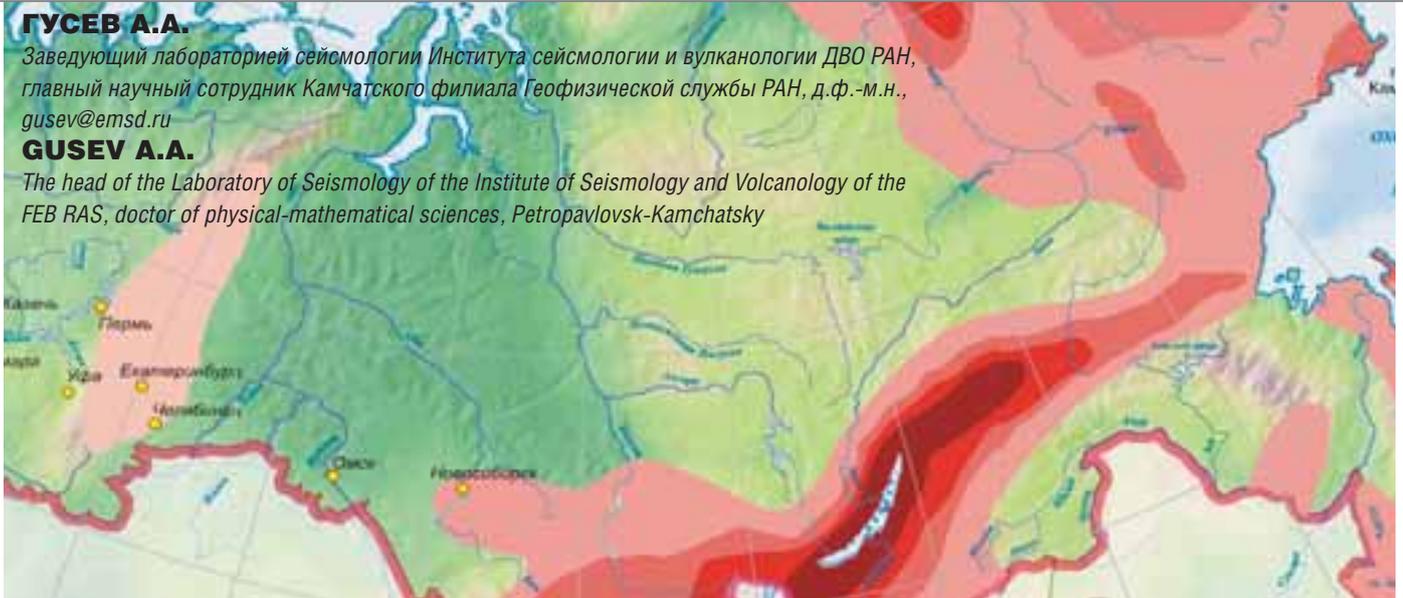


**ГУСЕВ А.А.**

Заведующий лабораторией сейсмологии Института сейсмологии и вулканологии ДВО РАН, главный научный сотрудник Камчатского филиала Геофизической службы РАН, д.ф.-м.н., gusev@emsd.ru

**GUSEV A.A.**

The head of the Laboratory of Seismology of the Institute of Seismology and Volcanology of the FEB RAS, doctor of physical-mathematical sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky



## О ПРИНЦИПАХ КАРТИРОВАНИЯ СЕЙСМООПАСНЫХ РЕГИОНОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И НОРМИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ТЕРМИНАХ СЕЙСМИЧЕСКИХ УСКОРЕНИЙ

### ON THE PRINCIPLES OF MAPPING THE EARTHQUAKE-PRONE REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION AND NORMALIZING SEISMIC LOADS IN TERMS OF SEISMIC ACCELERATIONS

**Ключевые слова:** сейсмоопасные регионы; сейсмические нагрузки; сейсмическое районирование (СР); общее сейсмическое районирование (ОСР); карты ОСР; движения грунта; сильные движения грунта (СДГ); интенсивность; балльность; приращение балльности; амплитуды колебаний; максимальные ускорения; вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО); акселерографическая сеть; грунтовые поправки.

**Аннотация:** в связи с разработкой нового варианта карты общего сейсмического районирования (ОСР) территории России встала задача создания такой карты в терминах амплитуд колебаний вместо традиционных баллов интенсивности. В статье обсуждаются пути практического решения данной задачи в короткой перспективе. Отмечается, что применение вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) в терминах амплитуд в условиях малой изученности движений грунта в России не может дать надежного результата, поэтому вместо этого предлагается использовать амплитудные оценки на основе пересчета оценок ВАСО в баллах. Автор рекомендует составлять карты ВАСО и ОСР в терминах максимальных ускорений для скального грунта и пересчитывать баллы в ускорения с учетом различий в зависимостях между ними для разных грунтов. Отмечается наличие проблем, связанных с частотной и амплитудной зависимостями грунтовых поправок, что делает невозможным решение указанной задачи на основе традиционной концепции приращения балльности. Указываются пути преодоления выявленных трудностей. Отмечается острая необходимость создания акселерографической сети в России для составления в перспективе более надежных карт ОСР.

#### Введение

Традиционно сейсмическое районирование (СР) в бывшем СССР и России (в том числе общее сейсмическое районирование — ОСР) проводилось

в терминах макросейсмической интенсивности. При инженерных расчетах использовали значения нормативной макросейсмической интенсивности, снятые с включенной в СНиП карты

**Key words:** earthquake-prone regions; seismic loads; seismic zoning (SZ); general seismic zoning (GSZ); general seismic zoning maps; ground motions; strong ground motions; intensity; intensity increase; vibration amplitude; peak accelerations; probabilistic seismic hazard analysis (PSHA); accelerography network; ground corrections.

**Abstract:** in connection with development of the new version of the general seismic zoning (GSZ) map of Russia the task of creating such a map in terms of ground motion amplitudes instead of traditional intensity grades has been set. The article discusses the ways of practical solution of this task in the short perspective. The author notes that using the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) in terms of amplitudes because of little-studied ground motions in Russia can not give reliable results, so instead of it he proposes using amplitude estimates derived from PSHA values calculated in terms of intensity. The author also proposes to develop PSHA and GSZ maps in terms of the maximum accelerations for rock and a method of converting intensity grades into accelerations taking into account the differences in «intensity grade — acceleration» relationships for various soils. He notes that there are some problems connected with the frequency and amplitude dependencies of ground corrections that makes it impossible to solve the indicated task on the base of the traditional concept of intensity increment. Some ways of overcoming the revealed difficulties are presented. The exigency of developing an accelerograph network in Russia to create more reliable GSZ maps in the future is pointed out.

ОСР, которые затем пересчитывали в расчетные максимальные значения ускорений грунта. Затем, используя ускорение, находили нагрузку на сооружение. Сложилось даже особая

терминология и язык, например, инженеры называют нормативную макросейсмическую интенсивность (МИ) «сейсмичностью», а сейсмологи часто называют как расчетную, так и наблюдаемую МИ «балльностью». Принято также называть пиковое значение (максимальный модуль, экстремум) ускорения «максимальным ускорением».

В период с 1960 по 2000 год абсолютное большинство стран перешло к сейсмическому районированию (зонированию) в терминах амплитудных параметров колебаний — максимальных ускорений, максимальных скоростей или уровней спектра реакции. Так, в США в 1990-х годах отказались от карты максимальных ускорений и перешли к уровням спектра реакции. В Европе же и в Китае сохраняются максимальные ускорения. На фоне такой сложившейся в мире практики традиционный для России подход к общему сейсмическому районированию с использованием балльности может сохраняться или быть пересмотренным, но в любом случае полезно рассмотреть вопрос оценки расчетных амплитудных параметров колебаний в рамках планируемого пересмотра ОСР.

Далее в настоящей статье данная тематика будет обсуждена детально. Будут рассмотрены следующие вопросы:

- вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) как типовой подход к ОСР; подходы к ВАСО с использованием балльности (ВАСО-I) и амплитуд (ВАСО-A);
- требования к изученности движений грунта для случая ВАСО-A, сравнение их с фактическим положением дел и пути обхода трудностей;
- существенные расхождения между наблюдательными фактами инженерной сейсмологии (сейсмологии сильных движений грунта — СДГ) и инженерной практикой, отраженной в соответствующем СНиП; рекомендации по преодолению этих проблем;
- предлагаемые процедуры по включению амплитудных параметров в схему ОСР, которые можно реализовать в короткой перспективе.

Чтобы преодолеть проблему большого разнобоя и в то же время случайных совпадений обозначений, в данной работе делается попытка создать их определенную систему. Примем следующие обозначения:

- $A$  — максимальное ускорение грунта, принятое как базовое для инженерного расчета, без повышающих или понижающих коэффициентов (при использовании ВАСО оно обычно соот-

ветствует определенному периоду повторяемости сотрясений, обозначаемому  $T_n$ );

- $K$  — непрерывный параметр грунтовой толщи («категория грунта»), равный 1,0; 2,0 или 3,0 для категорий грунта I, II или III по российским нормам СНиП II-7-81\* [15] и РСН 60-86 [13] соответственно (нецелые значения  $K$  можно приписать также классам грунтов из норм США или Европы, для чего, например, следует провести интерполяцию по аргументу  $\lg(V_s)$ , где  $V_s$  — средняя скорость поперечных волн в верхней части разреза);

- $A_{kn}$  — значение  $A$  для коренных пород или для типового («эталонного») скального грунта, имеющего  $K = 1$  в России;  $I_{kn}$  — соответствующее значение балльности (по аналогии с  $A_{kn}$  определяются следующие параметры:  $A_B$  — для грунта опорного класса В норм США;  $A_{Ae}$  — для грунта опорного класса А европейских норм;  $A_{K2}$  — значение  $A$  для опорного в советском/российском ОСР среднего грунта, имеющего  $K = 2$ ; символ  $A_K$  обозначает значение  $A$  для нефиксированной категории грунта с переменным значением  $K$ );

- $a$  — наблюдаемое максимальное ускорение грунта (индивидуальное или осредненное);

- $RA(T)$  — спектр реакции по ускорению для сооружения, моделируемого одномассовым маятником с периодом  $T$  (далее его затухание  $D$  всегда будет приниматься равным 5%);

- $\beta_K(T) = RA(T)/A$  — традиционный коэффициент динамичности (обычно  $\beta_K(T)$  различен для разных  $K$ ; нормировка — на  $A = A_K$ ).

## 1. Содержание ВАСО, в том числе ВАСО-A. Практика США и Европы. Проект GSHAP. Возможности для ВАСО-A в России

### 1.1. ВАСО — современный подход к сейсморайонированию страны. ВАСО-I в России

Распространенный современный подход к сейсмическому районированию заключается в том, что на всю территорию страны составляется карта сейсмической опасности (seismic hazard) в узком, вероятностном смысле этого термина. Чтобы ясно разделить понятия о сейсмической опасности в обычном и в узком смысле, ее рассматривают как результат особой процедуры — вероятностного анализа сейсмической опасности, или ВАСО (PSHA).

Сейсмическая опасность по ВАСО тесно связана с понятием «сейсмическая сотрясаемость», введенным Ю.В. Ризниченко [12]. Сотрясаемость в точке определяется как среднегодовое число  $B$  (повторяемость) сотрясений с балльностью  $I'$ , равной или превышающей определенное пороговое значение  $I$ . Зависимость  $B$  от значения пороговой балльности  $I$  — это убывающая функция  $B(I)$ , выражаемая в единицах в год ( $\text{год}^{-1}$ ). Нередко в качестве информации о сейсмической опасности картируется величина среднего периода повторяемости  $T_n(I) = 1/B(I)$  для набора фиксированных значений пороговой балльности  $I$ . Такое представление является прозрачным, достаточно полным, но не компактным. Поэтому сложилась практика отражения на картах сейсмической опасности значения соответствующей обратной функции  $I_{P0} = I(B_0)$  для фиксированного значения повторяемости  $B = B_0$  (например для  $B_0 = 0,002 \text{ год}^{-1} = 1/500 \text{ лет}$ ). Таким образом, на карте сейсмической опасности нанесены такие пороговые значения балльности  $I_{P0}$ , которые имеют, в идеале, точно определенный шанс (например 0,002) быть превышенными при будущих землетрясениях в течение годового срока. При этом годовая вероятность, или повторяемость  $1/T_n$ , одинакова в каждой точке конкретной (построенной для заданного  $T_n$ ) карты, а значение  $I_{P0}$  меняется от точки к точке.

