

## О СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ НОРМ СЕЙСМОСТОЙКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В РОССИИ

© 2002 г. А. А. Гусев

*Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Поступила в редакцию 29.04.2002 г.

С учетом современных представлений инженерной сейсмологии обсуждается ряд проблем, возникших к настоящему времени в России на стыке сейсмологии и сейсмостойкого проектирования. Многие из этих проблем порождены тем, что строительные нормы используют для характеристики колебаний грунта интенсивность землетрясения, выраженная в баллах макросейсмической шкалы (“балльность”). Основные выводы следующие. Балльность вполне приемлема как средство общего сейсмического районирования (ОСР). Принятая формула связи балла с амплитудой колебаний грунта подлежит пересмотру. На карте ОСР следует изображать балльность для скального, а не для среднего грунта. Описание влияния грунтовых условий в терминах “приращения балльности” устарело; следует переходить к спектральному описанию. Следует отказаться от использования в нормах значений балльности и приращения балльности, намеренно округленных до ближайшего целого.

*Ключевые слова:* сейсмическая опасность, сейсмическое районирование, балл, нормативы сейсмической опасности и нагрузки, сейсмостойкое строительство.

### ВВЕДЕНИЕ

Россия – одна из немногих стран, вошедших в XXI век с картой общего сейсмического районирования и нормативами сейсмической опасности, выраженными в баллах макросейсмической интенсивности. Более того, кроме особых объектов, таких как атомные электростанции, почти все взаимодействие российских сейсмологов и инженеров-строителей традиционно ведется на особом языке “баллов на среднем грунте” и “приращения балльности”. Возникает вопрос: не пора ли вслед за большинством других стран перейти на язык физических параметров колебаний грунта (амплитуд, спектров и т.д.)? Или традиционный подход обладает скрытыми преимуществами? Об этом и пойдет речь далее.

Изначальная и непосредственная задача макросейсмической шкалы (шкалы интенсивности в баллах) – быть средством определения, без приборов, относительной величины сотрясений грунта при произошедшем землетрясении. В самой шкале ничто не предполагает ее использования для целей *нормирования сейсмических нагрузок* в сейсмостойком строительстве. Правда, в ряде макросейсмических шкал к конкретным баллам привязаны конкретные диапазоны значений количественных параметров колебаний грунта, но это делается исключительно для ориентировки, так что регистрация конкретного значения параметра колебаний сама по себе никак не определяет балла. Однако за последние столетия в России возникла устойчивая традиция использования макросейсмической шкалы именно для нормиро-

вания сейсмической нагрузки. В этой ситуации важный, но, в сущности, побочный вопрос о привязке физических параметров колебаний к значениям балла приобретает неожиданно важное значение.

Кратко опишем сложившуюся к настоящему времени практику нормирования сейсмических нагрузок. На всю территорию страны сейсмологи составляют карту “сейсмической опасности” (seismic hazard) в узком, техническом смысле этого термина. Ниже словосочетание “сейсмическая опасность” будет использовано именно как термин. Сейсмическая опасность тесно связана с понятием сейсмической сотрясаемости, введенной Ю. В. Ризниченко [1965, Сейсмическая..., 1979]. Сотрясаемость определяется как повторяемость (среднегодовое число) сотрясений  $V$  с баллом  $I$ , равным или превышающим определенное пороговое значение  $I$ . Зависимость  $V$  от значения “порогового балла”  $I$  – это убывающая функция  $V(I)$ , она выражается в единицах год<sup>-1</sup>. В то же время на картах сейсмической опасности отражены значения соответствующей обратной функции  $I_{P0} = I(B_0)$  для фиксированного значения  $V = B_0$ , например, для  $B_0 = 0.002$  год<sup>-1</sup> = 1/500 лет. Иными словами, на карте сейсмической опасности нанесены значения макросейсмической интенсивности  $I_{P0}$  в баллах для таких будущих землетрясений, которые имеют, в идеале, точно определенный шанс иметь место в реальности. Обычно фиксируется определенный уровень вероятности возникновения колебаний с интенсивностью, равной или превышающей  $I_{P0}$ , хотя бы один раз в течение

50-летнего срока. Так, для включенных в ныне действующие нормы СНиП II-7-81\* карт ОСР-97 А, В и С заданы три значения вероятности, равные 10%, 5% и 1% (за 50 лет), они соответствуют значениям сотрясаемости  $B_0 = 1/475, 1/950$  и  $1/4750$  (в единицах  $\text{год}^{-1}$ ) или, округленно, периодам повторяемости сотрясений 500, 1000 и 5000 лет [Страхов и др., 1998; Gusev et al., 2000].

Описанные карты сейсмической опасности (в первую очередь карта ОСР-97-А для периода 500 лет) рассматриваются как карты общего сейсмического районирования (ОСР) страны [Уломов, Шумилина, 1999; Сейсмическое..., 2000] и включены в состав строительных норм и правил [СНиП II-7-81\*, 2000]. Проектировщик использует значение  $I_{p0}$  как величину “расчетной” (т.е. входной для инженерного расчета) интенсивности (синонимы: “расчетная балльность”, или, на языке СНиП, “сейсмичность”). Если уровень детальности работ ОСР недостаточен, проводятся работы по детальному сейсмическому районированию (ДСР) или его сокращенному варианту – “уточнению исходной сейсмичности” (УИС). Результатом этих работ, полностью или в основном, также является расчетная балльность.

Расчетная балльность на карте относится к “среднему” грунту. Для конкретной площадки расчетная балльность подправляется для учета фактических свойств грунта:

$$I_p = I_{p0} + \Delta I,$$

где  $\Delta I$  – это поправка за грунт, называемая “приращением балльности”, а  $I_{p0}$  снимается с карты ОСР в соответствии с географическим положением площадки строительства. Значения  $I_{p0}$  – целые из диапазона 6–9 баллов. Величина  $\Delta I$  принимает возможные значения –1, 0 или +1 балл. В простейших случаях  $\Delta I$  оценивается по инженерно-геологическим данным о литологии площадки. Для этого вводится понятие “категория грунта”; выделены три категории: I (скальные и особо плотные нескальные грунты), II (средние грунты), и III (мягкие грунты). Основываясь только на инженерной геологии, полагают, что

$$\Delta I = (\text{номер категории грунта}) - 2.$$

Однако более предпочтительна оценка  $\Delta I$  по изменению амплитуд колебаний на данном грунте (относительно “среднего” грунта) прямым сейсмологическим методом.

Далее выполняется переход от  $I_p$  к квазистатической расчетной нагрузке по спектральному методу (метод спектров реакции). В простейшем случае сооружение описывается как одномассовый упругий маятник с безразмерным затуханием 0.05. Для этой расчетной схемы выполняют следующие два шага:

(1) Определяют расчетное максимальное ускорение  $A$  колебаний грунта под сооружением на основе постулата жесткой функциональной связи между  $A$  и расчетной балльностью  $I_p$ . В действующих нормах величина  $A$  – безразмерная, в долях ускорения свободного падения  $g$ , и принята конкретная связь вида  $A = 0.1 \times 2^{I_p - 7}$ .

(2) Определяют расчетную инерционную силу, приложенную к сооружению, как

$$S = KmRA(T) = KQA\beta_{\Delta I}(T),$$

где

–  $m$ ,  $Q$  и  $T$  – масса, вес и собственный период сооружения;

– функция  $RA(T) = gA\beta_{\Delta I}(T)$  – это расчетный спектр реакции по ускорению; в сущности, это эффективное максимальное инерционное ускорение сооружения, возникающее при его вынужденных колебаниях; для целей нормирования оно расщепляется на два множителя – максимальное ускорение грунта  $gA$  и “коэффициент динамичности”  $\beta_{\Delta I}(T)$ ;

– “коэффициент динамичности”  $\beta_{\Delta I}(T)$  имеет чисто эмпирическое происхождение и получен на основе анализа и обобщения расчетов с реальными акселерограммами; он представляет собой осредненное значение безразмерного отношения максимального инерционного ускорения упругого маятника  $RA(T)$  к максимальному ускорению основания этого маятника  $gA$ ;

– коэффициент  $K$  – это чисто инженерный поправочный коэффициент, в простейшем случае равный 1.0 для расчета сооружений, повреждение которых недопустимо, и 0.22–0.35 для обычных зданий и сооружений.

Поясним, что сила  $S$  имеет двоякий характер: по происхождению – это динамическая нагрузка в процессе колебаний, а по использованию в расчете она считается приложенной статически; вся идея (упрощенного) инженерного расчета как раз и сводится к замене динамического расчета более простым статическим. Принятые в СНиП функции  $\beta_{\Delta I}(T)$  слегка различны для трех значений  $\Delta I = -1, 0, 1$ . Выбор функций  $A(I_p)$  и  $\beta_{\Delta I}(T)$  един для всей территории России.

