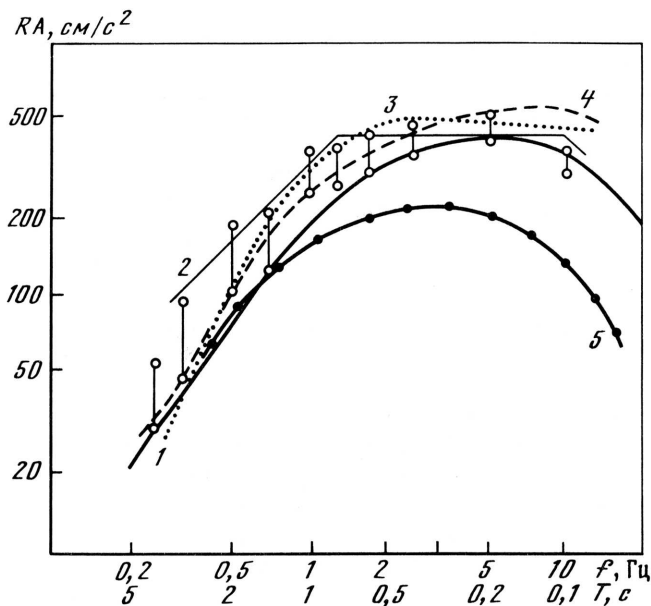


Рис. 5. Сопоставление спектров реакции ускорения для среднего грунта ( $M = 8$  и  $r = 85$  км)  
 1 — см. рис. 4; 2 — мировые данные [16] с нашей экстраполяцией; 3 — модифицированный спектр сильнейшего толчка из записанных в Петропавловске-Камчатском; 4 — средний из двух вариантов для Японии; 5 — данные для запада США [19] с нашей экстраполяцией. Парные кружки — оценки по [26] для  $M_W = 8$  (нижний кружок) и  $M_W = 8,4$  (верхний кружок)

рильские острова, 1973; Китай, 1976; Иран, 1978; Чили, 1971, 1985). Значения  $a_{max}$  привели к  $r = 100$  км и  $M = 8$ , используя  $b = 0,25$  и  $n = -\partial \lg a / \partial \lg r = 1,0$ . Медианное значение ускорения —  $240 \text{ см/с}^2$  (для среднего грунта). Оценка для альпийского пояса [25] с такой же коррекцией дает  $175 \text{ см/с}^2$ .

В целом оценки для всех регионов, кроме запада США а также среднемировые попадают в диапазон  $160\text{--}240 \text{ см/с}^2$ ; наша оценка —  $190 \text{ см/с}^2$  — на этом фоне выглядит совершенно типичной. Отметим, что приведенные оценки не вполне сопоставимы из-за разных определений расстояния и магнитуды, но на данном уровне анализа этим можно, по-видимому, пренебречь.

В условиях, когда наши оценки  $a_{max}$  для грунтов категорий I и III отличаются от оценки для среднего грунта в пределах  $\pm 15\%$  и учитывая [16] характер амплитудной зависимости грунтовой поправки к  $a_{max}$ , которая, по-видимому, меняет знак при  $a_{max} \sim 150\text{--}250 \text{ см/с}^2$ , значение  $a_{max} = 190 \text{ см/с}^2$  принимается постоянным для всех типов грунта. Это решение повлияет лишь на уровень  $\beta$ -графиков, но не скажется на оценках расчетных сейсмических ускорений.

Спектр реакции ускорения при затухании 0,05 для горизонтальной компоненты колебаний среднего грунта, оцененный выше для  $M = 8$ ,  $r = 85$  км в условиях Камчатки, был сопоставлен с другими данными (см. рис. 5). Кроме наших (кривая 4), проведено еще пять оценок: ломаная [16], пересчитанный спектр реальной записи сильнейшего, записанного в Петропавловск-Камчатском толчка (24.11.71), оценки для Японии и для зон субдукции Тихого океана, экстраполированная оценка для запада США. По рис. 9 из [16] определили форму спектра реакции при  $M = 8$ . Уровень при  $r = 28$  км получили по уравнению 17(3) из [12] и затем пересчитали к  $r = 85$  км по закону  $1/r$ , что дает  $415 \text{ см/с}^2$ . Отметим, что такой вид зависимости от расстояния при  $M \sim 8$  согласуется как с рис. 5 из [16], так и с данными по Японии. Спектр реакции записи толчка 24.11.71 приняли относящимися к скальному грунту ( $M_W = 7,6$  и  $r = 120$  км), а затем пересчитали с учетом названных выше значений  $b$  и  $n$  принятых грунтовых