Короче говоря, карта сейсмической опасности отражает уровень сейсмического воздействия с заданной вероятностью непревышения за заданный период времени. Пороговая балльность  $I_{P0}$  в практике России используется как входной параметр инженерного расчета, поэтому далее мы будем называть ее «нормативной балльностью». Обычно для целей ОСР фиксируется определенный уровень вероятности возникновения колебаний с интенсивностью, равной или превышающей  $I_{P0}$ , хотя бы один раз в течение не 1 года, а 50 лет. Так, для действующей в настоящее время карты ОСР-97А это значение вероятности принято равным 10% (за 50 лет), что соответствует значению сотрясаемости  $B_0 = 1/475 \text{ год}^{-1}$ , или периоду повторяемости 475 лет (округленно 500 лет) [16]. Ясно, что в описанном подходе без всяких изменений можно заменить балльность  $I$  на амплитудный параметр, в качестве которого можно использовать, например, значение максимального ускорения или его логарифм. Если опорный

грунт — скальный, то картируемым параметром будет  $A_{кн}$ . Отметим, что балльность на картах ОСР-97 относится к среднему грунту (категории II по СНиП II-7-81\* [15]).

Недавно возник подход к нормированию, когда на вероятностной основе делается попытка учесть разброс реальной прочности возведенных сооружений, формально рассчитанных на определенную, фиксированную нагрузку. Практически это означает введение дополнительного повышающего коэффициента к нагрузке ( $k_{вер}$  порядка 1.1–1.3). Значение этого коэффициента существенно зависит от формы «кривой опасности», то есть кривой спада годовой частоты землетрясений с ростом их амплитуды или балла. Чем круче спад, тем ниже роль данного фактора. Включение соответствующих процедур в СНиП возможно, особенно в линейном приближении. Например, совместно с картой ОСР нетрудно построить карту параметра  $B_I' = -d \lg B(I) / dI$ . Значение  $B_I'$  определяет, как быстро растет значение периода повторяемости при росте  $I_{p0}$  вблизи некоторого опорного значения  $I_{p0}$ . В [1] изучен реальный разброс значений скорости спада сотрясаемости на эмпирической основе, по статистике исторической макросеймики (а не с помощью в чем-то спорного расчета по ВАСО). Оказалось, что этот разброс может быть охарактеризован диапазоном вариаций повторяемости от 4 до 10 раз на единичное приращение балла, то есть вариаций  $I_p$  от 1 до 2 баллов при изменении повторяемости в 10 раз. Таким образом, учет данного фактора отражает реальное поведение сотрясаемости. Вместо создания карты параметра  $B_I'$ , было бы еще удобнее, задав предполагаемую статистику прочности сооружений, рассчитать значения  $k_{вер}$  сразу на этапе ОСР и передать их расчетчику в виде готовой карты (с относительно низкой детальностью). Так, в [31] предлагаются для разных  $B_I'$  значения такого множителя: в диапазоне (1.1–1.2) (табл. 10) и до 1.35 (согласно табл. А1). Альтернативно, значения  $k_{вер}$  можно было бы рассчитать на основе серии карт ОСР для разных периодов повторяемости (типа ОСР97-ABC). Но этот вариант можно было бы осуществить аккуратно, только если бы эти карты отражали неокругленные значения  $I_{p0}$ . Фактически выполненное округление карт ОСР97-ABC до целого балла делает подобный обходный путь очень гру-

бым и одновременно непрозрачным. В ряде случаев результаты таких «уточнений» прямо противоречат здравому смыслу. К сожалению, авторы последней версии СНиП/СП (май 2011) для реализации данного подхода применили именно этот неоптимальный путь.

Карты сейсмической опасности, полученные с помощью процедур ВАСО, будем далее называть картами ВАСО. Для краткости подходы к ВАСО с использованием балльности или амплитуд будем называть соответственно ВАСО-I или ВАСО-A. Во многих странах карты ВАСО (в первую очередь карты для периода повторяемости 475 лет) рассматриваются как основа для карт сейсмического зонирования, или районирования, страны. Чаще используют максимальное ускорение, но в США ОСР описывается через две карты  $RA$  для периодов сооружения 1,0 и 0,2 с (а для других периодов  $RA$  находится интерполяцией специального рода). В России подход ВАСО-I для ее территории впервые применили при создании карт ОСР-97.

В российской практике нормативная балльность для конкретной площадки подправляется для учета фактических свойств грунта:  $I_p = I_{p0} + \Delta I$  (где  $\Delta I$  — поправка за грунт, называемая «приращением балльности»). Значения  $I_{p0}$  снимаются с карты ОСР в соответствии с географическим положением площадки строительства, это целые числа из диапазона 6–9 баллов. Величина  $\Delta I$  принимает следующие возможные значения: –1; 0; +1 балл. В простейших случаях она оценивается по инженерно-геологическим данным о литологии грунтового разреза под площадкой для верхнего слоя грунта толщиной 10 м. 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  $\Delta I = N - 2$  (где  $N$  — номер категории грунта). Однако предпочтительна оценка  $\Delta I$  по изменению амплитуд колебаний на данном грунте (относительно «среднего» грунта), например, 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  $D = 0,05$ . 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 нормативной балльностью  $I_p$ . В действующих нормах величина  $A$  — безразмерная, точнее, измеряемая в долях ускорения свободного падения  $g$ , и для нее принята конкретная связь следующего вида:  $A = 0,1 \cdot 2^{I_p - 7}$ .

2. Определяют расчетное инерционное ускорение, приложенное к сооружению:  $RA(T) = A \beta_k(T)$ , где  $RA(T)$  — расчетный спектр реакции, или максимальное инерционное ускорение сооружения, возникающее при его вынужденных колебаниях (для целей нормирования оно расщепляется на два множителя —  $A$  и  $\beta_k(T)$ );  $T$  — собственный период сооружения;  $A$  — максимальное ускорение основания;  $\beta_k(T)$  — коэффициент динамичности, имеющий чисто эмпирическое происхождение и полученный на основе анализа и обобщения расчетов с реальными акселерограммами (он является осредненным значением безразмерного отношения максимального инерционного ускорения упругого маятника  $RA(T)$  к максимальному ускорению основания этого маятника  $A$ ).

Принятые в СНиП II-7-81\* [15] функции  $\beta_k(T)$  слегка различны для трех возможных значений  $K$ . Выбор функций  $A(I_p)$  и  $\beta_k(T)$  един для всей территории России. Следует пояснить, что возникающая нагрузка имеет двойной характер: по происхождению это динамическая нагрузка в процессе колебаний, а по использованию в расчете она считается приложенной статически — и вся идея упрощенного инженерного расчета как раз и сводится к замене динамического расчета более простым, статическим.

В других странах также используют спектры реакции, но связь «балл–нормативное ускорение» не используют, а строят карту ОСР непосредственно в единицах нормативных амплитудных параметров колебаний. Нельзя не заметить, что в отличие от таких неявных российских стандартов, как шкала интенсивности MSK-64 [8] и ее усовершенствованные варианты MMSK-84 [7] и MMSK-92 [19], новая европейская шкала EMS-98 [37] вообще (и принципиально) не содержит указаний на амплитудные параметры колебаний. Сам факт отсутствия жесткой связи между наблюдаемыми

балльностью и максимальным ускорением (а также наблюдаемой, или реальной, величиной  $RA(T)$ ) общеизвестен. Поэтому степень корректности традиции жестко привязывать нормативную амплитуду к нормативной балльности не вполне ясна. Вместе с тем дальнейшее рассмотрение показывает, что использование балльности как инструмента нормирования в принципе не хуже, чем применение максимального ускорения (и даже может иметь определенные преимущества).

### 1.2. О целесообразности сохранения практики использования балльности как инструмента сейсмического районирования

Практика в России в настоящее время такова, что при применении карты ОСР в баллах инженер переводит нормативное значение балльности  $I_p$  в соответствующий спектр реакции  $RA(T)$  по выработанным инженерами-строителями правилам. Способ пересчета, по исходной идее, отражает связь реальной наблюдаемой балльности и параметров наблюдаемых колебаний грунта, но применяется он не к наблюдаемому, а к нормативному значению балльности с заданной повторяемостью. Здесь имеются две сложности: (1) наблюдаемое значение  $a$  нельзя отождествлять с нормативной величиной  $A$ ; (2) наблюдаемое макросейсмическое значение балльности  $I$ , как уже отмечалось, не связано жестко с наблюдаемым максимальным ускорением  $a$  (имеется большой разброс значений  $a$  при заданной величине  $I$ ; более того, сама средняя зависимость  $a(I)$  может быть определена с большой ошибкой). И оба эти вопроса требуют обсуждения.

Как известно, при фиксированной наблюдаемой балльности разброс измеренных величин  $a$  велик: стандартное отклонение  $\lg a$  составляет около 0,3 (вариации — около 2 раз в обе стороны). Но когда используется зависимость  $A(I_p)$  из строительных норм, то фактически по значению  $I$  жестко прогнозируется значение  $a$  гипотетического будущего землетрясения с помощью величины  $A$ . Является ли ошибка такого прогноза принципиальной с инженерной точки зрения? По-видимому, нет. Целесообразно исходить из того, что балльность как концепция имеет важные позитивные аспекты. Конечно, это не более чем полукачественная характеристика движений грунта. Она, однако, имеет интегральный характер и отражает усредненные характеристи-

ки колебаний как во времени (в пределах длительности существенных колебаний), так и по определенному участку земной поверхности. В то же время  $a$  — это точечная оценка и по времени, и по пространству, и она имеет большой внутренний разброс.

Можно полагать, что указанные преимущества параметра  $I$  перевешивают его недостатки. При использовании нормирования на основе  $I$  важно лишь, чтобы нормативное значение  $A$  было реалистичным и при этом монотонно систематически росло с ростом  $I_p$ . Влияние же разброса эмпирической связи между  $I$  и  $a$  имеет ограниченный характер. Дело в том, что инженеру истинное значение  $a$  не очень важно — ему важно лишь задать адекватное нормативное значение  $A$ , которое обеспечит приемлемую прочность сооружения. Соотношение же истинного значения  $a$  с величиной  $A$ , закладываемой в расчет, не тривиально. Во-первых, сооружение не является идеально хрупким и большой одиночный выброс ускорения ему не страшен — важнее характерный размах колебаний в области максимальных амплитуд на акселерограмме. Приемлемой амплитудной мерой мог бы быть, например, среднеквадратический экстремум ускорения, оцененный в плавающем окне длиной в несколько секунд. Во-вторых, обычно (но не всеми) считается, что очень короткий выброс (например, с характерной частотой 15 Гц) тоже не очень страшен. Здесь важно, какое значение  $a$  будет в «инженерном диапазоне периодов» (то есть если пропустить акселерограмму через полосовой фильтр 0,3–10,0 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, для чего 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 именно это «эффективное» значение следовало бы использовать в качестве расчетного значения максимального ускорения  $A$ .