В других странах также используют спектры реакции, но связь балл – расчетное ускорение чаще не используют, а строят карту ОСР непосредственно в расчетных значениях для физических параметров колебаний. В большинстве стран на карте отражают расчетное максимальное ускорение  $A$ , но в более продвинутом случае последних норм США непосредственно картируется значение спектра реакции для двух отдельных периодов. Нельзя не заметить, что, в отличие от

неявного российского стандарта – шкалы интенсивности MSK-64 [Медведев, 1968] и ее усовершенствованного варианта MMSK-84 [Ершов, Шибалин, 1984], новая европейская шкала EMS-98 [Grunthal, 1998] вообще (и принципиально) не содержит указаний на амплитудные параметры колебаний. Сам факт отсутствия жесткой связи наблюдаемой балльности и наблюдаемого максимального ускорения (а также наблюдаемой, реальной величины  $RA(T)$ ) общеизвестен. Таким образом, принятый сейчас в России принцип – использование карты ОСР именно в единицах балла, в комбинации с постулатом жесткой связи балл-ускорение – никак нельзя считать самоочевидным или общепринятым; он явно заслуживает обсуждения.

Еще больше проблем с концепцией приращения балльности. Сама идея учитывать влияние грунта в виде частотно-независимой поправки может быть и терпима в определенных случаях как инженерный прием. Трудность в том, что если идея зависимости расчетного максимального ускорения (на среднем грунте) от балла на карте ОСР (также на среднем грунте) относительно здрава, то идея прямой зависимости максимального ускорения от категории грунта (то есть от приращения балльности) в общем просто неверна: на самом деле, по ряду причин, наблюдаемое максимальное ускорение почти не зависит от типа грунта (см. ниже). Поэтому некорректна и оценка сейсмической нагрузки, основанная на прямой зависимости максимального ускорения от категории грунта (при фиксированном уровне колебаний скального геологического фундамента). Не менее серьезен тот детально обсуждаемый далее факт, что при больших амплитудах колебаний (8 баллов и более на скальном грунте) рост степени повреждения сооружений на “плохих” грунтах может вообще не сопровождаться ростом амплитуд.

Интерес к изложенным проблемам далеко не академический. Неверное решение на стыке сейсмологии и сейсмостойкого строительства чревато некорректностью инженерного расчета, либо в виде опасного недостатка, либо в виде расточительного избытка усиления. Далее обсуждаются следующие ключевые вопросы:

1) Является ли традиционное использование балла  $I$  в качестве базового параметра нормативных карт ОСР все еще приемлемым, или есть явно лучшие альтернативы (максимальное ускорение, спектр реакции...).

2) Если да, то: (а) адекватна ли принятая в действующих нормах конкретная связь  $A(I_p)$  и (б) следует ли давать на карте ОСР балл именно для среднего грунта.

3) Является ли адекватным традиционное описание эффекта грунтовых условий в терминах приращения балльности.

4) Приемлемо ли традиционное округление (до целого) как величин расчетной интенсивности  $I_{p0}$ , так и ее приращений  $\Delta I$ .

### БАЛЛ КАК СРЕДСТВО ОСР: МИНУСЫ И ПЛЮСЫ

В последние десятилетия в мире имеется четкая тенденция переходить на картах ОСР от баллов к амплитудным параметрам колебаний. Большинство стран используют максимальное ускорение колебаний грунта, а США перешли к спектру реакции. (Там карта ОСР – это две карты  $RA$  для периодов 1 с и 0.2 с, для других же периодов  $RA$  находится интерполяцией.) Не отстает ли Россия? Не устарела ли советская/российская практика приводить балл на картах ОСР?

Рассмотрим порядок применения карт ОСР. Инженер переводит расчетный балл  $I_p$  в расчетный спектр реакции  $RA(T)$  по выработанным инженерами-строителями правилам, и этот пересчет, по исходной идее, отражает связь реального наблюдаемого (с заданной повторяемостью) балла и параметров наблюдаемых колебаний грунта. Здесь две сложности: (1) наблюдаемый макросейсмический балл  $I$  не связан жестко с наблюдаемым максимальным ускорением (имеется большой разброс  $a_{\max}$  при заданном балле, более того, сама средняя зависимость  $a_{\max}(I)$  может быть определена с большой ошибкой); (2) наблюдаемое  $a_{\max}$  нельзя отождествлять с расчетной величиной  $A$ . Оба эти вопроса заслуживают обсуждения.

Итак, при фиксированном балле разброс измененного  $a_{\max}$  велик: стандартное отклонение  $\lg a_{\max}$  порядка 0.3 (вариации около двух раз в каждую сторону). Но когда используется зависимость  $A(I_p)$  из строительных норм, фактически по значению  $I$  жестко прогнозируется значение  $a_{\max}$  будущего землетрясения с помощью величины  $A$ . Является ли ошибка такого прогноза важной с инженерной точки зрения? По-видимому, нет. Важно лишь, что расчетное значение  $A$  реалистическое и при этом монотонно, систематически растет с ростом  $I_p$ . Дело в том, что инженеру истинное значение  $a_{\max}$  не очень важно, ему важно лишь задать адекватное расчетное значение  $A$ , которое обеспечит приемлемую прочность сооружения. Соотношение же истинного значения  $a_{\max}$  с величиной  $A$ , закладываемой в расчет, не тривиально. Во-первых, сооружение не идеально хрупко и большой одиночный выброс ускорения не страшен, важнее уровень амплитуд в области максимальных амплитуд на акселерограмме (ти-



па среднеквадратического экстремума ускорения, оцененного в плавающем окне длиной в несколько секунд). Во-вторых, считается, что очень короткий выброс (например, с характерной частотой 15 Гц) тоже не очень страшен: важно какое  $a_{\max}$  будет в “инженерном диапазоне периодов” (то есть, если пропустить акселерограмму через полосовой фильтр 0.3–10 Гц). В третьих, помимо значения амплитуды ускорения, на степень повреждений сильно влияет длительность колебаний с амплитудами, близкими к максимальным (поскольку разрушение реального сооружения происходит обычно не мгновенно, а постепенно, путем накопления повреждений, а для этого необходимо время). Наличие всех этих факторов приводит к тому, что инженеры нередко говорят, что они стремятся использовать не истинное, наблюдаемое “сейсмологическое” максимальное ускорение, а некое “эффективное” максимальное ускорение; однако единства в определении подобного “эффективного” параметра пока нет. В идеале, это “эффективное” значение и следовало бы использовать в качестве расчетного значения максимального ускорения  $A$ .

В этой ситуации, вполне логично связывать значение  $A$  (единственный расчетный параметр, прямо отражающий масштаб нагрузки) непосредственно со значением интенсивности, отражающей, в первую очередь, масштаб повреждения гипотетических зданий с фиксированной уязвимостью (таких, например, как когда-то типичный одноэтажный кирпичный дом по Медведеву [1962]). Становится ясно, что использование прямой связи расчетной балльности  $I_p$  с расчетным ускорением  $A$  – это по существу удобный обходной способ получить “эффективное ускорение”, не изучая реальных значений  $a_{\max}$  и заодно во многом обходя перечисленные трудные проблемы связи  $I_p$  с  $a_{\max}$  и  $a_{\max}$  с  $A$ . Поэтому, сама концепция использования балла  $I_p$  как параметра карты ОСР, дополненная явной спецификацией параметра  $A(I_p)$  как эффективного значения ускорения, выглядит вполне допустимой. Правда, на взгляд автора, картирование непосредственно параметра  $A$  все же предпочтительнее.

Остается один чрезвычайно серьезный вопрос: сколь реалистичны расчетные величины ускорения, то есть, по существу, верно ли выбрано значение константы в нормативной зависимости  $A(I_p)$ . Чтобы исключить систематические ошибки в расчетных нагрузках, принятая в нормах связь  $A(I_p)$  должна соответствовать средней зависимости между наблюдаемыми значениями  $a_{\max}$  и  $I$ . Проблема в том, что в течение всех последних десятилетий, по мере быстрого роста количества зарегистрированных акселерограмм, росло значение наблюдаемого среднего  $a_{\max}$ , соответствующего определенному баллу. В СНиП II-7-81

[1982], а вслед за ним и в СНиП II-7-81\* [2000] баллу  $I = 7$  (9) соответствует  $A = 0.1(0.4)$ . В то же время, последняя экспериментальная оценка по данным США [Wald et al, 1999] дает при  $I = 7(9)$  ожидаемое среднее геометрическое  $a_{\max} = 0.25g$  (0.90 g), то есть 220–250% от принятого в действующем СНиП. Таким образом, здесь имеются серьезные проблемы, они будут затронуты чуть позже.