Категория грунта	$r = 85$ км		$r = 100$ км		Типичные видимые периоды	
	Ускорение $a_{\max}$ , см/с <sup>2</sup>	Скорость $V_{\max}$ , см/с	Ускорение $a_{\max}$ , см/с <sup>2</sup>	Скорость $V_{\max}$ , см/с	$T_{\omega}$ , с	$T_{\nu}$ , с
I	175	7,5	148	6,5	0,2	1,3
II	190	17	161	14	0,3	1,1
III	220	26	187	22	0,5	1,1

поправок по табл. 3. Средний спектр для Японии был получен по спектрам для грунтов II категории [21] и I категории [23] с поправками по табл. 3. Средний спектр для зон субдукции Тихого океана определяли по формулам и таблицам [26] для  $r = 85$  км, глубины очага  $H = 40$  км и значений  $M_w = 8$  и  $M_w = 8,4$ . Значение  $M_w = 8$  целесообразно использовать в качестве опорного вместо формально верного  $M_w = 8,4$ , чтобы учесть тот же эффект насыщения в ближней зоне источника, который обсуждался в связи с оценкой  $\tau$ . Средний спектр для запада США определяли в два этапа: сначала рассчитали оценки [19] для  $M = 6,5$ , а затем экстраполировали их к  $M = 8$ , используя наклон кривых этой модели при  $M = 6,75$ , путем линейной (а не квадратической) экстраполяции.

Используя данные, приведенные на рис. 3, видим, что пересчитанный спектр (2) для глубокого ( $H = 100$  км) толчка находится выше ожидаемого (4) (см. рис. 5). Это коррелируется со значениями коэффициентов для зависимости от глубины [26]. Спектр для Японии также выше, это согласуется с различиями в ожидаемых  $a_{\max}$ . Спектр для  $M_w = 8$  [26] мало отличается от ожидаемого, лишь в области 0,4–1,5 Гц он выше примерно на 0,08–0,1 ед. лог. Спектр запада США проходит существенно ниже остальных. В интервале 0,2–0,8 Гц все спектры неплохо согласуются, кроме ломаной [16]. Эта линия (так же как и оценка для запада США) получена экстраполяцией и относительно менее надежна.

Не видно причин отказываться от предложенного спектра, далее он принят в качестве окончательной оценки для грунта II категории для типичного сильного толчка в Петропавловске-Камчатском. Результат комбинирования этого спектра с грунтовыми поправками табл. 3 приведен на рис. 4. Ломаными изображена рекомендуемая аппроксимация спектров для инженерных целей для категорий грунта I, II, III. При построении ломаных мы традиционно не принимали во внимание спад спектра на высоких частотах (тем самым исключалась ситуация, когда в процессе землетрясения, по мере того как с нарастанием повреждений растет и собственный период, нормально спроектированное сооружение с малым начальным периодом может оказаться перегруженным).

По графикам  $RA$  с использованием значения  $a_{\max} = 190$  см/с<sup>2</sup> были построены графики  $\beta(T) = RA(T)/a_{\max}$ . Они приведены в формульном виде в табл. 6. На рис. 6 они сопоставляются с  $\beta$ -графиками из действующих норм [27], которые приведены к единому  $a_{\max}$  (иначе говоря, изображены  $0,5\beta_I(T)$ ,  $\beta_{II}(T)$  и  $2\beta_{III}(T)$  [27]).