В этой ситуации вполне логично связывать значение  $A$  (единственный рас-

четный параметр, прямо отражающий масштаб нагрузки) непосредственно с величиной интенсивности, отражающей в первую очередь масштаб повреждения гипотетических зданий с фиксированной уязвимостью (таких, например, как когда-то типичный одноэтажный кирпичный дом [8]). Становится ясно, что использование прямой связи нормативной балльности  $I_p$  с нормативным ускорением  $A$  — это, по существу, удобный обходный способ получить «эффективное ускорение», не изучая реальных значений  $a$  и заодно во многом обходя перечисленные трудные проблемы связи  $I_p$  с  $a$  и  $a$  с  $A$ . Поэтому сама концепция использования балльности  $I_{p0}$  как параметра карты ОСР, дополненная подразумеваемой или явной спецификацией параметра  $A(I_p)$  как эффективного значения ускорения, выглядит вполне допустимой.

Следует отметить, что картирование непосредственно параметра  $A$  логически более прозрачно и в принципе оно предпочтительнее, чем картирование  $I_{p0}$ . Преимущество такого подхода состоит в следующем. В настоящее время процедура пересчета  $I \Rightarrow A \Rightarrow RA(T)$  фиксируется в строительных нормах (СНиП) на основе проведенного инженерами анализа сейсмологической информации. На практике этот анализ заметно отстает от текущих результатов наблюдений СДГ, объем которых растет взрывным образом. При переходе к картированию  $A$  эта проблема преодолевается. Понятный консерватизм инженерного подхода может проявляться в другом, например, в возврате к нормативному периоду повторения, равному 1000 лет вместо 500. Если же все-таки картируется балльность, то нормативные процедуры пересчета  $I \Rightarrow A$  и  $A \Rightarrow RA(T)$  должны быть сейсмологически обоснованными. Далее в статье разрабатывается решение именно этой проблемы.

### 1.3. ВАСО-А. Практика США и Европы. GSHAP. Проблемы изученности амплитуд в условиях России

Процедуры ВАСО-А начиная с 1968 года прошли несколько этапов развития и не могут быть здесь подробно описаны. Их обзор можно найти в работе [6]. Кратко опишем основные шаги ВАСО-А.

1. Составление модели сейсмичности. Термин «сейсмичность» понимается здесь как описание потока событий (землетрясений) в пространстве (положение гипоцентров) и времени. События характеризуются в первую

очередь магнитудой и размером очагов. Временная структура сейсмичности принимается чисто случайной — потоком Пуассона с определенной плотностью (частотой) событий. Пространственная структура включает линейные (разломы, линеаменты) и площадные (диффузные) сейсмогенные зоны. Установившейся традиции в вопросе спецификации (в рамках модели сейсмичности) протяженных очагов землетрясений нет.

2. *Составление модели сейсмического эффекта в приемнике (на площадке гипотетического строения) от одиночного события-источника.* За эффект обычно принимают максимальное ускорение, скорость и уровень спектра реакции на фиксированном периоде. Важнейшими определяющими параметрами для эффекта считают магнитуду  $M$ , эпи- или гипоцентральное расстояние  $r$ , тип источника и грунтовые условия  $G$ . Модель обычно представляют в виде функциональной зависимости — уравнения прогноза движения грунта (УПДГ, или GMPE — ground motion prediction equation), например типа  $\lg a = F(M, r, G)$  для  $a$ . При этом зависимость от  $M$  обычно является нелинейной. Зависимость от расстояния  $r$  определяется через параметры геометрического расхождения и поглощения (или через эмпирическую функцию затухания). Прилагаются усилия для учета эффекта протяженности источников. При этом в расчет входит размер очага, зависящий от магнитуды. Эффект грунтовых условий обычно оценивается через дискретный класс грунта (аналог категории СНиП), причем эта оценка используется только на этапе применения результатов ВАСО-А (в виде карты СР) для конкретного объекта. Собственно ВАСО-А проводится обычно применительно к скальному или плотному грунту, где скорость поперечных волн  $V_s$  составляет около 700 м/с. Альтернативный подход может заключаться в использовании фиксированной, заранее выполненной, карты грунтовых условий и во включении эффекта последних в картируемые нормативные значения.

3. *Объединение двух названных моделей и определение параметров будущей статистики сотрясений или движений грунта разной силы с учетом модельной статистики очагов вокруг приемника и УПДГ, или модели затухания.* Расчет ведется путем либо численного интегрирования, либо статистического моделирования каталога

землетрясений (методом Монте-Карло). В результате получаются функции повторяемости  $B(A)$  для каждой точки карты.

Понятно, что корректное выполнение процедур ВАСО-А требует использования адекватных исходных данных. Сложившаяся в России практика оценки сейсмичности в целом близка к таковой за рубежом. Единственное важное отличие — это то, что за рубежом наблюдается повсеместный переход в таком описании к магнитуде  $M_w$  как базовой. Положение с УПДГ иное. В условиях США основой УПДГ является база данных регистрации СДГ (акселерограмм), успешно регистрируемых с 1933 года. В Японии акселерограммы в массовом порядке регистрируются с 1962 года, а после 1995 года сеть приборов там была радикально расширена и переведена на цифровую основу. Европейская база данных опирается в первую очередь на довольно обширные материалы регистрации СДГ в Италии, Греции, Турции и бывшей Югославии. Эти материалы дают прочную основу для проведения ВАСО-А на этих территориях. Собственную довольно обширную базу данных создал в последние годы Иран, используя свою сеть из 2000 приборов.

Методики ВАСО-А были в основном разработаны до 1990 года. В 1992–2000 годах результаты ВАСО по регионам Земли были собраны в единую сводку (и во многом уточнены) в рамках проекта ЮНЕСКО под названием GSHAP [45], по которому была составлена мировая карта ВАСО-А для скального грунта для  $T = 475$  лет. Материалы проекта GSHAP весьма поучительны: из них, в частности, видно фактическое положение дел с изученностью сейсмической опасности в разных странах. Однако российское участие в GSHAP было организовано на основе пересчета в максимальные ускорения баллов карты ОСР-97А, построенной для среднего грунта. Пересчет велся [48] на основе простой линейной связи « $I - \lg A$ » (была использована небольшая модификация зависимости, взятой из MMSK-84), не идентичной аналогичной связи, фиксированной в российских СНиП.

Использование корреляции «балльность — амплитуда» для российского сегмента GSHAP — это обходной маневр, вызванный малым объемом материалов по реальным сильным движениям грунта на территории России, особенно для регионов коровой сейс-

мичности. Весьма ограниченный материал исследований СДГ для Камчатки использован не был. К 2011 году положение с изученностью не изменилось. Поэтому выполнить ВАСО-А на основе собственных УПДГ в условиях России, по-видимому, невозможно.

Для сбора исходных материалов для составления УДПГ нужна расстановка в регионах России сетей цифровых акселерографов, желательно с регистрацией при различных, характерных для региона вариантах грунтовых условий. Общее число установленных приборов должно быть выбрано на основе компромисса. Плотность их установки, принятая для развитых густонаселенных стран с высокой степенью сейсмической угрозы (Италии, Японии, запада США, Ирана, Греции), определяется типичным расстоянием между акселерографами, составляющим 20–30 км. При такой плотности каждое сильное землетрясение надежно регистрируется в приемлемом диапазоне расстояний. Однако такую плотность в слабонаселенных, но сейсмоопасных регионах России трудно реализовать даже с организационной стороны из-за редкого расположения населенных пунктов. В малосейсмичных регионах такая плотность также едва ли оправдана. Все же следует ориентироваться на шаг не менее 25–50 км вдоль важнейших активных разломов и обеспечивать регистрацию в первую очередь для скальных грунтов. Также необходима установка определенной части приборов на грунтах разного типа в качестве основы для прогноза влияния грунтовых условий. Дополнительно к акселерографам необходима установка цифровых велосиграфов (не менее 5–7 штук на регион) для оценок уровня спектра на низких частотах и определения магнитуд  $M_w$ .

После расстановки подобной сети придется ждать 5–10 лет для накопления минимального числа записей слабых и умеренных землетрясений. После этого уже можно пробовать изучать региональные свойства затухания амплитуд с расстоянием. За тот же срок можно ориентировочно оценить УПДГ для малых и, при удаче, средних магнитуд, что впервые создаст основу для корректной адаптации в России акселерограмм из мировых баз данных СДГ. Параллельно необходимо разработать корректные способы экстраполяции параметров акселерограмм для слабых и умеренных землетрясений на сильнейшие в регионе, а также способы учета эффектов грунтовых условий

на базе нелинейных моделей грунтовых толщ. Этим путем через 10–15 лет можно будет получить материал для относительно надежных региональных УПДГ. Для реализации подобной программы нужны сами приборы, работы по выбору мест с подходящими грунтами, организации и строительству пунктов наблюдений, организации сбора, накопления и первичного анализа данных. Нужны также усилия по долгосрочному (постоянному) поддержанию функционирования подобной сети. Без них невозможно ни построить реалистические УПДГ для регионов России, ни даже грамотно заимствовать акселерограммы или УПДГ, накопленные или созданные за рубежом.

## 2. Практические возможности для использования амплитуд при картировании сейсмической опасности России

### 2.1. Использование заимствованных зависимостей УПДГ для проведения работ ВАСО-А

Обычный путь преодоления низкой изученности в целевом регионе — это прямое заимствование уравнений прогноза движений грунта, составленных в сейсмологически более изученных регионах и странах [32, 33]. Наиболее типичным является использование УПДГ, разработанных на относительно обширном материале запада США. Такое заимствование имеет то преимущество, что при разработке УПДГ для западной части Соединенных Штатов уже отсеяны различные аномалии, а также имеются оценки не только для средних значений, но и для диапазонов разброса индивидуальных измерений амплитуд. Однако некритическое использование подобного подхода опасно. Возможны существенные неточности по причине выраженных региональных особенностей в устройстве самих зависимостей УПДГ. Можно ожидать, по крайней мере, два типа особенностей — в плане излучательной способности очагов и в плане затухания амплитуд с расстоянием. Заметим в скобках, что нередко при переносе «чужих» параметров или записей забывают либо обеспечить аналогию грунтовых условий, либо внести соответствующие поправки. Игнорирование данного, нередко трудновыполнимого, требования может вносить в оценки неконтролируемые искажения.

Существенные различия в излучательной способности очагов на высоких частотах (коротких периодах) при

заданной магнитуде (то есть при заданном уровне низкочастотного излучения) — реальное и достаточно распространенное явление. Оно проявляется и внутри выбранного региона как разброс амплитуд от индивидуальных событий при фиксированных магнитуде и расстоянии, и как различия между субрегиональными и региональными средними. В обсуждаемой проблеме особенно важен второй фактор, так как он может порождать существенные и неконтролируемые систематические ошибки. Его масштабы бывают заметны и могут выражаться в различиях региональных средних УПДГ до 2, а в особых случаях до 3–4 раз (при фиксированных магнитуде и расстоянии). Наиболее известны различия в параметре «максимальное ускорение»: между западом и востоком США, между субдукционными и коровыми очагами в Японии, между данными запада США (Калифорнии) и данными Италии (или Японии). Первый регион в каждой из названных пар имеет среднее ускорение (при фиксированных магнитуде и расстоянии), в 1,5–2,5 раза более низкое, чем второй. В особых случаях (например, для северо-запада Индии по сравнению с ее северо-востоком) второй регион имеет амплитуды максимальных ускорений и скоростей в 2–3 раза выше. Для зон субдукции обычно отмечаются более низкие (около 2 раз) амплитуды от мелкофокусных очагов по сравнению с промежуточными очагами на глубинах 80–200 км.

Надо сказать, что отмеченные тенденции, кроме, пожалуй, отличий между западом и востоком США, нельзя считать вполне надежно установленными. В литературе можно встретить расхождения в отношении не только масштаба, но даже реальности подобных различий. Например, в работе [22] поставлено под вопрос различие уровней УПДГ для Калифорнии и зон субдукции.