Обсудим теперь альтернативные подходы. При использовании на карте ОСР, вместо баллов, амплитудных величин, последняя проблема (связь  $A(I_p)$ ) снимается автоматически, и в этом явное преимущество такого подхода. Зато остро встает обсуждавшаяся выше проблема перехода от реальных амплитуд к “эффективным”. Начнем со случая, когда на карте ОСР отражается расчетное значение максимального ускорения (то есть  $A$ ). В одном крайнем случае создающие карту сейсмологи могут игнорировать пока не устоявшуюся идеологию “эффективного” ускорения, и наносить на карту осредненное реальное, “сейсмологическое”  $a_{\max}$  (игнорируя при этом проблемы одиночных выбросов, необычных спектров, коротких выбросов и эффектов продолжительности колебаний). Тогда при использовании карты могут проявляться соответствующие искажения. В частности, те территории, где основной вклад в опасность создают очаги малых магнитуд, могут получить завышенную (относительно объективной) инженерную оценку опасности. Напротив, там, где определяющими являются большие магнитуды, инженерная оценка опасности будет занижена (из-за того, что не учитываются эффекты накопления повреждений при большой длительности). В другом крайнем случае инженеры выполняют оценки эффективного ускорения  $A$ , комбинируя сейсмологические данные и инженерные соображения, и картируют именно  $A$ ; зато при этом карта теряет прямой сейсмологический смысл (как карта значений максимального ускорения с заданной повторяемостью). Выходом из этого противоречия могло бы быть, разумеется, формальное определение “эффективного ускорения”. Тогда можно было бы строить независимо два варианта карт: для “сейсмологического” и для “эффективного” ускорения.

В варианте с использованием карты  $RA$  полностью снимаются проблемы одиночных выбросов, необычных спектров и коротких выбросов, и частично решается проблема учета длительности (только для коротких акселерограмм). Сохраняется лишь проблема учета длительности для землетрясений с магнитудами 7.5–8.5, когда эффекты накопления повреждений могут проявиться в полную силу. Этот дефект по существу неизбежен, если использовать метод спектров реакции и



Рост средних значений наблюдаемых максимальных амплитуд при  $I = 9$  баллов в связи с ростом количества зарегистрированных акселерограмм

Год исследований	Ускорения		Скорости		Источник
	$a_{\max}$ – интервал, g	$a_{\max}$ – точечное, g	$v_{\max}$ – интервал, см/с	$v_{\max}$ – точечное, см/с	
1942	–	0.32	–	–	Гутенберг, Рихтер [1961, стр. 52]
1964	0.2–0.4	0.28	16–32	22	MSK-64 [Медведев, 1968]
1973	0.24–0.48	0.34	24–48	34	Проект шкалы 1973 г. [Шкала..., 1975]
1975	–	0.52	–	–	Трифунак, Бради [Trifunac, Brady, 1975]
1988	0.4–0.8	0.6*	50–100	70	Аптикаев, Шебалин [1988]
1999	0.65–1.24	0.92*	60–116	83	Вальд и др. [Wald et al, 1999]

\* Экстраполированные значения.

тем самым следовать концепции линейной инвариантной во времени системы, в которой в принципе невозможно накопление повреждений. Однако этот дефект, по видимому, можно преодолеть с помощью поправки, зависящей от длительности. Следуя логике Аптикаева [1975], Аптикаева и Шебалина [1988] и Кеннеди [Kennedy, 1980], для поправки к спектральной амплитуде можно предложить выражение вида:

$$RA(T)/RA_0(T) = (d/d_0(T))^\varepsilon,$$

где

$RA(T)$  – рекомендуемое расчетное значение;

$RA_0(T)$  – предварительное значение спектра реакции, полученное обычным расчетом;

$d$  – длительность расчетного (сценарного) землетрясения;

$d_0(T)$  – длительность выхода осциллятора с периодом  $T$  и затуханием  $D$  на стационарный режим ( $d_0(T) \approx 2T/D$ , при  $D = 0.05$  это 40T);

$\varepsilon$  – эмпирический показатель, близкий к 0.15.

Подытоживая, можно считать, что с концептуальной стороны принятая в России логика построения карты ОСР именно в терминах балла является приемлемой. По существу – это способ ввести конкретное и разумное определение эффективного расчетного ускорения  $A$ . Если принятая связь  $A(I_p)$  соответствует реальности, карта такого рода, несомненно, может сохраняться и в будущем, хотя более последовательным было бы прямое использование на карте параметра “расчетное эффективное ускорение”.

Однако имеющееся сегодня более чем двукратное расхождение принятой в СНиП II-7-81\* [2000] зависимости  $A(I_p)$  с материалами анализа большого объема наблюдений за сильными движениями является крайне серьезной проблемой. Надо сказать, что проблема эта не новая и доста-

точно сложная. Как видно из приводимой таблицы, принятое в 1981 г. в СНиП II-7-81 [1982] для 9 баллов значение  $a_{\max} = 0.4$  g было в определенном смысле корректно – оно покрывает сверху соответствующий диапазон шкалы MSK-64 (0.2–0.4 g). Однако, как видно из таблицы, накопление данных меняло наши представления. К 1981г. значение 0.4 g было фактически устаревшим даже как оценка среднего. Аптикаев и Шебалин [1988] рекомендуют для 9 баллов оценку 0.60 g. Новая оценка Вальда и др. [Wald et al, 1999] равна уже 0.92 g. Правда, следует отметить, что обе эти оценки являются в определенной мере искусственными. Фактически в области 9 баллов рост ускорения с баллом прекращается (параметр  $a_{\max}$  насыщается). Эмпирическое среднее для 9 баллов составляет 0.45 g по [Аптикаев, Шебалин, 1988] и около 0.5 g. по [Wald et al, 1999]. Однако это насыщение для параметра  $a_{\max}$  мало что меняет с точки зрения инженерного расчета.

Дело в том, что насыщение  $a_{\max}$  ни в коей мере не является признаком насыщения разрушительной силы землетрясения (иначе и балл не рос бы). В частности, продолжает расти без выраженного насыщения наблюдаемая максимальная скорость колебаний грунта. (Весьма вероятно, что раздельный анализ по типам грунтов показал бы определенную тенденцию к насыщению на слабых грунтах; к сожалению, о работах, где проводился бы подобный анализ, автору неизвестно.) Приостановка в росте  $a_{\max}$  связана, по-видимому, с быстрым снижением характерной частоты спектра колебаний при росте балла [Чернов, 1989; Чернов, Соколов, 1988]. Такая тенденция имеет по крайней мере две совместные действующие причины: рост вклада относительно низкочастотной неволновой компоненты движения грунта вблизи разлома, а также быстрый рост с амплитудой нелинейных потерь в грунте, о чем будет еще речь ниже. В целом, нет сомнений в том, что условный,

эффективный параметр  $A$  должен продолжать расти с баллом.

Бытует мнение, что материалы США, где для оценки макросейсмических баллов используется модифицированная шкала Меркали [Wood, Neumann, 1931], не вполне сопоставимы с баллами по европейским шкалам. Автор начал работу по проверке результатов [Wald et al., 1999] на данных по землетрясениям России (рис. 1). Видно, что в области, обеспеченной данными, результаты [Wald et al., 1999] вполне подтверждаются. Похоже, что “амплитудная часть” шкалы MSK-64 действительно существенно занижает реальные параметры ускорений.

Отметим попутно, что в СНиП II-7-81\* [2000] значение  $A = 0.1 \times 2^{I_p - 7}$  используется также и как рекомендуемый нижний предел для значения максимального ускорения для акселерограммы, используемой в численном расчете сооружения. С этим нельзя не согласиться. Но ясно, что типичные реалистические значения максимальных ускорений примерно вдвое больше.