**Определение расчетных колебаний грунта.** Выше получены характеристики типичного (среднего) сильного толчка в Петропавловске-Камчатском с повторяемостью около 60 лет. Вопрос о соотношении реальных и расчетных характеристик толчка – серьезная проблема. Сначала следует разграничить и соотнести несколько различных по смыслу характеристик колебаний, а затем выбрать ту из них, которую следует использовать в качестве расчетной. Проведем это применительно к максимальному ускорению.

Рассмотрим сначала полуинтуитивное понятие типичного сильного толчка в стати-

Т а б л и ц а 6

Рекомендуемые  $\beta$ -графики

Категория грунта	$T, c$	$\beta$	$T, c$	$\beta$	$T, c$	$\beta$
I	0-0,192	1,85	0,192-0,505	$0,615 T^{-2/3}$	0,505-2,5	$0,49T^{-1}$
II	0-0,326	2,20	0,326-0,823	$1,04 T^{-2/3}$	0,823-2,5	$0,98T^{-1}$
III	0-0,677	2,57	-	-	0,677-2,5	$1,74T^{-1}$

стическом аспекте [13, 20]. Пусть имеет место случайный поток событий (сильных толчков) с плотностью потока (повторяемостью)  $\lambda_0 = 1/T_0$ , где  $T_0$  — период повторяемости событий. Пусть события характеризуются параметром  $a$  и существует функция распределения  $P_r(a' < a) = P(a)$ . Плотность потока событий " $a'$  превышает  $a$ ".

$$\frac{1}{T} = \lambda = \lambda_0 Pr(a' > a) = \lambda_0(1 - P(a)) = \frac{1 - P(a)}{T_0}.$$

В частности, для ситуации превышения медианы  $a_{50\%}$ ,  $P(a_{50\%}) = 0,5$  и  $T = 2T_0$ . Можно полагать, что для "типичного" толчка ускорение  $a$  равно медианному ускорению  $a_{50\%}$ , это и есть его строгое определение. Связь между  $a$  и  $T = T(a)$  позволяет сопоставить значение ускорения  $a$  и риска, выраженного как период повторения ситуаций "наблюдаемое ускорение  $a'$  превысило  $a$ ":

$$a(T) = P^{-1}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right),$$

где  $P^{-1}$  обозначает обратную функцию. Далее будем полагать, что  $T = 1000$  лет, из того соображения, что структура таблицы для коэффициента  $m_{кр}$  в действующих СНиП II-7-81 [27] определенно подразумевает, что это "нормальный", опорный период повторяемости. Ниже предполагаем, что величина расчетного ускорения  $A$ , характеризующего уровень расчетного спектра реакции, соответствует периоду повторяемости 1000 лет.

Определив "типичное" значение как медианное, мы оказываемся в хорошем согласии с наблюдениями:  $a_{max}$  обычно распределены по логнормальному закону, для которого медиана совпадает со среднегеометрическим или с логарифмическим средним.

Разделим следующие величины.

1. Типичное  $a_{max}$  от толчка типа P8 ( $M_S = 8, M_{LH} = 8,25$ ) —  $a_8$ .
2. Типичное  $a_{max}$  от "сильнейшего" мелкофокусного толчка ( $M \geq 7^{3/4}$ ) вблизи ( $r = 85-100$  км) от Петропавловска-Камчатского. Будем считать, что период повторяемости  $T_0$  таких толчков (вместе с сильнейшими толчками на глубинах 70-150 км, а также с аномальными по сотрясениям толчками меньших магнитуд) составляет около 60 лет. Обозначим эту величину  $a_0$  и примем в согласии с предыдущими рассуждениями  $a_0 = a_8$ .
3. Значение  $a(T)$  при  $T = 1000$  лет обозначим  $a_{1000}$ , по предположению  $a_{1000} = A$ .
4. Типичное  $a_{max}$  от 9-балльного толчка —  $a_{(300-500)}$ , поскольку повторяемость таких толчков предположительно 300-500 лет.
5. Условное расчетное максимальное ускорение  $A^*$  используется в расчете сооружений, в которых допускаются частичные повреждения. Согласно СНиП II-7-81,  $A^* = k_1 A$ , где  $k_1 = 0,25$ .