Нередко в качестве причины описанных различий выдвигают межрегиональный разброс очагов по параметру «сброшенное напряжение». Роль этого фактора несомненна, но он едва ли является на сто процентов определяющим. В любом случае, данный вопрос изучен недостаточно. Для характеристики указанного явления привлекают также глубину очага (для зон субдукции), а также следующие различия: (1) в периоде повторяемости очагов на одном и том же участке геологического разлома (очаги с периодом повторяемости 5–10 тыс. лет мощнее, чем с перио-

дом 100–200 лет); (2) в степени удаленности очага от границы литосферных плит (чем удаленнее, тем выше амплитуды) или между межплитными и внутриплитными разломами; (3) в степени тектонической раздробленности или в различиях между тектонически активными и стабильными регионами (чем раздробленнее или активнее регион, тем ниже амплитуды). Перечисленные факторы отнюдь не имеют взаимоисключающего характера, напротив, они заметно коррелируют друг с другом. И при этом их список едва ли полон. Сколько-нибудь аккуратный учет подобных факторов при заимствовании «чужих» УПДГ без изучения фактического материала по зарегистрированным «своим» движениям грунта выполнить затруднительно. На поверхности лежит идея использования регионов-аналогов, но пути сколько-нибудь надежной практической реализации их подбора не видны. После развертывания сети акселерографов и сбора материала, составляющего минимальную базу данных по «своим» движениям грунта, даже для малых и умеренных магнитуд, подобный подход мог бы быть разработан с определенным контролируемым уровнем надежности.

Использование «заимствованных» движений грунта затрудняется еще и тем, что на наблюдаемые амплитуды оказывает влияние также различие между «чужим» и целевым регионами в характере затухания амплитуд с расстоянием. Такое различие возникает за счет различий в параметрах неупругих потерь, в рассеянии волн и по иным причинам. Особенно важен учет региональной специфики затухания, если нужны характеристики движений грунта в сколько-нибудь широком диапазоне эпицентральных расстояний.

Все изложенное позволяет сделать вывод, что для условий России едва ли можно ожидать надежных результатов проведения ВАСО-А на основе УПДГ при бесконтрольном заимствовании из других регионов мира.

### 2.2. Возможность включения амплитуд в схему ОСП России на основе предварительного проведения ВАСО-1 путем прямого пересчета баллов в амплитуды

*Выбор амплитудного параметра.* В принципе по балльности  $I$  на карте ВАСО-1 можно путем прямого пересчета строить оценки различных параметров движений грунта, таких как максимальные ускорения, максимальные скорости, уровни спектров Фурье и др. Если

ограничиться одиночным параметром, то в качестве такового можно, по-видимому, выбрать максимальное ускорение, так как оно является базовым амплитудным параметром в традиционной процедуре оценки расчетных нагрузок. Как возможные альтернативные варианты можно рассматривать максимальную скорость, а также уровни спектра реакции на 2–3 опорных периодах (в настоящей статье подобные варианты не рассматриваются).

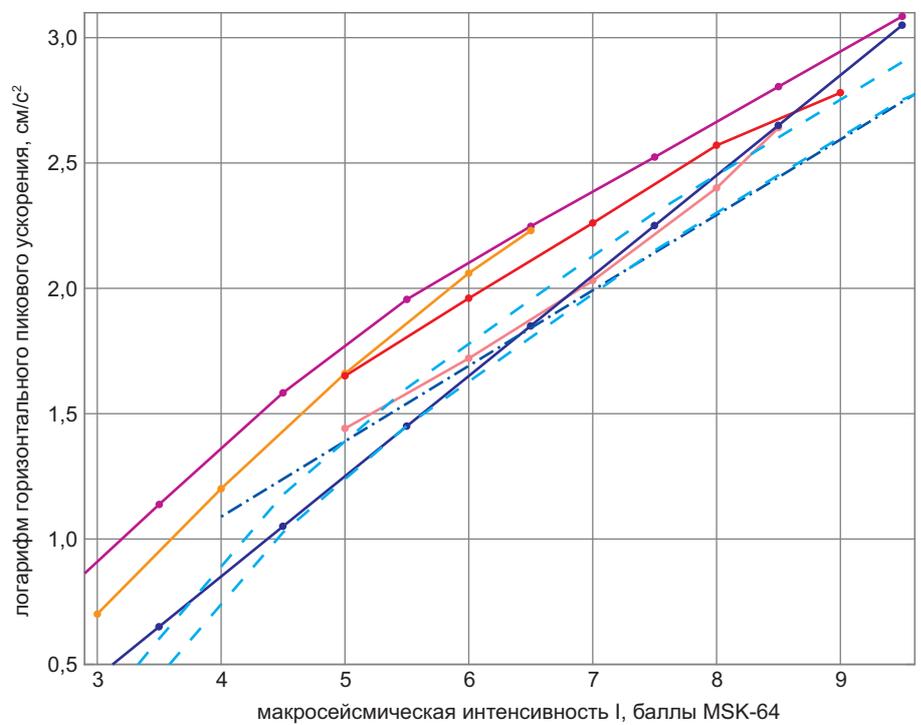
*Выбор варианта пересчета  $I \Rightarrow A$ .* Простейший путь пересчета — это использование принятой связи  $A(I)$  по СНиП. В СНиП II-7-81, а вслед за ним и в СНиП II-7-81\* [15] значениям балльности  $I$ , равным 7; 8; 9, соответствуют величины  $A$ , составляющие 0,1; 0,2; 0,4. Напомним, что связь  $A(I)$  из СНиП II-7-81 в момент ее принятия давала значения, в 1,41 раза превышавшие соответствующие оценки шкалы MSK-64 (если за точечные оценки принимать среднегеометрические границы диапазона). В то же время последняя экспериментальная оценка по данным США [49] (рис. 1) дает при значениях балльности 7 или 9 ожидаемое среднее геометрическое  $a = 0,25$  g или 0,90 g, то есть 220–250% от принятого в ныне действующем СНиП или около 300% от принятого в MSK-64. Таким образом, имеются серьезные проблемы, касающиеся абсолютного уровня ускорений и возможных систематических ошибок пересчета. Но они этим не ограничиваются.

На рис. 1 приводится ряд зависимостей балл-ускорение по ряду источников. В частности, приводятся осредненные зависимости  $a(I)$ , построенные по европейской базе данных СДГ [34] в целом, а также для ее подмножеств «Вне Италии» и «Италия». В этой базе данные по Италии составляют более половины. Для территории этой страны были использованы баллы макросейсмической шкалы MCS (Mercalli — Cancani — Zieberg), которые в нескольких последних публикациях итальянских сейсмологов квалифицируются как практически идентичные баллам MSK-64. Причины систематических различий между итальянскими и внеитальянскими группами данных достоверно установить не удалось. Обращает на себя внимание тот факт, что первые и вторые заметнее всего расходятся при 6,0–7,0 балла, а при 8,5–9,0 балла они находятся в относительном согласии друг с другом.

Как видно, в частности, из рис. 1, ряд источников аппроксимирует связь

$a(I)$  нелинейной зависимостью. Как отмечено в работе [18], типичный шаг логарифма амплитуд для макросейсмической шкалы, то есть производная  $(d \lg a / dI)$ , составляет около 0,3 единицы логарифма на балл в диапазоне 5–9 баллов. Она выражено снижается при сильнейших сотрясениях в диапазоне 9–10 баллов, но увеличивается до 0,5–0,6 при слабых сотрясениях в пределах 2–5 баллов. Причина нелинейности в диапазоне 2–9 баллов обнаруживается довольно просто. В интервале от 2 до 5 баллов основной макросейсмической шкалы являются ощущения людей, которые ранжируются (градуируются) с трудом, по-

этому здесь у составителей шкалы для ее соседних ступеней получилось различие амплитуд примерно в 3–4 раза и  $d \lg a / dI = 0,5 \div 0,6$ . В диапазоне 6–10 баллов основной макросейсмической шкалы являются повреждения зданий, степень которых ранжируется более уверенно, — в результате шаг шкалы по  $\lg a$  снизился примерно до 0,3, что дает для соседних ступеней шкалы различие амплитуд в 2 раза. Излом нелинейных связей у всех авторов появляется как раз в области 5–6 баллов. Поэтому можно полагать, что нелинейность связей отражает реальность, в то время как единая линейная связь в диапазоне от 2 до 10



- 1 — средняя зависимость  $a(I)$  по массовому материалу для запада США [49]
- 2 — то же для Камчатки
- 3 — то же по данным европейской базы данных СДГ вне Италии
- 4 — то же для Италии, причем фактически здесь была использована макросейсмическая шкала MCS
- 5 — обобщенный прямолинейный график  $\lg a = -0,75 + 0,40I$  по [1, 2]
- 6 —  $A(I)$  по [15] с линейной экстраполяцией
- 7 — средняя зависимость  $a(I)$  по [3] для вариантов длительности  $d_{50\%} = 5$  (верхняя кривая) и  $d_{50\%} = 10$  с (нижняя кривая)

кривые 2, 3, 4 получены автором настоящей статьи с помощью приближенной нелинейной ортогональной регрессии

**Рис. 1. Варианты средней зависимости  $a(I)$  наблюдаемых максимальных горизонтальных ускорений (ось ординат) от сейсмической интенсивности по шкале MSK-64 (ось абсцисс): 1 — средняя зависимость  $a(I)$  по массовому материалу для запада США [49]; 2 — то же для Камчатки; 3 — то же по данным европейской базы данных СДГ вне Италии; 4 — то же для Италии, причем фактически здесь была использована макросейсмическая шкала MCS; 5 — обобщенный прямолинейный график  $\lg a = -0,75 + 0,40 I$  по [1, 2]; 6 —  $A(I)$  по [15] с линейной экстраполяцией; 7 — средняя зависимость  $a(I)$  по [3] для вариантов длительности  $d_{50\%} = 5$  (верхняя кривая) и  $d_{50\%} = 10$  с (нижняя кривая); кривые 2, 3, 4 получены автором настоящей статьи с помощью приближенной нелинейной ортогональной регрессии**

баллов с наклоном ( $d \lg a / dl$ )  $> 0,3$ , скорее всего, является чрезмерным упрощением и может привести к несколько завышенным оценкам амплитуд для наиболее мощных колебаний. Насыщение амплитуд ускорений в области 9–10 баллов также реально и обсуждается ниже. Это явление слабо подкреплено наблюдениями, поэтому зависимости прогнозного характера на рис. 1 его не отображают.

Альтернативная точка зрения выражена в работах [1, 2], где делается вывод, что  $\lg a$  ( $I$ ) лучше выражается прямолинейной зависимостью вида  $\lg a = -0,75 + 0,10I$  с изменением амплитуд в 2,5 раза на балл. По мнению автора настоящей статьи, простая линейаризация является чрезмерным упрощением. Если заранее предполагать простую линейную связь, то большие отклонения от эмпирической тенденции в том или ином варианте линейаризации возникают неизбежно.