#### К КАКОМУ ГРУНТУ СЛЕДУЕТ ОТНОСИТЬ БАЛЛ НА КАРТЕ ОСР

Традиция использовать для привязки данных карты ОСР “средний” грунт (категория грунта II по СНиП) вполне понятна: территорий с наиболее благоприятным скальным (категория I) грунтом мало, а территорию с неблагоприятным мягким (категория III) грунтом брать за точку отсчета неудобно. Разумность такой практики, однако, стала вызывать сомнения, когда было осознано, что при высоких баллах механизм влияния грунтовых условий на степень повреждения сооружений качественно отличен от такого механизма при низких баллах. Вообразим участок поверхности Земли, на котором имеются площадки с грунтами всех трех категорий. И допустим, что этот участок подвергается действию землетрясений различной силы однородным образом, в том смысле, что на уровне скального геологического фундамента волны, падающие снизу в пределах этого участка, имеют однотипные амплитуды, длительности и спектры. При переходе от грунтов категории I к категории III макросейсмические эффекты (в первую очередь повреждения зданий), и тем самым наблюдаемый балл, будут нарастать примерно в соответствии с номером категории. При этом, при низких баллах это в основном связано с тем фактом, что с ростом категории грунта падает импеданс (акустическая жесткость)  $\rho V_s$  верхнего слоя грунтовой толщи и, соответственно, растут амплитуды колебаний грунта, по крайней мере, амплитуда скорости. (Это – простая линейная схема для гармоничес-

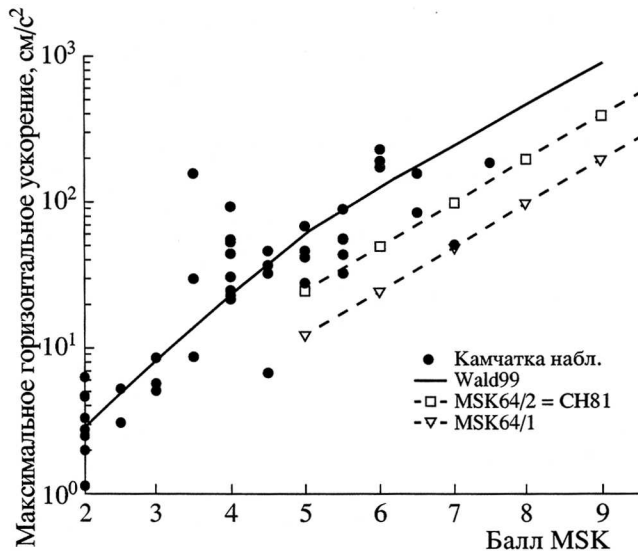


Рис. 1. Предварительный вариант зависимости наблюдаемых максимальных горизонтальных ускорений на Камчатке от сейсмической интенсивности по шкале MSK-64. Черные кружки – камчатские наблюдательные данные. Треугольники и квадраты – нижняя и верхняя граница диапазона ускорений для соответствующего балла по “амплитудной части” текста шкалы MSK-64 (Медведев, 1968). Тонкая линия – по [Wald et al., 1999].

ких колебаний из [Медведев, 1962]). При высоких же баллах (8–9 и более баллов на скальном грунте) нескальный грунт начинает разрушаться сейсмической волной, возникают пластическое поведение и течение грунта, трещины, псевдооживление и проч., и в результате начинают действовать принципиально иные закономерности. С одной стороны, разрушающийся грунт теряет несущую способность: он не может более служить опорой для зданий и сооружений. С другой стороны, по низкопрочному грунту не может распространяться высокоамплитудная волна, так что чем слабее грунт, тем ниже предельно высокая амплитуда волн, которая может наблюдаться на его поверхности. Таким образом, при высоких баллах, с одной стороны, амплитуда волны на его поверхности не только не нарастает, а, напротив, падает с ростом категории грунта, в радикальном отличии от поведения при низких баллах. С другой стороны, разрушительный эффект землетрясения продолжает нарастать с ростом категории грунта. Однако этот рост связан не с ростом амплитуды сейсмической волны, а с нарастанием эффектов деградации несущей способности грунта, и, в первую очередь, с неравномерной просадкой грунтов под зданиями.

На качественном уровне, описанная картина впервые была изложена автору Н.В. Шебалиным (личное сообщение, 1980 г.). Отдельные макросейсмические наблюдения, поддерживающие

данную точку зрения, давно стали классикой сейсмологии (землетрясение Ниигата 1964 г.), или даже вошли в текст макросейсмической шкалы (трещины в грунте, оползни). Однако лишь в последние 15 лет получен достаточно обширный объем прямых сейсмологических наблюдений данного явления (см. например, фундаментальный сборник [Irikuga et al., 1998] и библиографию в нем). Особенно убедительны материалы одновременной регистрации сильных движений в скважине и на поверхности.

Обсуждаемое явление достаточно сложно и многие его детали неясны, но на простейшем уровне оно сводится к следующему. По мере роста амплитуды сейсмической волны, падающей снизу на слой грунта, упругая деформация в волне в конце концов превосходит критическую деформацию разрушения грунта. Инструментальные наблюдения позволяют зафиксировать даже ранние степени разрушения, в то время как визуальные проявления возникают при больших амплитудах. Этот фактор приводит к повреждению и разрушению зданий и надземных сооружений за счет неравномерной осадки основания (а не по обычному механизму разрушения от боковой силы). Сваи, фундаменты, трубопроводы и пр. разрушаются при этом непосредственно (неравномерно увлекаемые деформирующимся грунтом). Если же осадка основания равномерная, сооружение может просто погрузиться (не разрушаясь) в оживленный грунт. Нельзя в этой связи не заметить, что возможность разрушения сооружения за счет неравномерных деформаций основания вообще не предусмотрена строительными нормами как важный род расчетной нагрузки.

По разрушающемуся грунту волна эффективно распространяться не может (ее энергия как раз и расходуется на разрушение). Если амплитуда падающей снизу волны будет расти, ее амплитуда выше разрушающегося слоя будет, очень грубо говоря, оставаться постоянной. На самом деле слабый рост амплитуды возможен, так как при деградации грунта падает его эффективный модуль сдвига, а с ним и эффективный импеданс (акустическая жесткость), но роль этого эффекта подчиненная. Надо подчеркнуть, что явление замедления и насыщения роста амплитуд колебаний поверхности нескального грунта при их росте на скальном основании не является какой-то аномалией: это типичное, повсеместное явление при достаточно сильном землетрясении. Этот эффект проявляется в первую очередь (уже при 0.2–0.3 g) в грунтах категории III, но с ростом амплитуд колебаний скального геологического фундамента он проявляется и на средних грунтах. Высказывалось по видимости парадоксальное мнение [Mohammediou, 1984], что  $a_{\max}$  на нескальном грунте, в среднем, вообще не может превысить уровня

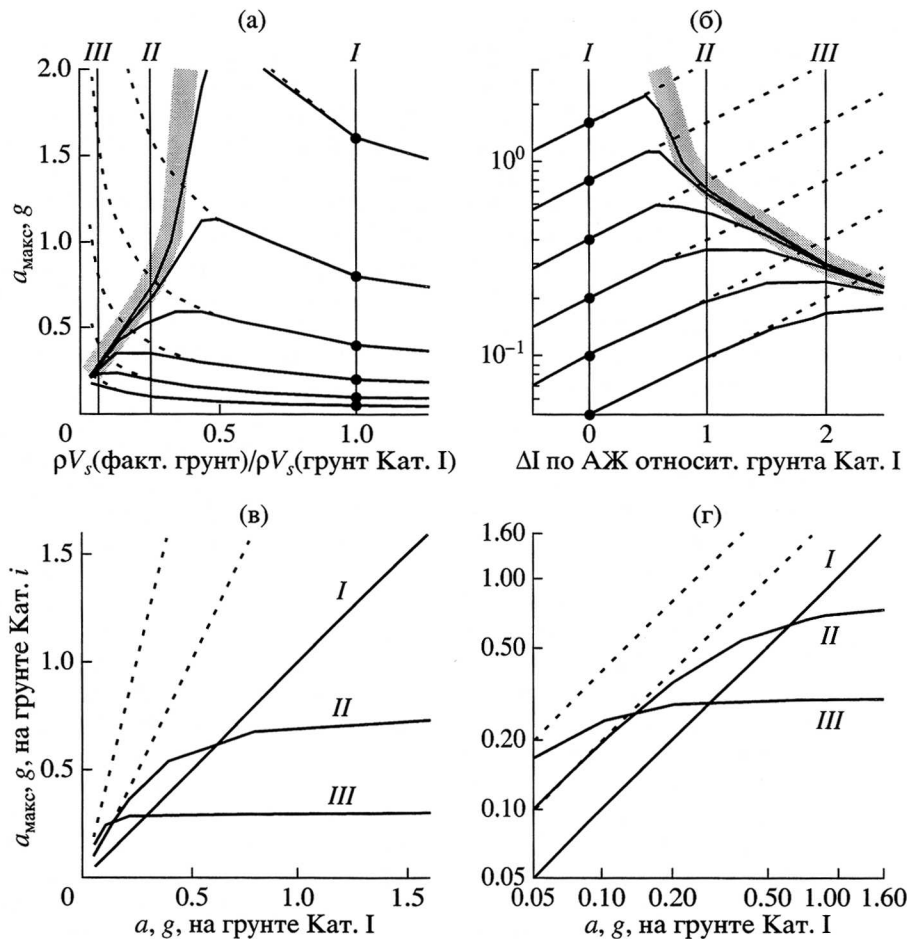
0.5 g; было отмечено (в связи со значениями ускорений в таблице, см. выше), что это мнение имеет серьезную наблюдательную основу. Грубо ориентировочно можно полагать, что предельное ускорение для грунта категории III составляет 0.25–0.4 g, а для грунта категории II – 0.5–1.0 g, в то время как ускорение скального грунта (или условное ускорение скального геологического фундамента) может достигать 1.5–2 g и более. Итак, с ростом амплитуд колебаний скального геологического фундамента повреждения на поверхности нескального грунта (и с ними балл) растут, а амплитуды (не только ускорения, но и скорости) расти перестают, “насыщаются”.