Понятно, что  $A^*$  оценивается по  $A = a_{1000}$  и что по  $a_0$  и ее статистическим характеристикам можно определить  $a_{1000}$ . Эти вопросы следует рассмотреть детально. Предварительно обсудим сейсмологический смысл параметров  $A$  и  $k_1$ .

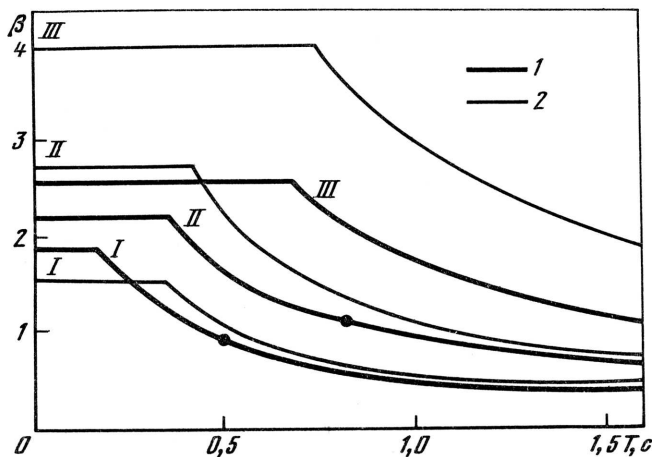


Рис. 6. Сопоставление предлагаемых  $\beta$ -графиков (1) и графиков по СНиП II-7-81 (2)

В СНиП II-7-81 [14] дана таблица поправочных коэффициентов  $m_{кр}$  для учета повторяемости расчетных толчков. Если исходить из численных значений  $m_{кр}$ , отношение величин расчетных нагрузок для отношения периодов повторяемостей 100/1000 лет равно  $1/0,85 = 1,17$ . В то же время при сравнении однотипных сейсмологических оценок для периодов 100 и 1000 лет в условиях Камчатки различие составит не менее 2 раз. Это значит, что если, например, принять в качестве расчетного максимального ускорения для периода повторяемости 100 лет и одновременно категорию повторяемости 1, то, согласно СНиП II-7-81, относительная безопасность сооружения будет намного ниже, чем если бы в той же самой сейсмологической ситуации принять за расчетное максимальное ускорение для периода повторяемости 1000 лет и одновременно категорию повторяемости 2. Поясним это явление на примере. Пусть для конкретной площадки принято максимальное ускорение  $0,2g$  при периоде повторяемости 100 лет. Во многих сейсмологических ситуациях максимальное ускорение для периода повторяемости 1000 лет будет примерно вдвое больше, чем для периода 100 лет, и составит  $0,4g$ . Иначе говоря, в терминах легенды карты СР78 [1] одна и та же площадка может быть охарактеризована и как  $8_1$ , и как  $9_2$ . Но расчетные нагрузки, приведенные с учетом  $m_{кр}$  к периоду повторяемости 1000 лет, составят в этих случаях  $0,2/0,85 = 0,236g$  и  $0,4g$  соответственно.

В подобной противоречивой ситуации следует исходить из предпосылки, что "нормальный", опорный период повторяемости, подразумеваемый в СНиП II-7-81, составляет 1000 лет, и оценивать "типичное" максимальное ускорение для этого периода.

Используемое в СНиП II-7-81 значение коэффициента  $k_1$ , учитывающего резервы прочности сооружения при его работе за пределами упругости, не дифференцировано по отношению к различиям в ожидаемой длительности сильных колебаний. Для условий Камчатки это может вести к недооценке сейсмической опасности.

Сохраняющееся в СНиП с 1962 г. значение  $A^* = 0,1g$ , как обеспечивающее сейсмобезопасность при интенсивности 9 баллов, основано на опыте изучения ряда землетрясений (главным образом в США) исключительно с  $M = 6-7,5$ . Длительность сильных колебаний для записей, принимаемых за типичные, как правило, не превышает 5-10 с, во всяком случае, в пределах 9-балльной зоны.