Коснемся теперь абсолютных уровней зависимости  $a(I)$ . Указания на более чем двукратное расхождение принятой в СНиП II-7-81\* [15] зависимости  $a(I)$  с материалами анализа большого объема наблюдений за СДГ в США является серьезной проблемой. Надо сказать, что эта проблема не нова и достаточно сложна. С ростом объема регистрации движений грунта принятые типовые зависимости  $a(I)$  за период 1950–2000-х годов существенно эволюционировали в направлении роста типичных амплитуд при фиксированном значении балльности. Принятое в СНиП II-7-81 для 9 баллов значение  $a = A = 0,4$  g было в определенном смысле корректным, поскольку оно давало верхнюю границу соответствующего диапазона шкалы MSK-64. Однако в работе [3] 1988 года для 9 баллов уже рекомендуется оценка 0,60 g (в среднем). В работе [49] 1999 года уже рекомендуется 0,92 g. Правда, следует отметить, что обе эти оценки являются в определенной мере искусственными и применимыми только к прочным грунтам. Фактически в области 9 баллов рост измеренного ускорения  $a$  с увеличением значений балльности прекращается сначала для мягкого, а затем и для среднего грунта. Рекордные значения ускорений, достигающие  $2 \div 4$  g, регистрируются пока исключительно для скальных грунтов. Эмпирическое среднее для 9 баллов (без группировки по типам грунта) составляет 0,45 g по работе [3] и около 0,5 g по работе [49]. Данное явление усложняет

картину. За счет разрушения и потери связности грунтов при прохождении волн с большими амплитудами (при увеличении амплитуд в коренных породах) регистрируемый параметр  $a$  насыщается и не растет, а может и снижаться (как проиллюстрировано схематически в [5]). Однако для измеренного параметра  $a$  это мало что меняет с точки зрения инженерного расчета. Дело в том, что насыщение  $a$  ни в коей мере не является признаком насыщения разрушительной силы землетрясения (иначе и баллы бы не увеличивались). В частности, продолжает расти без выраженного насыщения наблюдаемая максимальная скорость колебаний грунта. Приостановка в росте  $a$  может быть связана, в частности, с быстрым снижением характерной частоты спектра колебаний при росте балльности [17].

Такая тенденция имеет, по крайней мере, две совместно действующие причины: (1) рост вклада относительно низкочастотной неволновой компоненты движения грунта вблизи разлома; (2) быстрый рост с амплитудой нелинейных потерь в грунте, о чем речь пойдет ниже. В целом нет сомнений в том, что условный эффективный параметр  $A$  должен продолжать увеличиваться с ростом балльности для случая скального грунта. Однако возникает вопрос: следует ли понимать соответствующие нагрузки традиционно, просто как боковую силу (срез основания). Как видно, например, из текста описания MSK-64, значение, равное 10 баллам, приписывается в случаях систематического разрушения фундаментов зданий. Такие разрушения связаны в первую очередь с эффектами потери устойчивости (разрушения, псевдооживления) грунтов под зданиями, а также дифференциальных (неравномерных) просадок грунта под фундаментами. Таким образом, рост степени повреждения зданий может происходить без увеличения горизонтальных ускорений и инерционных нагрузок на сооружение.

Вообще, для области 9–10 баллов для нескальных грунтов следовало бы рассмотреть возможность внесения в строительные нормы требования об учете нагрузок двух видов — от боковых сил и от неравномерной (дифференциальной) просадки грунта под фундаментом. Эмпирически такой подход реализуется в ответственных сооружениях, например, при использовании монолитной фундаментной плиты или других адекватных инженерных решений. Некоторые пути учета воз-

можных просадок описаны в разделе 7.5.2 книги [10]. Однако сегодня нет явного требования к проектировщику об учете дифференциальных просадок на этапе инженерного расчета.

Существует мнение, что материалы США, где для оценки макросейсмических баллов используется модифицированная шкала Меркалли (ММ), не вполне сопоставимы с баллами по европейским шкалам. Для этого возможны, по крайней мере, две причины. Во-первых типичные застройки запада США и сейсмоопасных регионов Европы могут оказаться плохо сопоставимыми в плане уязвимости из-за различий в традициях строительства. Это объяснение кажется наиболее правдоподобным. Можно предполагать также наличие некоторого несоответствия шкал MSK-64 и ММ. Однако, следуя данным таблицы 2 из работы [20], можно предположить, что баллы 8,0–9,0 по MSK-64 соответствуют баллам 8,4–9,5 по ММ. Тогда сотрясения с амплитудой 0,9 g при 9 баллах по ММ отвечали бы баллу 8,5 по MSK. Так что попытка дополнительного учета данного фактора не только не снимает обсуждаемое расхождение, а, напротив, делает его даже более ярким.

Для задачи фиксации связи  $A(I)$  в целях ее применения при пересчете в  $A$  для используемых в СССР и России данных о балльности целесообразно учитывать то, что стандартная здесь шкала MSK-64 и ее прямой потомок EMS являются базовыми для Европы, где они применялись для характеристики данных европейской базы вне Италии. На этом пути можно получить численное значение  $a \approx 0,6$  g для  $I = 9$  баллов. Аналогичная оценка была получена в работе [3] для опорной длительности 5 с. Использование шкал ММ и данных США дает относительно повышенные оценки, а шкалы MCS и данных Италии в диапазоне 6–8 баллов — относительно заниженные. При  $I = 9$  баллов европейские данные в любом варианте устойчиво предсказывают величину  $a \approx 0,6$  g. Однако объем данных, на котором основана эта оценка, невелик. Поэтому в качестве опорного значения со слегка нелинейного графика для европейской базы данных вне Италии сняли опирающееся на достаточно большой объем (десятки) данных значение  $a = 0,33$  g для  $I = 8$ .

Хотя европейская (вне Италии) зависимость в целом чуть-чуть нелинейна, шаг изменения на ступень шкалы балльности, равный 0,3010 (или 2 раза для  $a$ ), судя по рисунку 1, можно про-

должать использовать и в будущем для пересчета  $a(I)$  в диапазоне баллов 6–9, по крайней мере, для скальных грунтов (различия в деталях этого тренда для разных грунтов обсуждаются ниже). Зафиксировав упомянутый линейный тренд (рост  $a$  в 2 раза на 1 балл), получим для линейной аппроксимации следующее соотношение, представляющее простейший вариант связи «баллы — максимальное ускорение» согласно данному разделу:  $I = 7; 8; 9$  баллов и соответственно  $A = 0,165; 0,330; 0,660$ . Подчеркнем, что при выводе данной связи была использована исходная информация об амплитудах и баллах, в которой данные не были сгруппированы по типам грунта. На первый взгляд указанную связь можно было бы использовать для среднего грунта (получить, например, оценки максимальных ускорений, а затем получить оценки для скального грунта или коренных пород, используя «приращение балльности»  $\Delta I$ , равное минус 1, и внося поправочный коэффициент 0,5, следуя действующим СНиП и РСН). Однако, как уже отмечалось [5], накопленный при регистрации СДГ материал противоречит подобному подходу. Альтернативный подход рассматривается ниже на основе опыта, вложенного в последнюю версию норм США и Европы.

**3. Обоснование и содержание модернизированной процедуры пересчета нормативной балльности в максимальное ускорение в целях корректного учета грунтовых эффектов, особенно в условиях больших баллов и амплитуд**

Выше был предложен вариант оценки связи «баллы — ускорение», полученный без учета грунтовых условий. Следуя логике действующей комбинации «ОСР — СНиП — РСН», полученные оценки максимальных ускорений следует рассматривать как относящиеся к среднему грунту, а далее учитывать грунтовые условия, внося в значение ускорения коэффициент  $2^{\Delta I}$  и, наконец, использовать функцию  $\beta_k(T)$  для учета динамических эффектов при переходе к расчетной статической нагрузке. Данный подход следует считать устаревшим по трем причинам. Во-первых, он противоречит наблюдательному материалу по СДГ: реальные различия максимальных ускорений на грунтах разного типа плохо описываются коэффициентом  $2^{\Delta I}$ . Во-вторых, названные различия не просто отмечены сейсмологами как научный факт — соответствующи

щие качественно иные рекомендации включены в строительные нормы Европы и США. В-третьих, практика показывает, что использование нормативной нагрузки для нескального грунта крайне неудобно при использовании материалов строительных норм как основы для получения и проверки искусственных или синтетических СДГ («искусственными» названы лишённые сейсмологического обоснования временные функции, промоделированные так, чтобы быть согласованными с нормативными  $\beta_k(T)$  и  $A$ ; «синтетическими» названы сейсмологически обоснованные модельные СДГ; такие модельные СДГ нередко плохо согласуются с нормативными  $\beta_k(T)$ ). По описанным причинам целесообразно развить новый подход к комбинации «ОСР–СНиП–РСН», в котором по возможности были бы сняты перечисленные проблемы. Для обоснования нового подхода будут рассмотрены следующие вопросы: (1) адекватность понятия «приращение балльности»; (2) краткий обзор принципов учета грунтовых условий в зарубежных нормах.

**3.1. Об адекватности понятия «приращение балльности». Зависимость грунтовых эффектов от частоты и амплитуды колебаний**

Связь  $a(I)$ , обсужденная выше, почти у всех авторов строится и приводится без дифференцирования по типам грунта. Использование в практике России стандартного понятия «приращение балльности» неявно предполагает, что зависимость  $a$  от  $I$  однотипна для разного уровня амплитуд и не зависит от того, по какой причине растет балльность — из-за роста амплитуды на коренных породах или из-за изменения параметров грунтовой толщи при фиксированной амплитуде на коренных породах. Далее детально обсуждается второй из этих двух случаев. Необходимость обсуждения связана с тем, что принятое в процедурах СНиП II-7-81\* [15] предположение о росте максимальных ускорений (параметра  $A$ ) в 2 раза на единицу «приращения балльности» или на единичный шаг категории грунта находится в существенном противоречии с данными наблюдений СДГ. Наблюдения говорят, что для значений максимальной скорости этот рост примерно соответствует традиции, во всяком случае, при относительно низкой балльности (до 6–7 баллов) на коренных породах (на скальном фундаменте). При 8–9 баллах этот рост несколько замедляется.

С максимальным ускорением положение иное. При амплитудах для диапазона до 6–7 баллов на коренных породах (на скальном фундаменте) при приращении балльности  $\Delta I = 1$  рост  $a$  составляет примерно 1,6 раза и сильно замедляется при 8–9 баллах. При 9–10 баллах на скальном фундаменте рост максимальных ускорений, как говорят расчеты по нелинейным моделям грунтовых толщ и редкие наблюдения, может смениться их парадоксальным снижением. В рамках обычных моделей нелинейного поведения грунта по Хардину — Дрневичу [44] такое поведение связано с деградацией упругих и прочностных свойств грунтовой толщи под действием поля волны. Таким образом, традиционное представление о росте максимальных амплитуд в зависимости от типа грунта в 2 раза на 1 балл примерно согласуется с наблюдениями максимальной скорости, в то время как для максимальных ускорений это представление ведет к достаточно ощутимым ошибкам даже при малых амплитудах и полностью неприемлемо при больших.

Может возникнуть вопрос, каким образом создается подобное расхождение при малых амплитудах, когда собственно нелинейных эффектов быть не должно. Вероятная причина — в вязкоупругом поведении грунтовой толщи. В такой толще неупругие потери сильно растут с частотой, частично подавляя эффект различия акустических жесткостей (импедансов). Это ведет к заметным дополнительным потерям для ускорений, в то время как влияние на скорости является ограниченным. Но возможны и относительно редкие случаи, когда в мощной низкоскоростной грунтовой толще потери малы. Тогда эффект этого фактора может быть преобладающим и рост амплитуд ускорения может быть заметно выше среднего — порядка 1,6 раза на категорию грунта (см. также п. 3.1.2 норм EC8 в отношении грунтов класса S1 [27]). Подобные ситуации должны обнаруживаться при сейсмомикрорайонировании (СМР).

Повышенные потери в грунтовой толще при больших амплитудах — не единственный наблюдавшийся нелинейный эффект в нескальных грунтах. При особых типах малосвязных грунтов возможно нелинейное формирование пиков ускорений (теория и детальный обзор нелинейных эффектов рассмотрены, например, в работе [11]), но такие явления с инженерно-сейсмологической точки зрения пока рассматривают как аномалию.