Обсуждаемое важное явление имеет нелинейный характер, и для его понимания полезна графическая иллюстрация. На рис. 2 дана качественная схема влияния нелинейности и разрушения грунта на величину максимального ускорения на поверхности. На верхней паре графиков (а), (б) приведены два варианта зависимости максимального ускорения на поверхности грунта от свойств верхнего слоя грунтовой толщи. На рис. 2а аргументом является акустическая жесткость  $\rho V_s$  этого слоя. Серия кривых построена для набора вариантов амплитуды падающей снизу волны, причем каждому такому варианту соответствует кружок на вертикальной линии, отвечающей типовому грунту категории I (скальный). Кружок помечает конкретное значение максимального ускорения на таком грунте; причем использован следующий ряд значений ускорения: 0.025; 0.05; 0.1; 0.2; 0.4; 0.8 и 1.6 g. Пунктирная линия описывает поведение амплитуд в условиях линейного поведения грунта (“бесконечно прочный грунт”). Вертикальные линии с пометками II и III соответствуют грунтам категорий II (грунт средней плотности) и III (мягкий грунт), соответственно. Значения акустической жесткости нормированы путем деления на акустическую жесткость грунта категории I. Рис. 2б – это аналог рис. 2а, но по оси абсцисс отложены значения приращения балльности  $\Delta I_{\text{АЖ}}$  относительно эталонного “идеального” грунта категории I, (рассчитанные, как обычно, через отношение акустических жесткостей:

$$\Delta I_{\text{АЖ}} = -1.66 \times \log(\rho V_s(\text{факт.грунт})/\rho V_s(\text{этал.грунт})).$$

Масштаб по оси амплитуд логарифмический. На нижней паре графиков (в), (г) по тем же условиям численным данным построена зависимость максимального ускорения  $a_{\max}$  на поверхности грунта категорий II и III от значения  $a_{\max}$  на поверхности грунта категории I. На графике рис. 2в масштаб натуральный, на графике рис. 2г – билгарифмический. Кривые этих графиков построены по точкам на двух вертикальных линиях, нане-





**Рис. 2.** Ориентировочная схема влияния нелинейности и разрушения грунта на величину максимального ускорения на его поверхности: (а) – зависимости максимального ускорения на поверхности грунта от нормированной акустической жесткости  $\rho V_s$  верхнего слоя, для набора вариантов амплитуды падающей снизу волны. Пунктир – линейное поведение амплитуд, сплошная линия – фактическое поведение. Серая полоса – условная предельная прочность грунта, выраженной через максимальное сейсмическое ускорение. Вертикальные линии II и III соответствуют грунтам соответствующих категорий (среднему и мягкому); (б) – аналог графика (а) в билогарифмическом масштабе, причем ось абсцисс оцифрована в единицах приращения балльности  $\Delta I$  относительно грунта категории I; (в) – зависимость максимального ускорения  $a_{\text{макс}}$  на поверхности грунта категорий I, II и III от значения  $a_{\text{макс}}$  на поверхности грунта категории I. Каждая линия графика (в) соответствует набору точек на соответствующей вертикальной линии графиков (а) и (б), (г) – аналог графика (в) в билогарифмическом масштабе.

сенных на каждом из верхних графиков. Принятая при построении данных графиков форма зависимости предельного ускорения от акустической жесткости и связанные с ней абсолютные значения предельных ускорений на грунтах категории II и III (равные 0.3 и 0.7 g) имеют сугубо ориентировочный характер.

Из рассмотрения верхней пары графиков (а), (б) видно, как с ростом амплитуды падающей снизу волны, амплитуда на поверхности сначала пропорционально растет, а потом насыщается, причем уровень насыщения тем ниже, чем слабее грунт. Причем, если при малых амплитудах падающей снизу волны приращение балльности по акустическим жесткостям успешно предсказывает поведение амплитуд на поверхности, то при

больших амплитудах падающей волны картина “переворачивается”: с ростом  $\Delta I_{\text{АЖ}}$  амплитуда на поверхности падает. Это “переворачивание” ясно видно на нижней паре графиков (в), (г), где амплитуда падающей волны выбрана в качестве аргумента. Пример последовательного нелинейного расчета поведения слоя мягкого грунта под действием падающей снизу высоко-амплитудной сейсмической волны на основе модели среды по Рамбергу-Осгуду содержится в [Mohammedioun, 1984].

Однако и при линейном поведении грунта (для низких и средних баллов) связь амплитуд с категорией грунта не вполне тривиальна по причине широкополосного характера сейсмического сигнала и эффектов поглощения. Вернемся к обсуж-

давшемся случаю трех площадок разных категорий грунта на одном участке. При переходе от грунтов категории I к категории III эффекты землетрясения, а с ними и наблюдаемый балл, будут нарастать примерно в соответствии с номером категории. Но даже при низких баллах акселерографы не регистрируют сколько-нибудь существенного роста амплитуд ускорения. Практическая независимость максимальных ускорений от типа грунта – это давно и хорошо установленный наблюдательный факт [например, Campbell, 1988; Joyner, Fumal, 1985]. Причина главным образом в том, что максимальное ускорение связано с высокочастотным участком спектра (4–10 Гц, периоды 0.1–0.25 с), а для этой полосы частот поглощение в грунтовой толще обычно достаточно велико. Снижение высокочастотных амплитуд за счет поглощения имеет тенденцию в существенной мере компенсировать их рост за счет низкого импеданса, и в результате даже при низких баллах значения амплитуд ускорения растут с категорией грунта достаточно слабо. При 7–8 баллах начинают включаться нелинейные эффекты, и названный слабый рост сначала прекращается, а затем заменяется спадом из-за вышеописанного “переворачивания” картины. При массовой обработке полученных при 5–9 баллах записей сильных движений подобные эффекты осредняются, и сглаженная эмпирическая картина сводится к практической независимости максимального ускорения от категории грунта. Эти экспериментальные факты, разумеется, резко противоречат неявно заложенной в действующие нормы СНиП П-7-81\* (таблица) зависимости  $A(\Delta)$  в виде двукратного роста на балл.

Рост расчетного ускорения  $A$  отражает тем не менее реальный рост повреждений с категорией грунта. Просто эта зависимость определяется не реальным максимальным ускорением грунта, а иными факторами. Рассмотрим, в частности, поведение спектра реакции. Зависимость спектра реакции от типа грунта дает малое или близкое к нулю приращение  $RA$  с категорией грунта в области 4–10 Гц (причины этого те же самые, что и в обсуждавшемся выше случае максимального ускорения). Одновременно имеет место устойчивый рост  $RA$  с категорией грунта в области 0.5–2 Гц (и то же поведение для максимальной скорости). Для промежуточных частот эффекты имеют промежуточный характер. Поэтому и амплитуды скорости, и повреждения зданий с не слишком малыми периодами будут вести себя в ожидаемом согласии с типом грунта. Такое поведение имеет линейный характер, оно связано с типичными формами передаточных функций грунтовых толщ (“спектральных поправок за грунт”); оно в общем не зависит от амплитуды колебаний или величины балла. Таким образом, эффект грунта существ-

венно зависит от частоты колебаний. Когда он принимается частотно-независимым, ценой такого упрощения является допущение определенных ошибок. К сожалению, эти (систематические) ошибки в определенных случаях ведут к существенному занижению расчетных нагрузок и к соответствующему снижению расчетной сейсмостойкости. Конкретно, в этой ситуации оказываются здания с малыми периодами собственных колебаний. Этот вопрос детально обсужден ниже. Сильнейшая зависимость эффекта грунтового слоя от частоты неплохо иллюстрируется рис. 5.14 в книге Ш. Окамото [1980].

Можно заметить, что для малых амплитуд (ниже уровня максимального ускорения 0.2 g) приводимые графики на рис. 2в, 2г плохо согласуются с защищаемой выше идеей, что амплитуда ускорения мало зависит от свойств грунта. Действительно, такое противоречие налицо, и было бы предпочтительнее выбрать для вертикальной шкалы рис. 2, например, единицы максимальной скорости (именно поэтому графики рис. 2 являются в основном иллюстративными). Выбор именно максимального ускорения как амплитудного параметра на рис. 2 связан с тем фактом, что по литературным данным можно дать реалистические ориентировочные уровни насыщения только для амплитуд ускорения (они приняты здесь условно как 0.3 g для III категории грунта и 0.7 g для II категории грунта). Для верхних пределов других параметров (как, например, для максимальной скорости) приемлемых оценок в литературе не нашлось.