Для условий Камчатки с учетом данных о местных землетрясениях, а также о землетрясениях на Курильских островах, в Японии, на Аляске и т.п. ожидаемая длительность колебаний от мелкофокусного очага с  $M \geq 8$  может составить 40-80 с, а возможно, и более [3]. Она будет не менее чем в 4-5 раз превышать типичную длительность для толчков, на опыте которых в большей мере основаны нормы.

Чтобы уяснить последствия такого различия, вообразим, что сооружение подвергается в течение заданного времени  $d$  случайной, переменной во времени нагрузке, уровень которой настолько велик, что сооружение выводится за границу линейности. Тогда в сооружении с течением времени будут накапливаться повреждения, и число их, или степень повреждения, будет расти с ростом времени  $d$ . Одновременно возрастает вероятность разрушения сооружения за время  $d$ .

Как обнаружил Ф.Ф. Аптикаев [28], при одинаковых значениях максимального ускорения макросейсмическая интенсивность  $I$ , определяемая в большей мере степенью повреждения, растет с длительностью  $d$  примерно пропорционально  $\lg d$ . Отсюда следует, что, если зафиксировать степень повреждений, можно "обменять длительность на амплитуду", следуя формуле  $\Delta \lg A = -C \Delta \lg d$ .

Согласно [28],  $C=0,5$ ; возможно, эта оценка не окончательная. Для четырехкратного различия в длительности  $\Delta \lg A = 0,3$ , что означает двукратный рост эквивалентной амплитуды. При обычном предположении двукратного роста ускорения на 1 балл интенсивности данное рассуждение можно переформулировать еще так: четыре толчка интенсивностью  $I$  подряд эквивалентны одному толчку интенсивностью  $I + 1$ . Если данный вывод принимать буквально, значение  $k_1$  для условий Камчатки следует поднять не менее чем вдвое относительно его значения для толчков типичной для запада США длительности (последнее, вообще говоря, не равно 0,25). Учет данного фактора — дело инженеров, здесь он упомянут для полноты обсуждения.

**Оценка уровня спектра с определенной повторяемостью.** Все рассуждения о максимальных ускорениях применимы и к спектру реакции  $RA$ . Мы далее пренебрежем зависимостью статистических свойств  $RA$  от частоты и будем вести анализ в терминах максимального ускорения, понимаемого в этом контексте как масштабный множитель к  $\beta$ -кривой, которая предполагается неизменной. Статистические свойства этого множителя определяются свойствами величины  $RA$ ; так, в рамках гипотезы о логнормальном законе мы будем привлекать данные о дисперсии  $\lg RA$ , а не  $\lg a_{\max}$ . Разброс  $RA$  (на некоторой частоте) для разных "сильнейших" толчков связан в основном с разбросом связи  $(RA, M, r)$  за счет различий свойств очагов землетрясений и трасс распространения волн. Считая значения спектров случайными величинами с логнормальным законом, рассмотрим проблему оценки  $\sigma(\lg RA)$  по экспериментальным данным. Для конкретного небольшого участка территории степень разнотипности очагов вокруг нее может, вообще говоря, быть меньшей, чем для большого региона. Эта точка зрения, однако, опровергается практикой. Отметим, в частности, резкие различия спектров для сильных перуанских толчков 1970, 1974 гг. с близкими очагами, а в условиях Камчатки — подобные же различия для толчков в Усть-Камчатске в 1971, 1983 гг. Поэтому мы считаем наиболее корректным на данном этапе использовать для наших целей значения стандартных отклонений  $\sigma(\lg RA)$ , полученные при обобщении данных некоторого региона.

Оценки такого типа имеются для двух регионов — запада США и Японии. Для запада США  $\sigma(\lg RA) = 0,30-0,35$  [19];  $\sigma(\lg RA) = 0,28-0,33$  [20]. Для Японии  $\sigma(\lg RA) = 0,27-0,3$  [21]. В качестве окончательной оценки примем  $\sigma(\lg RA) = 0,3$ .