Определение классов грунта А–Е норм США IBC-2006 на основе средней скорости $V_s$ в верхнем слое толщиной 30 м			
Класс грунта (США)	Скорость поперечных волн $V_s$ , м/с	Категория грунта К	Род грунта
А	$V_s > 1524$	(0,75)	Твердый скальный грунт
В	$762 < V_s \leq 1524$	1,25	Скальный грунт
С	$366 < V_s \leq 762$	1,75	Очень плотный грунт, мягкий скальный грунт
Д	$183 \leq V_s \leq 366$	2,25	Плотный грунт
Е	$V_s < 183$	(2,75)	Мягкий грунт

Таблица 2

Грунтовые коэффициенты $F_a$ для классов грунта А–Е США и спектральных амплитуд $S_s = S_{sB}$ для скального грунта класса В (по табл. 1613.5.3(1) норм IBC-2006)						
Класс грунта США и др.	Значение К, пересчитанное по $V_s$	Спектр реакции для коротких периодов на грунте класса В — значения $S_{sB}$ согласно нормативной карте (ОСР)				
		0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
$A_B = S_{sB} / 2,5$	-	0,1	0,2	0,3	0,4	0,50
$I(AB)$ по СНиП II-7-81* [15].	-	7,0	8,0	8,5	9,0	9,25
$I(AB)$ по [3].	-	6,5	7,5	8,0	8,5	8,75
А	0,75	0,8	0,8	0,8	0,8	0,80
В	1,25	1,0	1,0	1,0	1,0	1,00
С	1,75	1,2	1,2	1,1	1,0	1,00
Д	2,25	1,6	1,4	1,2	1,1	1,00
Е	2,75	2,5	1,7	1,2	0,9	0,90

Итак, максимальные ускорения реальных движений грунта обычно ниже, чем ожидаемые по данным о движениях коренных пород согласно концепции «приращения балльности», причем это различие имеет две компоненты: (1) *линейный эффект* — повышенные вязкоупругие потери в грунтовой толще, обнаруживаемые экспериментально при зондировании волнами малой амплитуды (типичные линейные эффекты игнорируются в упрощенном подходе СНиП, но могут быть грубо учтены при СМР на основе РСН-60-85 и РСН-69-86); (2) *нелинейный эффект* — дополнительные потери (вплоть до оживления слоев грунтовой толщи) за счет изменения свойств грунта в поле волны высокой амплитуды (нелинейные эффекты не учитываются нормами СНиП и РСН).

Пока грунт ведет себя как связный агрегат, игнорирование нелинейных эффектов ведет просто к завышению расчетных нагрузок в сравнении с реальностью, повышая запас прочности. Когда грунт теряет связность, возникают новые типы нагрузок, связанные с перекосом и дифференциальными осадками фундамента, глубинным повреждением свай и пр., в то время как инерционные нагрузки не растут.

### 3.2. Нелинейные грунтовые эффекты в нормах IBC-2006 США

Важнейшим источником обобщенной информации о нелинейных эффектах являются действующие строительные нормы США IBC-2006 [38], составленные с учетом наиболее обширного архива записей СДГ и теоретических нелинейных расчетов распространения упругих волн в реалистических моделях грунтовых толщ. Эти нормы включают карты ОСР, которые описывают нагрузки в виде уровней спектра реакции для периодов 1,0 с ( $S_1 = RA(1,0)$ ) и около 0,2 с ( $S_s = RA(0,2)$ ), значения которых привязаны к конкретному роду грунта В (скального). Вообще, род грунта описывается через его класс с использованием буквенного кода А, В, С, Д, Е. Принцип классификации грунтов аналогичен применяемому в России, но сама классификация более дробная. Значения  $S_s$  для класса В далее обозначаются  $S_{sB}$ . Исходя из данных табл. 1, которая следует основной части таблицы 1613.5.2 американских норм IBC-2006 (исключены особые случаи мягкого грунта, а также пенетрометрические и прочностные параметры грунтов), устанавливается соответствие между американскими классами

А–Е и российскими категориями грунтов, принятое на основе значения скорости поперечных волн  $V_s$ . На основе п. 5.1 норм РСН 60-86 это соответствие установлено в следующем виде: для 1-й категории  $V_s = 1000 \div 1400$  м/с (принята точечная оценка, равная 1200 м/с); для 2-й категории  $V_s = 250 \div 350$  м/с (точечная оценка принята равной 300 м/с). Далее проводили интерполяцию по аргументу  $\lg V_s$ .

В таблице 2 приводятся значения «грунтовых коэффициентов»  $F_a$  для расчета спектра реакции для периода около 0,2 с для грунтов разного класса исходя из набора вариантов спектральных амплитуд  $S_{sB}$  (на скальном грунте класса В) для диапазона амплитуд 0,25–1,25 g. Значение  $S_{sB}$  снимают с карты ОСР. Для расчета спектра реакции при классе грунта, отличном от В, расчет спектральных амплитуд ведут по формуле:  $S_{Ms} = S_{sB} F_a$ .

Принципиальное отличие такого подхода от российской практики имеет два аспекта: во-первых, на карте ОСР отобра-

жен уровень спектра, а параметр  $A$  вообще не входит в процедуры расчетов; во-вторых, при учете эффекта грунта используются «грунтовые коэффициенты», существенно зависящие от амплитуды колебаний на коренных породах (то есть от  $S_{sB}$ ). Для сопоставимости с нормами России для ориентировки целесообразно оценить значения  $A$  по значениям параметра  $S_{sB}$  на том же грунте (грунте класса В соответственно, см.  $A_B$  в табл. 2). Это сделали исходя из предположения, что отношение  $\beta_B = S_{sB} / A_B$  равно 2,5. В следующих двух строках табл. 2 показаны баллы, полученные из  $A_B$  пересчетом по соотношению из СНиП II-7-81\* [15] и, более реалистично, по работе [3]. Далее по формуле  $S_{Ms} = S_{sB} F_a$  были рассчитаны ориентировочные значения максимального ускорения  $A$  для пяти амплитудных уровней  $S_{sB}$  и  $A_B = S_{sB} / 2,5$  в зависимости от условного непрерывного аргумента «номер категории грунта»  $K$ . Результаты представлены на рис. 2, где по оси абсцисс отложены значения непрерывного аргумента  $K$ , пересчитанные из характе-

ристик грунтовых классов А–Е норм США (см. табл. 1). Целые значения  $K$  соответствуют определениям категории СНиП. По той же схеме выполнили пересчет в  $K$  для классов грунта А, В, С, D европейских норм Еврокод-8 [27]. Поскольку идентичность обозначений может ввести в заблуждение, европейские классы, которые определены иначе, чем в нормах США, далее «переобозначены» как Ae, Be, Ce, De. Ординаты для сплошных ломаных линий на рис. 2 — это значения  $A$ , вычисленные, как описано выше:  $A = (S_{sB} / 2,5) F_a$ . Выраженные отличия тонких кривых от рекомендаций норм США при  $A_B = 0,2$  g и выше прямо связаны с учетом в американских нормах нелинейных потерь в постепенно теряющем прочность и связность грунте. Рисунок 2 показывает, как по нормам США амплитуда ускорения  $A$  на нескальном грунте зависит от грунтового параметра  $K$  для случаев разных по уровню «входных амплитуд»  $A_B$ , привязанных к скальному грунту (класса В). При относительно малых амплитудах это изменение примерно следует обычной линейной схеме (происходит систематический рост амплитуды при падении акустической жесткости). Но даже в этом случае рост с категорией грунта амплитуды ускорения ( $A$ ) принимается намного медленнее, чем 2 раза при приращении  $\Delta K = 1$  (или  $d \lg A / dK = 0,3010$ ). В нормах США при малых амплитудах ускорений  $d \lg A / dK \approx 0,2$  (рост в 1,6 раза на  $\Delta K = 1$ ), что существенно расходится с традициями СССР и России. Однако при тех же малых амплитудах для периодов около 1 с величина ( $d \lg S_1 / dK$ ) в среднем составляет примерно 0,3 (рост в 2 раза на  $\Delta K = 1$ ), что полностью согласуется с советско-российской традицией. Данная схема относится к линейному поведению грунта, основана на больших объемах наблюдений и, несомненно, отражает типичную картину.

Обсужденное поведение грунтовых коэффициентов (их увеличения с ростом  $K$ ) наиболее выражено при малых амплитудах. При относительно больших амплитудах их рост в силу нелинейных эффектов замедляется или меняет знак.

### 3.3. Нелинейные грунтовые эффекты в других зарубежных нормах

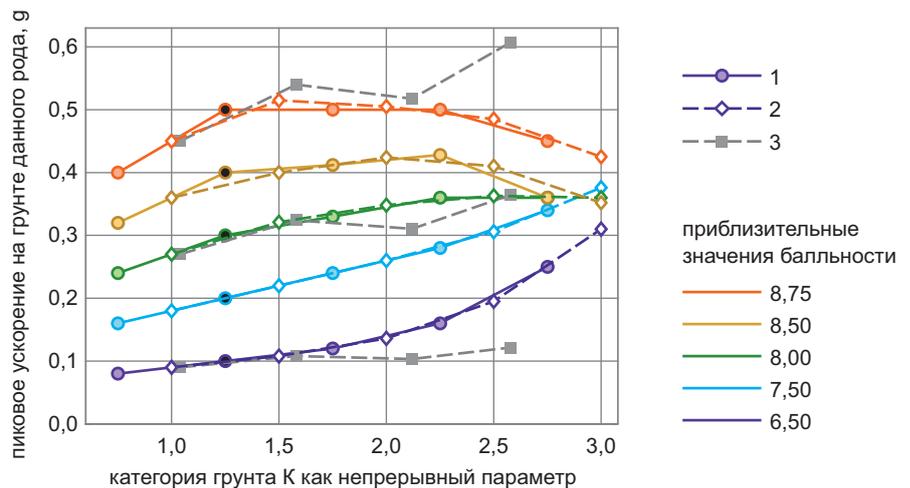
Качественно аналогичные выводы следуют и из рассмотрения более примитивного подхода, использованного в Еврокоде-8 [27], когда предполагается карта сейсморайонирования в терминах  $A_{Ac}$  — максимального ускорения на коренных породах или грунте класса Ae (обозначенного в исходном до-

кументе  $a_g$ ). В Еврокоде-8 нет явного и непосредственного учета нелинейности, грунтовые поправки принимаются амплитудно-независимыми, но неявным образом они в значительной степени учитывают нелинейность грунтов. Непростая картина для норм США, видная на рис. 2, сглажена и осреднена в европейских нормах, где принята единая форма трендов  $A(K)$  при разных уровнях амплитуды на скальном грунте. Эти тренды описываются через единый для всех амплитуд грунтовой коэффициент  $S = A / A_{Ac}$  (табл. 3). Расчет спектра реакции  $RA(T)$  для сооружения с собственным периодом  $T$  (в исходном документе  $Se(T)$ ) ведется по следующей схеме:  $RA(T) = A_{Ac} S \beta_{Ac}(T) RA(T)$ , где функция  $\beta_{Ac}(T)$  (в исходном документе  $Se/a_g$ ) напоминает коэффициент динамичности из СНиП II-7-81\* [15], однако она нормирована не на максимальную амплитуду движения данного грунта, а на аналогичную амплитуду для коренных пород (класса Ae). Произведение имеет смысл максимального ускорения на грунте разных классов. Его ход с категорией грунта иллюстрируется на рис. 2, где приведены варианты зависимости  $A$  от  $K$  на основе таблиц Еврокода 8 для случаев  $A_{Ac} = 0,09; 0,27; 0,5$  g, для

обычных очагов, обозначаемых как «Тип 1». Поскольку в данном случае нелинейность учитывается осредненно однотипным образом для всех амплитуд, эти три кривые аналогичны (пропорциональны друг другу).