Описанные факты важны по многим причинам. В рамках темы данного раздела из них следует, что только для скального грунта, с высокой прочностью и малыми нелинейными эффектами, сохраняется прямая четкая связь балл – амплитуда и при низких, и при высоких баллах. Это значит, что именно к скальному грунту, как к наиболее простому и ясному случаю, должны относиться нормативные параметры карты ОСР. При этом используемые при составлении или контроле такой карты исторические макросейсмические данные и зависимости балл-магнитула-расстояние должны быть соответствующим образом откорректированы.

## СЛЕДУЕТ ЛИ ВЫРАЖАТЬ ВЛИЯНИЕ ГРУНТОВ В ЕДИНИЦАХ БАЛЛЬНОСТИ

Традиция выражать влияние грунтов в единицах балльности (в виде приращения балльности  $\Delta$ ) является весьма устоявшейся. В простейшем случае логика учета грунтовых условий исходит из следующих предпосылок, восходящих к Медведеву [1962]:

1. Эффект грунта – это эффект роста амплитудных параметров колебаний.

2. Рост амплитуды скорости  $V$  определяется сохранением энергии при распространении волны (плотность энергии  $P = c\rho V^2$ , так что  $V_1 = V_0(c_0\rho_0/c_1\rho_1)^{0.5}$  и поэтому  $\Delta I_{01} = 1.66 \lg(c_0\rho_0/c_1\rho_1)$ , где  $V_0$  и  $c_0\rho_0$  относится к некоему “эталонному” (опорному, например, “среднему”) грунту, а  $V_1$  и  $c_1\rho_1$  к грунту площадки.

3. Амплитуда ускорения ведет себя так же, как и амплитуда скорости.

Именно такова логика СНиП для случая проектирования зданий массовой застройки: по данным о литологии грунтов определяют  $\Delta I_{01}$ ; так например,  $\Delta I_{01} = -1$  для скального грунта (с высокими  $c\rho$ ). При этом важно отметить, что параметр  $c_0\rho_0$  относится к верхнему 10-метровому слою грунта, и что эффекты рельефа и близлежащих разломов не учитываются формально. Если же проектировщик может заказать сейсмическое микрорайонирование (СМР), то вместо п.2 используется так называемое “инструментальное приращение балльности”. Оно рассчитывается в соответствии с документами РСН60-86 [1986], РСН65-87 [1987] по формуле

$$\Delta I_{01} = 1.66 \lg(x_0/x_1),$$

где через  $x$  обозначен один из амплитудных параметров – максимальное ускорение, скорость или даже смещение, или спектр реакции, или спектр Фурье; индексы 1 и 0 относятся к целевому и эталонному грунту, соответственно; а измерения проводятся, например, при слабом землетрясении. Понятно, что документы РСН60-86, РСН65-87 отражают в основном эпоху “до ЭВМ”, когда весьма широкополосный характер колебаний грунта еще не был ясно осознан, и можно было как-то верить в справедливость примитивной идеи, что смещения, скорости и ускорения ведут себя одинаково. Поэтому и спектральный подход в этих документах проводится не систематически, и одна из причин этого ясна: спектральный подход, грубо говоря, дает для каждой полосы частот свое  $\Delta I$ . Что делать практику, у которого отношение спектров на целевом и эталонном грунте сплошь и рядом существенно изменяется с частотой, эти (нормативные!) документы не говорят.

Сегодня в СМР спектральный подход на основе цифровой обработки колебаний малых амплитуд – это не новость, а классика, начинающая быстро устаревать. Поэтому продолжать опору на идею единого коэффициента (2 раза на балл) для смещений, скоростей и ускорений в части СМР является совершенно неприемлемым. Причина здесь не в принципе (раз спектральный подход – все меняем), а в том, что, как уже упоминалось, сегодняшний путь автоматического ведет в опреде-

ленных случаях к существенной недооценке расчетных нагрузок.

Это серьезное заявление требует доказательств. Они просты. Возьмем за исходный принцип, что расчетная нагрузка должна быть пропорциональна реальной сейсмической нагрузке. Принятое сегодня в СНиП значение  $\Delta I = -1$  для скального (категория I) грунта означает снижение расчетной нагрузки примерно вдвое относительно опорного в ОСР среднего грунта (потому что принятые кривые  $\beta_{\Delta I}(T)$  слабо зависят от типа грунта). Однако, как следует из детального обсуждения в предыдущем разделе, реальное движение грунта имеет на скальном грунте при 8–9 баллах ускорение, близкое к таковому на среднем грунте. Это значит, что если определяющим масштабным параметром колебаний является параметр  $A$  (условное максимальное ускорение), то этот параметр должен был бы приниматься почти или вовсе независимым от грунтовых условий. Поскольку на самом деле он в нормах вдвое меньше, то для частот 4–5 Гц и выше возникает существенная недооценка нагрузок – около двух раз. Собственные частоты около 4 Гц соответствуют обычным одноэтажным зданиям. Расчетная нагрузка для этих зданий буден занижена примерно вдвое.

Снова поясним, что этот факт не противоречит различию в среднем, типичном уровне повреждений, обобщенном по застройке разных типов. Хотя максимальное ускорение приблизительно постоянно, форма спектра реакции на разных грунтах обычно достаточно радикально различается и обеспечивает не только существенное различие максимальных скоростей (около двух раз на балл), но и соответствующие различия нагрузок для всех сооружений с собственными частотами от 2.5–3 Гц и ниже. В результате принятая в СНиП II-7-81\* схема учета грунтовых условий путем варьирования параметра  $A$  дает для скального грунта вполне корректный результат в области частот ниже 3 Гц. На фоне всей предшествующей критики, такой хороший результат может показаться странным; и действительно, он получается лишь потому, что принятая в СНиП II-7-81\* форма графиков  $\beta_{\Delta I}(T)$  (идентичные графики для категории грунта I и II и слегка отличный график для категории III) подобрана в большой мере искусственно, чтобы его обеспечить. Эта независимость формы графиков от типа грунта плохо согласуется с сейсмологической реальностью.

Выводы следующие.

#### А. По методике учета грунтовых условий

(1) Поскольку эффект грунтов частотно-зависим, пользоваться понятием приращения балльности  $\Delta I$  не следует. Для учета эффекта грунтов в рамках инженерного спектрального метода целе-



сообразно использовать частотно-зависимое приращение логарифма спектра реакции (ПЛСР) –  $\Delta \lg RA(f)$  (или обычно численно близкое к нему приращение логарифма (амплитудного, сглаженного) спектра Фурье (ПЛСФ) –  $\Delta \lg a(f)$ ).

(2) Основной задачей СМР следует считать оп-ределение частотно-зависимого ПЛСР относи-тельно скального/плотного (категория I) грунта

(3) При инструментальном СМР следует пред-принимать все усилия для использования скаль-ного эталонного грунта или проводить специа-льные исследования для определения сейсмологи-ческих характеристик принятого эталонного грунта/площадки.

(4) При инструментальном СМР, при полной невозможности проведения спектрального ана-лиза, следует принимать, что ПЛСР определяется отношением амплитуд скоростей. При использо-вании ускорений можно ожидать серьезных оши-бок. Полученные значения приращения логариф-ма амплитуд скоростей следует считать оценками ПЛСР для полосы частот, соответствующей мак-симуму спектра скорости сильных толчков (обычно это 0.5–1.5 Гц).

Если имеется крайняя необходимость распро-странить оценку на другие частоты, то это можно сделать путем экстраполяции на основе типич-ных кривых ПЛСР( $f$ ), полученных ранее для де-тально изученных грунтовых толщ, которые мо-гут служить аналогом изучаемой толщи.

(5) При инструментальном СМР с проведен-ием спектрального анализа следует рассчитывать частотно-зависимое ПЛСР на основе отношения спектров реакции, оцениваемого непосредствен-но или по отношению сглаженных амплитудных спектров Фурье.

(6) При оценке эффекта грунтов по литоло-гии, без сейсмологических работ, можно считать, по Медведеву, что ПЛСР определяется литоло-гией (через отношение импедансов). Однако ис-пользование параметров тонкого, мощностью всего 10 м, слоя опасно (его толщина, как прави-ло, меньше четверти длины волны). В качестве инженерного приема можно, например, исполь-зовать (следуя современной практике США) па-раметры для слоя толщиной 30 м. Полученное ПЛСР далее применять как в п.4

(7) Допустим условно, что будущие нормы, как и сегодня, станут различать всего три уровня эф-фектов грунта в виде категорий I, II и III (далее индексы КатI, КатII и КатIII). В предлагаемом подходе расчетный спектр реакции должен тогда включать, вообще говоря, три множителя: (1) значение  $A$  для скального грунта в районе распо-ложения площадки (например, полученное из  $(I_{p0} - 1)$  пересчетом по реалистической формуле

вроде  $A = 0.2 \times 2^{I_p - 7}$ ); (2)  $\beta(T)$  для эталонного скального грунта (обозначим его  $\beta_{\text{КатI}}(T)$ ) и (3) ПЛСР( $T$ ) для фактического грунта относительно этого эталонного грунта. Рассмотрим два кон-кретных случая.