Влияние разброса магнитуды относительно опорного значения  $M = 8$  в этой ситуации несущественно. В самом деле, можно ограничиться крайним случаем разброса  $+0,4$ , т.е.  $M = 7,6-8,4$ . Тогда при  $b = 0,25$  разброс  $\lg a_{\max} = \pm 0,1$ . При равномерном распределении в интервале  $\pm 0,1$  дисперсия равна  $0,082^2$ . Ее вклад увеличит полную дисперсию с  $0,30^2$  до  $0,31^2$ . Ясно, что этим можно пренебречь, и сделанное предположение о виде равномерного распределения не ограничивает справедливости этого вывода. Таким образом, окончательно принимаем для  $RA$  и тем самым для "нормировочного" значения  $a_{\max}$  величину логарифмического разброса  $\sigma(\lg RA) = \sigma(\lg a_{\max}) = 0,3$ . Для значений  $a_{\max}$  в собственном смысле разброс несколько ниже; приемлемой оценкой (по тем же источникам) может служить  $\sigma(\lg a_{\max}) = 0,22$ .



Чтобы рассчитать по  $a_0$  значение  $a_{1000}$ , следует найти величину коэффициента

$$\lg k_T = \lg(a_{1000}/a_0) = \sigma(\lg RA) \Phi^{-1}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right),$$

где  $\Phi^{-1}$  — обратная функция нормального закона [13] при  $\sigma = 0,3$ ,  $T_0 = 58$  лет,  $T = 1000$  лет. Расчет дает  $k_T = 2,97$ .

Может возникнуть вопрос о законности гипотезы логнормального распределения для редких событий, например при значениях периода повторения порядка 1000 лет. Использование в нашем случае теоретического верхнего 5,8%-ного квантиля не должно вызывать серьезные возражения, так как подобные отклонения (в 2–2,5 раза по амплитуде) реально наблюдаются. В случае, например, 1%-ного квантиля вопрос был бы менее ясен.

В силу изложенного  $A = k_T a_0$  со следующими оценками для сомножителей:  $k_{1000} = 2,97$ ,  $a_0 = 190$  см/с<sup>2</sup>, откуда  $A = 565$  см/с<sup>2</sup>. Эта оценка может быть применена в рамках методики СНиП II-7-81 с исключением коэффициента  $m_{кр}$  (чтобы не учитывать повторяемость дважды). Она относится к любой категории грунта и должна применяться совместно с  $\beta$ -графиками (см. табл. 4).

Известная степень неопределенности комбинации оценок ( $a_0$ ,  $T_0$ ), определяющей в основном (при заданном риске) расчетный параметр  $A$ , наводит на мысль проконтролировать результат по накопленной статистике сотрясений в Петропавловске-Камчатском. Принятое значение  $a_0 = 190$  см/с<sup>2</sup> в наших предположениях превышает в среднем один раз в  $2T_0 = 116$  лет.

По СНиП II-7-81,  $a = 190$  см/с<sup>2</sup> примерно соответствует  $I = 8$  баллов, это значит, что повторяемость толчков с  $I > 8$  баллов должна быть порядка 120 лет. Фактически [1, с. 278] в Петропавловске-Камчатском за 250 лет отмечено 2 толчка с  $I = 8-9$  баллов (1737, 1841 гг.) и еще 2 толчка с  $I = 8$  баллов (1792, 1904 гг.), из которых один, с вероятностью 75% был с  $I > 8$  баллов. Это дает для периода повторяемости толчков с  $I > 8$  баллов оценку 125–83 года. Надо отметить, что имеются серьезные сомнения в полноте макросейсмической статистики. В частности, толчок 1866 г. приводится с  $I > 7$  баллов без дальнейших уточнений, а толчок 1899 г. в районе Петропавловска-Камчатского с  $M = 8$  (цунами от которого было замечено на Гавайских островах) вообще не имеет микросейсмички. Поэтому, скорее всего,  $T$  составляет менее 83 лет. С другой стороны, согласно новейшим результатам [28], значение  $a = 190$  см/с<sup>2</sup> при  $\tau = 25$  с скорее соответствует не 8, а 8,5 балла. В общем период повторяемости  $T$ , равный 116 годам для толчков с  $a > 190$  см/с<sup>2</sup> никак нельзя считать противоречащим макросейсмической статистике в пределах реальной точности подобного сопоставления.