Если считать таблицы  $F_a$  норм ИВС-2006 близкими к истине, то в рамках подхода Еврокода 8 при амплитудно-независимых грунтовых поправках вносятся искажения. Из рис. 2 можно увидеть, что выбранный в Еврокоде 8 конкретный вариант поправок, неявно учитывающих нелинейность, примерно соответствует случаю, когда максимальное ускорение на скальном грунте близко к 0,3 g. При малых амплитудах, когда вклад нелинейности невелик, такой подход занижает ускорения на мягких грунтах до 2 раз в области  $K = 2,5–3,0$ . Напротив, при ускорениях 0,4–0,5 g на грунте с  $K = 1$  ускорения, предсказываемые для таких же грунтов по Еврокоду 8, могут превышать реальные до 1,5 раз.

Применительно к условиям России и СНГ разработан проект норм МСН-2002 [9], в котором, как и в ИВС-2006, реализован табличный вариант учета нелинейности. Главная особенность МСН-2002 по сравнению с ИВС-2006 — это использование в качестве опор-



**Рис. 2.** Ход значений максимального ускорения грунта в зависимости от рода грунта в приповерхностном слое при фиксированных амплитудах на коренных породах: 1 — варианты зависимости значений условного нормативного ускорения  $A = S_s/2,5$  в соответствии с нормами США от непрерывного аргумента «номер категории грунта»  $K$  согласно табл. 2 и уравнению  $S_{Ms} = S_{sB} F_a$ ; линии (снизу вверх) приблизительно соответствуют значениям балльности 6,50; 7,50; 8,00; 8,50; 8,75; параметр линии — значение условного ускорения  $A_B = S_{sB} / 2,5$  для грунта класса В норм США, его значения ( $A_B = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5\}$  ед. g) обозначены черными кружками при  $K = 1,25; 2$  — интерполяция и экстраполяция точек норм США, определенных для классов грунта А–Е США, от сетки значений аргумента  $K = \{0,75; 1,25; 1,75; 2,25; 2,75\}$  к аналогичной сетке  $K = \{1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0\}$ ; применена экстраполяция в диапазоне  $K = 2,75 \div 3,30$  (три варианта зависимости  $A$  от  $K$  на основе таблиц Еврокода 8 (см. табл. 3); параметр линии — исходное значение  $A$  для грунтового класса  $A_e$  (скального) в трех вариантах (снизу вверх):  $A_{Ac} = 0,09; 0,27; 0,45$  g; все серые ломаные линии пропорциональны друг другу

ного амплитудного параметра колебаний максимального ускорения на среднем ( $K = 2$ ), а не на скальном ( $K \approx 1$ ) грунте. Это следует традициям норм СССР, но по указанной причине возникает ряд сложностей, причем не только с нормированием в строительных нормах, но и с методиками СМР и частично ОСР.

Нормы МСН-2002 занимают в известном смысле промежуточное положение относительно норм США и Европы. Хотя нелинейность описывается в табличном виде (табл. 2.4 МСН-2002 [9]), форма спектра не меняется с амплитудой. На рис. 4 приведены зависимости  $A(K)$  для ряда уровней  $A_{kn}$  (равных  $A_{k1}$ ). При этом в оригинале аргументом такой зависимости служит уровень  $A$  на среднем грунте, далее обозначаемый  $A_{k2}$ . Для пересчета для аргумента  $A_{kn}$  использовали зависимость  $A(K)$ , приведенную там же. В результате получили табл. 4, которая является аналогом таблицы 2. В квадратных скобках приведены значения  $F_a$  согласно зависимостям по таблице 2, интер-

полированные в соответствии с уровнями  $K$  и  $A_{kn}$ , использованными в табл. 4. Из таблицы 4 и рисунка 3 видно, что в целом как нормы МСН-2002 так и нормы США учитывают, что нелинейные эффекты (замедленный рост амплитуд в функции от  $K$ ) нарастают с амплитудой. В области  $A_{kn} = 0,0 \div 0,3$  и  $K = 1,0 \div 2,5$  расхождения относительно невелики, однако при  $A_{kn} > 0,3$

имеются существенные расхождения и детали заметно различаются.

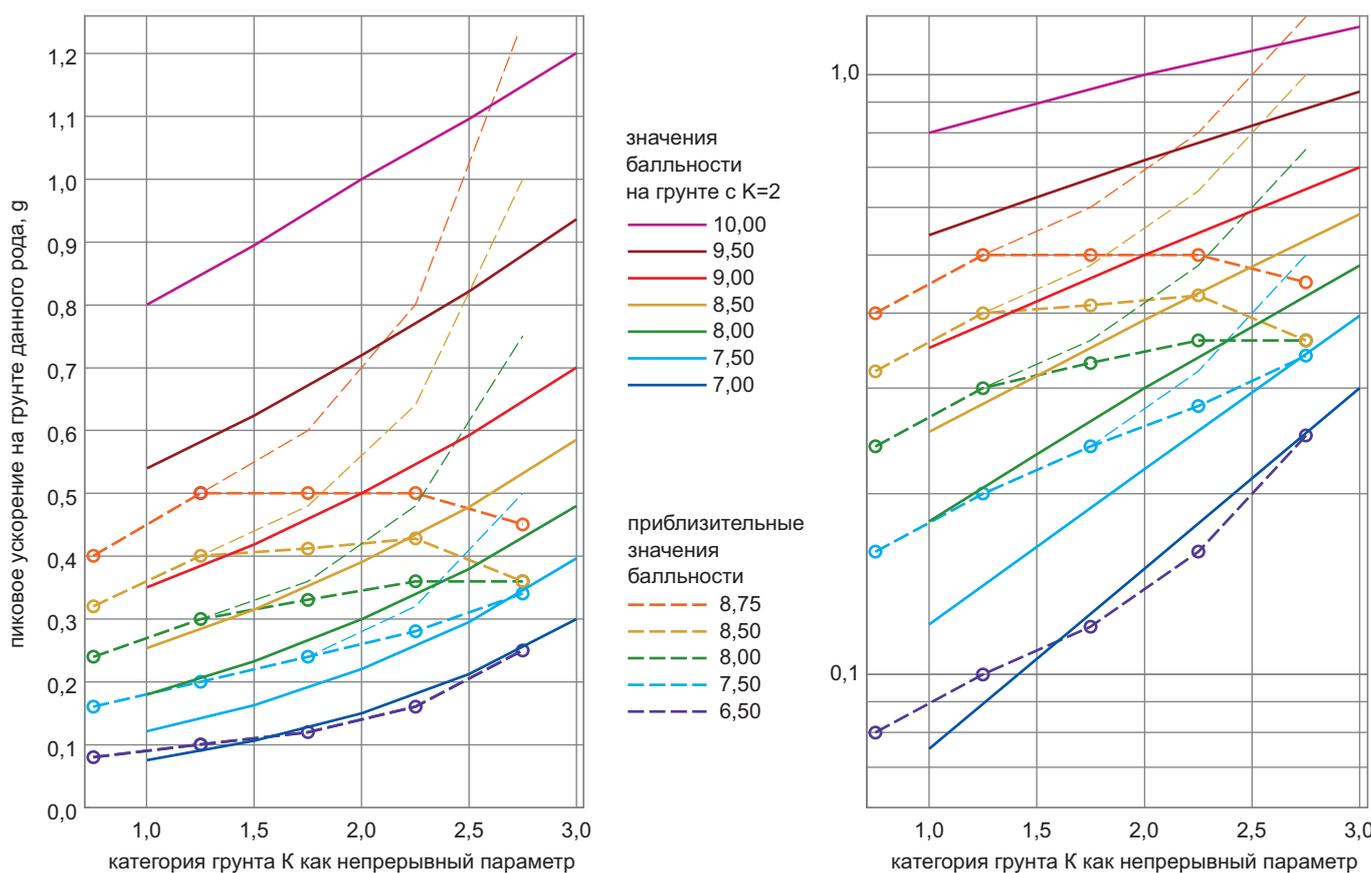
Во-первых, результат, отраженный на рис. 3, показывает численное расхождение между нормами США и расчетом по МСН, в котором сделано стандартное для норм СССР и России предположение, что  $d \lg A / dK = 0,3$  (не связанное с учетом нелинейности). Нормы США указывают на то,

Таблица 3

**Грунтовые коэффициенты  $S$  для классов грунта Ae–De по Еврокоду 8 для спектров типов 1 (основного) и 2 (для малых магнитуд)**

Класс грунта по Еврокоду 8*	Скорость поперечных волн $V_s$ , м/с	Значение $K$ , пересчитанное по $V_s$	Род грунтового разреза	S для спектров типа	
				1	2
Ae	> 800	(1,04)	Скальный грунт	1,00	1,00
Be	360–800	1,58	Мягкий скальный грунт	1,20	1,35
Ce	180–360	2,12	Плотный грунт	1,15	1,50
De	< 180	(2,58)	Мягкий грунт	1,35	1,80

\* Для исключения путаницы с классами грунта A, B, C, D США соответствующие классы Еврокода 8 обозначены как Ae, Be, Ce, De.

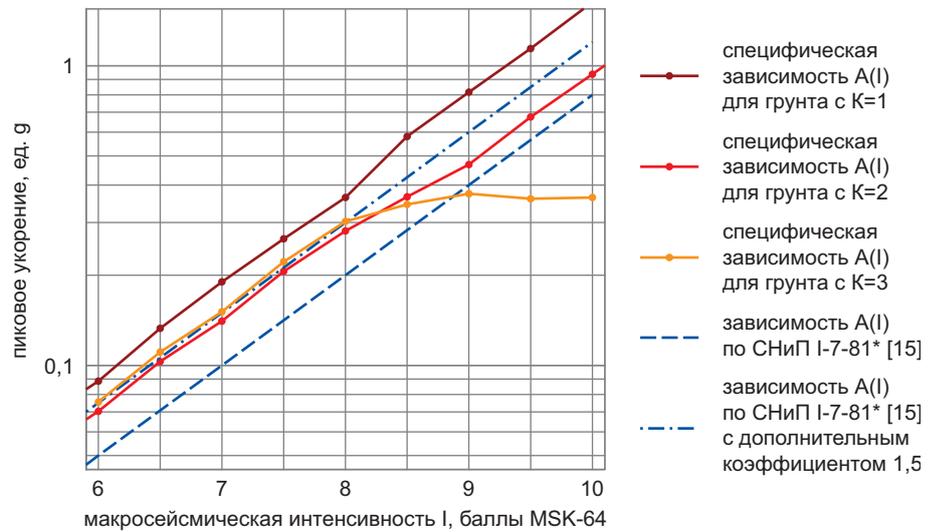


**Рис. 3.** Ход значений  $A$  норм МСН-2002 в зависимости от аргумента «номер категории грунта»  $K$  согласно табл. 4 (сплошные линии) в натуральном (а) и полулогарифмическом (б) масштабах. Линии (снизу вверх) соответствуют значениям балльности 7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0 на грунте с  $K = 2$ . Аналогично штриховые ломаные линии с кружками описывают поведение значений  $A$  норм США согласно табл. 2. Линии (снизу вверх) приблизительно соответствуют значениям балльности 6,50; 7,50; 8,00; 8,50; 8,75 на грунте с  $K = 1$ . Параметр линии — значение ускорения  $A_B$  для грунта класса В США. Тонкие штриховые линии — аналогичные, построенные в предположении линейного поведения среды. Левый график — в натуральном масштабе, правый — в логарифмическом

что  $d \lg A / dK \approx 0,2$  при малых амплитудах. Аналогичный результат приведен в уравнении 2.18 и таблице 4 работы [20], откуда видно, что с ростом  $K$  рост спектральных амплитуд при периоде 0,3 с происходит как  $V_s^{-(0,20 \div 0,28)}$ , в то время как при периодах 1,0–1,5 с рост спектральной амплитуды и максимальной скорости происходит примерно как  $V_s^{-0,5}$  в согласии с концепцией отношения акустических жесткостей.