(7.1) Расчетчику известна только литология. Для этого случая должны быть нормативно зада-ны либо стандартные функции

$$\beta^*(T|\text{КатII, КатIII}) = \beta_{\text{КатI}}(T) 10^{\text{ПЛСР}(T|\text{КатII, КатIII})},$$

определяющие суммарный эффект двух послед-них множителей, либо, что то же самое, сами стандартные грунтовые поправки ПЛСР( $T|\text{КатII}$  и КатIII). Подразумевается, что ПЛСР( $T|\text{КатI}$ )  $\equiv 1$  и  $\beta^*(T|\text{КатI}) \equiv \beta_{\text{КатI}}(T)$ . В идеале, функции  $\beta^*(T|\text{КатI, КатII, КатIII})$  должны характеризовать типичные или обобщенные комбинации спек-тральных свойств землетрясений и преобладаю-щих грунтов конкретного региона, но в крайнем случае могут быть едиными для всей страны.

(7.2) Проводится СМР сейсмологическим или другим подобным методом, так что известно экс-периментальное значение ПЛСР( $T_{\text{эксп}}$ ). Тогда ис-пользуются все три множителя по отдельности. При этом произведение  $A\beta_{\text{КатI}}(T)$  дает расчетное  $RA(T)$  на эталонном грунте категории I, а коэф-фициент  $10^{\text{ПЛСР}(T_{\text{эксп}})}$  подправляет результат для грунта конкретной площадки. Для нескального эталонного грунта эта схема требует небольших дополнений.

Описанный путь качественно отличен от сего-дняшнего, когда расчет идет на основе значения  $A$ , относящегося к данной площадке, а не к *гипо-тетической площадке со скальным грунтом*, а учет влияния грунта идет через параметр  $\Delta I$ , от которого автор и предлагает отказаться. (Заме-тим, что наши предложения могут быть легко пе-реформулированы на языке “частотно-зависимо-го приращения балльности”  $\Delta I(f) = \text{ПЛСР}(f)/\lg 2$ ; но введение подобной искусственной конструк-ции, на взгляд автора, крайне нежелательно.)

#### Б. По вопросу недооценки сейсмоопасности в действующем СНиП II-7-81\*

Использование принципа учета влияния грун-та через приращение балльности в комбинации с принятыми формами кривых  $\beta(T)$  порождает примерно двукратное занижение оценок расчет-ных нагрузок для сооружений малого размера на грунтах категории I и ведет тем самым к суще-ственному относительному снижению безопаснос-ти жителей одно-двухэтажных зданий, построен-ных в соответствии с нормами.

## О “КРУГЛЫХ” БАЛЛАХ

Принятая традиция использовать для величин  $I_{p0}$  и  $\Delta I$  только “круглые”, целочисленные значения баллов, очевидно, искажает реальность. На самом деле как расчет сотрясаемости, так и оценка эффекта грунтовых условий (через импеданс либо экспериментально) дают непрерывно изменяющиеся численные результаты. В контексте норм балл – величина условная, функционально связанная с расчетным ускорением, и нет никаких принципиальных причин считать его изменяющимся дискретными шагами. Процедура округления величины  $I_{p0}$  порождает ошибку, достигающую  $\pm 0.5$  балла. Тот же размер имеет ошибка округления величины  $\Delta I$ . Ошибка их суммы достигает  $\pm 1$  балла, или двух раз по амплитуде. Причем эта ошибка выглядит как “случайная” только при взгляде “из Москвы”; для жителей конкретного населенного пункта (или участка в нем) она означает постоянную недооценку или переоценку расчетной нагрузки до двух раз. Почему данный принцип сохраняется в современной практике – совершенно непонятно, особенно если вспомнить общий принцип численных расчетов: удерживать дополнительную значащую цифру в промежуточных выкладках. Интерполяция карты ОСР или введение зон дробного балла (7.0, 7.25, 7.5 и т.д.) не представляет труда, и такая детальность вполне корректна с точки зрения внутренней точности расчетов при составлении этой карты. Иллюстративный пример есть в [Гусев, 1991]. Расчет  $\Delta I$  даже по литологии, а тем более на сейсмологической основе, вполне позволяет оценивать  $\Delta I$  с точностью 0.2–0.4, а не 1.0 балла. Сохранение правила целочисленности  $I_{p0}$  и  $\Delta I$  на будущее выглядит ненужным и вредным консерватизмом.

Своеобразным оказалось проявление правила целочисленности расчетного балла в той новой ситуации, когда нормы СНиП II-7-81\* (в отличие от предыдущих норм СНиП II-7-81) содержат не одну, а три карты ОСР, относящиеся к трем уровням периода повторяемости сотрясений (500 лет для карты А, 1000 лет для карты В и 5000 лет для карты С). Теперь для каждой точки территории заданы три значения  $I_{p0}$ . Для простоты обсуждения введем параметр “приращение балльности за период повторения”  $\Delta I_{T_1/T_2}$  как разность значений расчетной балльности на карте для периода  $T_1$  относительно карты с периодом  $T_2$ . Из-за дискретности каждой из трех карт, значение  $\Delta I_{T_1/T_2}$  в каждом конкретном пункте карты также дискретно. Например, величина  $\Delta I_{1000/500}$  принимает значения 0 и 1 с сопоставимой вероятностью. Напомним, что цель создания именно серии карт – учет различий в уровне ответственности сооружений: карта А нормирует нагрузки для основной

(массовой) части зданий, карта В – для ответственных сооружений (аэропорты, больницы и т.п.). О карте С особое замечание ниже. Дискретность  $\Delta I_{1000/500}$  ведет к тому, что на практике для ответственных сооружений факт “ответственности” в расчетной нагрузке либо как бы вовсе не учитывается, либо, напротив, учитывается как бы с завышенным коэффициентом. На самом деле это лишь впечатление, искусственно порождаемое процедурой округления, но оно сильно запутывает понимание дела.

Можно было бы идти другим путем. Из работы [Гусев, 1991] следует, что приращение неокругленной расчетной балльности (точнее, обратной сотрясаемости) за счет вариаций повторяемости, равное 1.00 балла, отвечает росту периода повторения в 5–10 раз. При росте периода повторения в два раза (от 500 к 1000 лет) приращение обратной сотрясаемости должно поэтому составить 0.30–0.43 балла, а соответствующее изменение расчетной нагрузки – 1.23–1.38 раза. Прямая проверка по материалам расчета карт ОСР-97 показала, что средние по регионам значения приращения обратной сотрясаемости ( $\Delta I_{1000/500}$ ) заключены в диапазоне 0.2–0.7 балла (изменение нагрузки в 1.15–1.62 раза). Хотя учет вариаций данного параметра по территории принципиально не является бессмысленным, на фоне “ошибок округления” он не слишком оправдан. Кажется гораздо более естественным пренебречь в инженерном приближении подобными вариациями и учитывать степень ответственности сооружения с помощью единого повышающего коэффициента к нагрузке, порядка 1.4–1.5. (Кстати, в нормах США аналогичный коэффициент принят равным 1.50.)

Есть еще одно соображение против использования карт с повторяемостью более 1/500 лет. Дело в том, что с ростом периода повторения неизбежно растет неопределенность вычисленных значений сотрясаемости. Так, карта А (для периода 500 лет) является не более чем экспертным обобщением сейсмологических наблюдений, (которые имеются, в основном, за срок 50–100 лет), с, грубо говоря, десятикратной экстраполяцией во времени. Использование постоянного коэффициента за ответственность сооружения позволяет снять вопрос о степени надежности дальнейшей экстраполяции, просто отказываясь от использования карты В.

Попутно заметим, что для карты С (период повторения 5000 лет, для особо ответственных или опасных сооружений) степень неопределенности неизбежно еще выше, чем для карты В. Однако, при рассмотрении карты С следует принимать во внимание ее главное назначение внутри комплекта карт ОСР-97: она создавалась в первую очередь не как непосредственно нормативная карта,

а как оценочная для планирования последующих детальных изысканий класса ДСР или УИС.