**Обсуждение результатов.** Полученные выше предварительные оценки колебаний грунта, несмотря на ряд допущений, в целом, по-видимому, обоснованы лучше, чем применяемые в настоящее время оценки, унифицированные для всех регионов, магнитуд и расстояний. Отметим, что для среднего грунта величина численного расхождения этой оценки с рекомендациями СНиП II-7-81 невелика. Это благоприятный факт, означающий, что формирующуюся, согласно требованиям СНиП II-7-81, застройку следует в основном считать сейсмостойкой и после предлагаемого уточнения параметров колебаний грунта.

Полученная нами оценка для Петропавловска-Камчатского может в предварительном порядке быть распространена и на другие пункты 9-балльной зоны Камчатки, а также Курильских островов. Это относится и к г. Усть-Камчатск. Хотя там в 1969, 1971, 1984 гг. отмечались аномально слабые сотрясения грунта при землетрясениях больших магнитуд, "нормальный" характер толчка 1983 г. и исторические данные о 10-балльных толчках (на слабом грунте) не позволяют на основе этого факта обосновывать возможность снижения расчетных нагрузок в этом пункте. Для условий г. Елизово могут быть использованы предложенные  $\beta$ -графики в комбинации со значением

$A$ , составляющим с учетом расстояния от очаговой зоны  $0,7 \text{ см/с}^2$  от его значения для Петропавловска-Камчатского.

Возникающий в работе вопрос о принципах учета различных факторов (длительности, повторяемости и т.п.) при переходе от сейсмологических оценок к расчетным величинам весьма важен, так что предложенный вариант решения может представлять определенный общий интерес. В нашем случае наибольшее влияние на численный результат оказывает выбор расчетного периода повторяемости; однако методика расчета остается неизменной и при другом выборе этого периода.

Отметим также, что оценки уровня спектра реакции для толчка с  $M \sim 8$  были успешно получены по модифицированной автором методике Т.Г. Раутиан с использованием амплитуд кода-волн. Основное дополнение к методике Т.Г. Раутиан — это использование для экстраполяции не линейного закона, а полуэмпирической зависимости  $M_0(f)$  от  $M_0$ . Желательно привлечение на этом этапе материала записей прямых волн, без которых качество оценок может быть поставлено под сомнение.

Проведенный контроль результатов по эмпирическим данным о повторяемости сотрясений дает дополнительную уверенность в отсутствии грубых неточностей в оценках.

В заключение сформулируем основные выводы.

1. На основе обобщения и анализа данных об уровне и форме спектров сильных землетрясений Камчатки и частично других регионов, а также данных кода-волн камчатских землетрясений средней силы, с использованием статистической модели излучения очага землетрясения, получены оценки ожидаемых спектров Фурье, спектров реакции и максимальных ускорений для типичного сильнейшего землетрясения в Петропавловске-Камчатском.

2. Проведен контроль полученных оценок спектров реакции и максимальных ускорений путем сопоставления с данными других регионов, предложены рекомендуемые формы  $\beta$ -графиков и значения максимального ускорения для типичного сильнейшего толчка.

3. В предположении, что расчетное значение ускорения соответствует периоду повторения 1000 лет, дано расчетное значение параметра  $A$  для Петропавловска-Камчатского.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука, 1980. 308 с.
2. Федотов С.А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Изд-во АН СССР, 1965. С. 66–93 (Тр. ИФЗ АН СССР, Вып. 10, № 36 (203)).
3. Штейнберг В.В., Федотов С.А. Оценка параметров колебаний почвы в г. Петропавловске-Камчатском при возможном сильном землетрясении // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 90–100.
4. Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 3–22.
5. Wesnousky S.G., Scholz C.H., Shimazaki K., Matsuda T. Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic hazards: a case study of Japan // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1984. Vol. 74, N 2. P. 687–708.
6. Trifunac M.D. Preliminary empirical model for scaling Fourier amplitude spectra of strong ground motion in terms of earthquake magnitude, source to station distance and recording site conditions // Ibid. 1976. Vol. 66, N 5. P. 1343–1373.
7. Sugito M., Kameda H. Prediction of nonstationary earthquake motion on rock surface // Proc. Jap. Soc. Civ. Eng. 1985. Vol. 2, N 2. P. 149–159.
8. Зобин В.М., Федотов С.А., Гордеев Е.И. и др. Сильные землетрясения на Камчатке и Командорских о-вах в 1961–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 3–23.
9. Hasegawa H.S. Theoretical synthesis and analysis of strong ground motion spectra of earthquakes // Canad. Geotechn. J. 1974. Vol. 11, P. 279–297.
10. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С. и др. Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 144 с.
11. Ванмарке Э.Х. Реакция сооружений на землетрясения // Ломницт Ц., Розенблют Э. Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. С. 256–299.

12. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
13. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
14. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию: РСМ-73 // Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний. М.: Наука, 1973. С. 6–36. (Вопр. инж. сейсмологии; Вып. 15).
15. Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1977. 226 с.
16. Штейнберг В.В. Параметры колебаний грунтов при сильных землетрясениях // Детальные инженерно-сейсмологические исследования. М.: Наука, 1986. С. 7–22. (Вопр. инж. сейсмологии; Вып. 27).
17. Sugito M., Kameda H., Goto H., Hirose K. Conversion factor between earthquake motion on rock surface and soil surface with consideration on nonlinearity of soil layers // Ann. Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ. 1986. N 29B-2. P. 41–58.
18. Trifunac M.D., Lee V.W. Preliminary empirical model for scaled Fourier amplitude spectra of strong ground acceleration in terms of earthquake magnitude, source to station distance, site intensity and recording site conditions. Los Angeles, 1985. 87 p.
19. Trifunac M.D., Lee V.W. Preliminary empirical model for scaling pseudo relative velocity spectra of strong earthquake accelerations in terms of magnitude, distance, site intensity and recording site conditions. Los Angeles, 1985. 151 p.
20. Joyner W.B., Fumal T.E. Predictive mapping of earthquake ground motion // Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region. Los Angeles, 1985. P. 203–220.
21. Kawashima K., Aizawa K., Takahashi K. Attenuation of peak ground motion and absolute acceleration response spectra // Proc. 8th World Congr. earthquake eng. San Francisco, 1984. P. 257–264.
22. Гусев А.А., Зобин В.М., Фиофилактос В.Д. Определение расчетной балльности и оценка параметров максимальных колебаний грунта площадки строительства на Камчатке // Количественная оценка сейсмических воздействий. М.: Наука, 1980. С. 44–59. (Вопр. инж. сейсмологии; Вып. 20).
23. Goto H., Sugito M., Kameda H. et al. Prediction of nonstationary earthquake motions for moderate and great earthquakes on rock surface // Annals, Disas. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ. 1984. N 27B-2. P. 19–48.
24. Campbell K.W. Predicting strong ground motions in Utah // Evaluation of regional and urban earthquake hazards and risk in Utah. Los Angeles. 1988. P. 27–36.
25. Chiarrutini C., Siro L. The correlation of peak horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy and the Alpidic Belt // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1981. Vol. 71. N 6. P. 1993–2009.
26. Crouse C.B., Vyas G.K., Schell B.A. Ground motions from subduction zone earthquakes // Ibid. 1988. Vol. 78, N 1. P. 1–25.
27. Строительные нормы и правила СНиП II-7–81. М.: Стройиздат, 1982. 56 с.
28. Аптикаев Ф.Ф., Шабалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта // Исследования по сейсмической опасности. М.: Наука, 1988. С. 98–107. (Вопр. инж. сейсмологии; Вып. 29).

ISSN 0132-2826

АКАДЕМИЯ НАУК СССР



**ИСТОЧНИКИ  
И ВОЗДЕЙСТВИЕ  
РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ  
СЕЙСМИЧЕСКИХ  
КОЛЕБАНИЙ**

**ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ**

**Выпуск 31**

**„НАУКА“**