### О НАГРУЗКАХ И РАСЧЕТНЫХ СХЕМАХ В УСЛОВИЯХ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТА

Выше отмечалось, что сейсмологические данные говорят о стабилизации (насыщении) или даже снижении амплитуд колебаний мягкого грунта при росте амплитуд колебаний скального геологического фундамента. Однако при отсутствии явного роста амплитуд, в зданиях продолжают расти разрушения, а с ними и макросейсмический балл. Налицо парадокс: разрушения растут несмотря на стабилизацию нагрузки. Как отмечалось выше, такие разрушения связаны в первую очередь с эффектами потери устойчивости (разрушения, псевдооживления) грунтов под зданиями. (Те же явления, но на более высоком уровне амплитуд, могут возникать и в средних грунтах.). При этом действующие нормы СНиП II-7-81\* [2000] не предусматривают расчет на подобные нагрузки. Ранее, однако, нормы требовали от проектировщика увеличивать вдвое расчетную боковую нагрузку на здание на грунте категории III (относительно категории II) в согласии с макросейсмическими данными и в противоречии с сейсмологическими данными об амплитудах. Искусственно завышенная вдвое боковая нагрузка на грунте категории III вынуждала проектировщика усиливать здание в целом, и это, пусть не вполне эффективно, увеличивало его сопротивляемость неравномерной просадке грунта под зданием. Такая линия соответствует общей идеологии увеличения запаса прочности в условиях неопределенности. В новой редакции норм СНиП II-7-81\* для описанных условий (по-видимому, с учетом сейсмологических данных об относительном снижении амплитуд) нагрузка снижена до 70% от первоначальной: вместо двух раз предлагается использовать коэффициент 1.4 (см. СНиП II-7-81\* [2000] п. 2.5 примечание 2). Теперь упомянутый резерв безопасности существенно снижен, но это снижение ничем не компенсировано в смысле реалистического учета неравномерных просадок. Некоторые пути учета возможных просадок описаны, например, в книге Ш. Окамото [1980, разд. 7.5.2].

Не будучи специалистом-инженером, автор может лишь высказать опасения в этой связи. С точки зрения автора, расхождение между ростом балла и стабилизацией или падением амплитуды ускорения на грунте категории III при балльности 8 и более должно учитываться явно и прямо. А именно, при расчете на действие боковой инерционной силы надо принять во внимание ее замедленный или даже нулевой рост с категорией

грунта, но одновременно непременно добавить требование дополнительного расчета здания на неравномерную осадку грунта под ним. Как временную меру можно предложить вернуть применявшийся до 2000 г. коэффициент 2.0 к нагрузке на грунте категории III вместо нового пониженного коэффициента 1.4.

### ВЫВОДЫ

1. Использование балла как инструмента нормирования в принципе не хуже чем использование максимального ускорения и даже может иметь определенные преимущества.

2. Принятая сегодня в СНиП II-7-81\* конкретная связь балл-ускорение  $A = 0.1 \times 2^{I_p - 7}$  не соответствует средней связи наблюдаемых баллов и ускорений, что должно существенно занижать фактические расчетные нагрузки в России относительно грамотного сейсмологического прогноза. Величина занижения, оцененная выше, составляет примерно два раза.

3. В качестве меры сейсмоопасности территории или площадки целесообразно использование расчетного балла на грунте категории I (скальном), а не на грунте категории II (среднем), и нормы должны бы давать переход от приводимого на карте расчетного балла для грунта категории I (скального) к расчетному спектру реакции  $RA(T)$  на грунте категорий I, II и III, (или для более дробно классифицированных грунтов).

4. Последовательное использование частотно-независимого приращения балльности в спектральном подходе к нормированию сейсмических нагрузок невозможно. Из-за этого, в частности, действующие нормы занижают примерно вдвое корректную расчетную нагрузку для одноэтажной застройки на скальном грунте. Учет грунта в терминах приращения балльности следует заменить на использование спектральных (частотно-зависимых) грунтовых поправок к амплитудам.

5. Принцип использования только целочисленных, "круглых" баллов ведет для отдельных пунктов и площадок к искусственным систематическим ошибкам расчетных нагрузок, достигающим 1.0 балла. Следует либо сделать карту ОСР в изолиниях балла и интерполировать ее, либо сделать карту в духе современной, с зонами постоянного уровня, но с шагом 0.25 балла. Это относится и к грунтовым поправкам, которые либо вовсе не следует округлять, либо в другом варианте округлять до 0.25 балла.

6. Тот же принцип целочисленности ведет к тому, что разность значений расчетной балльности в одном и том же пункте по картам ОСР-97-А и ОСР-97-В равна то нулю, то единице. В результате учет степени ответственности сооружения



происходит как бы несистематическим образом. Предлагается вести учет ответственности на основе единого повышающего коэффициента к нагрузке, порядка 1.5, и использовать только одну карту А.

7. Имеет место кажущееся противоречие между ростом повреждений (макросейсмического балла) и отсутствием роста амплитуды наблюдаемого ускорения на грунте категории III (мягком) при 8–9 и более баллах. Это расхождение нельзя считать основанием для простого снижения расчетной инерционной нагрузки (боковой силы) для таких грунтов. Подобное снижение расчетной нагрузки станет оправданным только при условии, что дополнительно проводится расчет сооружения на разрушение от неравномерной просадки грунта под ним.

Автор благодарен В.И.Уломову за полезные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Антикаев Ф.Ф.* Учет длительности колебаний при инструментальной оценке сейсмической интенсивности. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука. 1975. С. 234–239.

*Антикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В.* Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта. Исследования по сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 29. М.: Наука. 1988. С. 98–108.

*Гусев А.А.* О необходимости корректировки документов, регламентирующих антисейсмические меры в СССР. Комплексная оценка сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 32. М.: Наука. 1991. С. 147–160.

*Гутенберг Б., Рихтер К.Ф.* Магнитуда, интенсивность, энергия и ускорение как параметры землетрясений (I). Слабые землетрясения. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. С. 45–71.

*Ершов И.А., Шебалин Н.В.* Проблемы конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов. Прогноз сейсмических воздействий. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 25. М.: Наука. 1984. С. 78–95.

*Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. М.: Госстройиздат. 1962. 284 с.

*Медведев С.В.* Международная шкала сейсмической интенсивности. Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 151–162.

*Окамото Ш.* Сейсмостойкость инженерных сооружений. Пер. с английского Л.Ш. Килимника. М.: Стройиздат. 1980. 342 с.

*Ризниченко Ю.В.* От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1965. № 11. С. 1–12.

РСН 60-86. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. Госстрой РСФСР. 1986. 17 с.

РСН 65–87. Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. Госстрой РСФСР. 1987. 14 с.

Сейсмическая сотрясаемость территории СССР. М.: Наука. 1979. 192 с.

Сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Карта М: 1:8000000 на 4-х листах / Гл. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: ОИФЗ-РОСКАРТОГРАФИЯ. 2000.

СНиП-II-7-81. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. М.: Стройиздат. 1982. 40 с.

СНиП-II-7-81\*. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП. 2000. 44 с. + прил. 2: 10 карт.

*Страхов В.Н., Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Общее сейсмическое районирование территории России и сопредельных стран // Физика Земли. 1998. № 10. С. 92–96.

*Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с.

*Чернов Ю.К.* Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. АН УЗССР. Ин-т сейсмологии. Ташкент: Фан. 1989. 295 с.

*Чернов Ю.К., Соколов В.Ю.* Оценка балльности землетрясений по спектру колебаний грунта. Исследования по сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 29. М.: Наука. 1988. С.62–73.

Шкала и система измерения сейсмической интенсивности в баллах (Проект, одобренный Бюро МСССС 16 ноября 1973 г.). Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука. 1975. С. 7–10.

*Campbell K. W.* Predicting strong ground motions in Utah. Evaluation of regional and urban earthquake hazard and risk in Utah. Los Angeles. 1988. P. 27–36.

*Grunthal (Editor).* European Macroseismic Scale EMS-98. 1998. G. ESC, Subcommittee on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scale. Luxembourg, 1998. 99 p.

*Gusev A.A., Pavlov V.M., Shumilina L.S.* An improved technique for determination of seismic hazard. J. of Earthquake Prediction Research. 2000. V. 8. № 1. P. 104–110.

*Irikura K., Kudo K., Okada S., and Sasatani T.* (Eds) The effects of surface geology on seismic motion. Balkema, Rotterdam, 1998. 806 p.

*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.

*Kennedy R.P.* Ground motion parameters useful in structural design. Proc. Conf. XIII Evaluation of regional seismic haz-

ards and risk. US Geol.Survey, Menlo Park. 1980. P. 90–106.

*Mohammadioun B., Pecker A.* Low-frequency transfer of seismic energy by superficial soil deposits and soft rocks // Earthq. eng struct. mech. 1984. V. 12. P. 537–564.

*Trifunac M.D., Brady A.G.* On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong motion // Bull. Seism. Soc. Am. 1975. V. 65. P. 139–162.

*Wald D.J., Qitoriano V.O, Heaton T.H., Kanamori H.* Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California, Earthq. Spectra. 1999. V. 15. P. 557–564.

*Wood H.O., Neumann F.* Modified Mercalli intensity scale of 1931 // Bull. Seism. Soc. Amer. 1931. V. 21. № 4. P. 277–283.