Во-вторых, как видно из рис. 3, принятая для МСН-2002 схема нелинейного поведения сильно упрощена и не отражает качественно разное поведение на разных амплитудных уровнях. Поведение кривых ИВС-2006 демонстрирует выраженное нарастание нелинейного затухания для слабых грунтов в отличие от сглаженной зависимости норм МСН-2002. Надо отметить, что нормы США для грунтов, более слабых, чем грунты класса E (класса F), вообще рекомендуют детальное исследование во всех случаях (это неявным образом относится и к большей части грунтов категории 3 по СНиП: они во многих случаях должны были бы быть отнесены к классу F по градации США). Кроме того, при обычной для СССР и России более грубой градации грунтовых условий просто трудно отобразить в таблице важные детали. Наконец, использование грунта с  $K = 2$  в качестве опорного вносит дополнительные сложности в анализ.

Японские нормы предыдущего поколения Building Standard Law (1981 года) вообще не основывались на параметрах движения грунта, а использовали сейсмический коэффициент. Новые японские нормы Performance-Based Seismic Building Code 2000 года [41, 43] используют спектры реакции, но их рекомендации трудно сопоставить с нормами других стран, включая Россию. Сейсмические нагрузки в них нормируются для «инженерных коренных пород» с  $V_s = 400$  м/с, что близко к породам с  $K = 2$ . По всей территории страны эти нагрузки различаются в пределах 20%, так что существенного зонирования нет; при этом карта зон не базируется на ВАСО. Максимальное ускорение в нормы не входит, нормируется спектр реакции как функция периода. Для наиболее опасной зоны А (Тихоокеанского побережья)  $RA = 8$  м/с<sup>2</sup> для  $T = 0,2$  с и  $RA = 5,2$  м/с<sup>2</sup> для  $T = 1$  с, что примерно соответствует уровню максимальных ускорений  $0,3 \div 0,5g$ . Для более мягких грунтов добавляет-



**Рис. 4. Предлагаемые зависимости максимального ускорения от балльности ( $A(I)$ ) для грунтов категорий 1, 2 и 3 по СНиП II-7-81\* [15]: 1–3 — специфические зависимости  $A(I)$  для категорий грунта 1–3 соответственно; 4 — зависимость  $A(I)$  по СНиП I-7-81\* [15]; 5 — то же, но с дополнительным коэффициентом 1,5**

ся грунтовый коэффициент, зависящий от периода. Это, в сущности, передаточная функция слоя, рассчитанная в частотной области с использованием эффективных упругих параметров толщи, определенных с учетом ее нелинейного поведения (модуль сдвига и добротность грунтового слоя зависят от деформации). В расчете коэффициентов рекомендуемых формул использована известная программа SHAKE. Грунтовый коэффициент как функция периода имеет существенно резонансный характер, его основными параметрами являются значение в максимуме и два периода среза — верхний и нижний. Для приводимого примера грунтовый коэффициент достигает максимума 1,7 для периода около 0,3 с, а для длинных периодов он уменьшается до значений 1,4 при  $T = 1$  с и 1,0 при  $T = 10$  с. Такое поведение заметно отличается от предполагаемого в нормах США и России, где для низких частот грунтовый коэффициент неизменен (примерно равен 2), а возможность выраженного резонанса грунтовой толщи игнорируется.

**3.4. Обобщения сейсмологических наблюдений грунтовых эффектов в публикациях последнего десятилетия**

Полезно также показать экспериментальный характер обсуждаемых тенденций. Начнем с конкретного анализа [2], основанного на десятках записей землетрясения Нортридж вблизи эпицентра. Показано, что при малых амплитудах на коренных породах (класс

В) отношения амплитуд для коротких периодов  $F_a$  составляют: на грунте класса C относительно класса B ( $\Delta K = 0,5$ ) — 1,62 раза, на грунте класса C относительно класса D ( $\Delta K = 1$ ) — 2,62 раза. Для средних периодов аналогичные отношения ( $F_v$ ) составляют, соответственно, 1,96 и 2,62 раза. В то же время при амплитудах на коренных породах, превышающих 0,5 g, аналогичные отношения намного ниже и составляют в каждом из перечисленных случаев:  $F_a = 1,29$  и 1,36 раза;  $F_v = 1,56$  и 1,84 раза. В работе [29] была изучена новая база данных NGA (для запада США — с добавлениями). Из рисунка 8 в статье [29] видно, что при периодах 0,1; 0,3 и 1,0 с значения грунтового коэффициента при  $\Delta K = 1$  составляют примерно 1,9; 2,6 и 3,2 раза при малых ускорениях, в то время как при  $a_{кр} = 0,6$  g они снижаются до 1,0; 1,4 и 2,2.

Для данных Италии анализ грунтовых эффектов в работе [24] проводился в терминах, отличных от классов А–Е США, и без специального учета нелинейных амплитудно-зависимых эффектов. Для класса «мощный аллювий», сопоставимого с классом D США, относительно класса «скальный грунт» получены следующие грунтовые поправки в десятичных логарифмах: 0,10 — для максимального ускорения, 0,12 и 0,38 — для спектров реакции для периодов 0,2 и 1,0 с соответственно. Видно, что общая картина очень близка к таковой для условий США.

Для условий Японии в статье [40] грунтовые поправки к  $\lg RA$  для «среднего грунта» относительно «скально-

го» для периодов 0,2 и 1,0 с составляют 0,13 и 0,40 соответственно.

В работе [39] для различных амплитудных параметров, обобщенно обозначаемых  $Y$ , находили оценку производной  $G = d \lg Y / d \lg V_{30}$  (где  $V_{30}$  — это  $V_s$  в верхних 30 м разреза). Легко видеть, что  $d \lg Y / dK \approx 0,6 G$ . Полученные значения  $G$  дают следующие оценки величины  $d \lg Y / dK$ : 0,33 — для максимального ускорения; 0,43 — для максимальной скорости; 0,41 и 0,56 — для спектров реакции при периодах 0,2 и 1,0 с соответственно. Видно, что качественное согласие с результатами по США снова усматривается, но численные оценки, особенно для ускорения и  $RA$  при периоде 0,2, ощутимо выше оценок и для США, и для Японии (более ранних). Авторы [40] отмечают данный факт и его аномальный характер и ограничиваются этим. Однако в сопоставимом по объему данных анализе, проведенном авторами работы [50], грунтовые поправки для группы данных, относящихся (приблизительно) к грунту класса D относительно группы A + B, для  $\lg a$ ,  $\lg RA(0,2)$  и  $\lg RA(1,0)$  составляют соответственно 0,11; 0,14 и 0,27; такие значения находятся в хорошем согласии с данными США. В статье [22] построены УПДГ для зон субдукции (в основном по данным Японии и Мексики). Грунтовые коэффициенты для классов C, D и E (относительно класса B) составили: 1,5; 1,9 и 2,0 раза — для ускорений; 1,4; 1,9 и 1,8 раза — для спектров при  $T = 0,2$  с; 1,35; 2,00 и 3,60 раза — для спектров при  $T = 1$  с. Все исследования, описанные в данном абзаце, не учитывали зависимость от амплитуды. Таким образом, оценки грунтовых эффектов для Японии и зон субдукции в основном вполне сопоставимы с данными по США. Исключением среди прореферированных здесь публикаций является работа [39], авторами которой были получены намного более высокие оценки грунтовых коэффициентов для ускорений и для  $\lg RA(0,2)$  не только в сравнении с остальными указанными статьями, но и в сравнении с оценками для запада США и Европы.

Интересна работа [28], где специально сравниваются результаты двух параллельных исследований грунтовых поправок, которые принимаются либо зависящими от амплитуды, либо постоянными. Для грунта класса D (относительно класса B) вариации грунтового коэффициента состав-

Таблица 4

**Грунтовые коэффициенты — поправки для определения максимального ускорения на нескальных грунтах по значению ускорения на скальном грунте, полученные путем преобразования данных таблицы 2.4 норм МСН-2002 [9] \***

Характеристика	Параметры колебаний грунтов****						
	1-я кат.	5	6	7	8	9	10
Балльность на грунте	2-я кат.	6	7	8	9	10	(11)
	3-я кат.	7	8	9	10	(11)	-
$A_{к2}$	-	0,150	0,30	0,50	1,0	-	-
$A_{кн}$	-	0,075	0,15	0,25	0,5	-	-
$K = 1^{**}$	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-
$K = 2^{***}$	<b>2</b> <i>(1,54)</i>	<b>2</b> <i>(1,54)</i>	<b>2</b> <i>(1,43)</i>	<b>1,67</b> <i>(1,26)</i>	<b>1,43</b> <i>(1,1)</i>	<b>(1,25)</b>	
$K = 3$	<b>4</b>	<b>3,2</b>	<b>2,8</b>	<b>2,0</b>	-	-	-

\* Таблица построена для случая, когда за опорное значение амплитуды берется ее значение  $A_{кн}$  на грунте с  $K = 1$  или на коренных породах исходя из предположения, что  $A = 0,15$  при  $I = 7$  и (при малых амплитудах)  $d \lg A / dK = 0,3$ .

\*\* Примерно соответствует границе классов A | B США.

\*\*\* Примерно соответствует границе C | D США.

\*\*\*\* В круглых скобках курсивом показаны значения  $F_a$  по ИВС-2006, интерполированные к использованному набору дискретных значений  $K$ .

ляют: для  $a$  — от 1,6 при малых амплитудах до 0,5 при 1 g; для  $RA(1)$  (аналогично) — от 2,7 до 1,4. В то же время амплитудно-независимые грунтовые коэффициенты для  $a$  и  $RA(1)$  составляют 1,38 и 2,30.

При анализе различий между регионами следует иметь в виду, что модель вертикального распространения волны и тем более частная модель отношения акустических жесткостей не дают полного описания картины грунтовых коэффициентов. Более совершенная модель должна была бы, во всяком случае, учитывать роль резонансов в слое. Возможно, нужно учитывать еще вклады поверхностных волн, включая их высшие гармоники. Поэтому различия в оценках не должны никого удивлять.

В целом из приведенных примеров видна ясная качественная картина поведения грунтовых коэффициентов: их значения выражено снижаются с ростом амплитуд на скальном грунте, причем при малых амплитудах грунтовой коэффициент для коротких периодов заметно ниже, чем для средних.

Обобщение данных такого рода по многим землетрясениям, в первую очередь для запада США, послужило основой для установления нормативных грунтовых коэффициентов ИВС-2006. Так что не является странным, что абсолютные значения грунтовых коэффициентов обычно сопоставимы с таковыми в нормах США.

Из рисунка 2 видно, что по мере увеличения максимального ускорения для

скального грунта устойчивый рост амплитуд с ростом  $K$  прекращается и при  $A_B = 0,5$  g формируется картина насыщения амплитуд при значениях, характерных для грунтового класса B. Важно отметить, что «переключение» с линейного на заметно нелинейный режим происходит постепенно: от отсутствия вплоть до  $K = 2,5$  при  $A_B = 0,1$  до «немедленного» включения при  $K \approx 1,5$  при  $A_B = 0,5$ .

### 3.5. Методические проблемы действующих норм СМР, СНиП и подхода к ОСР в плане концепции приращения балльности

Использование в СНиП II-7-81\* [15] и МСН-2002 [9] в качестве опорного амплитудного параметра колебаний максимального ускорения для среднего ( $K = 2$ ), а не для скального ( $K \approx 1$ ) грунта следует традициям норм СССР, но по этой причине возникает ряд сложностей, причем не только с нормированием в строительных нормативных документах, но и с методиками СМР и частично ОСР.

Чтобы уяснить проблемы, следует осознать, что у создателей советской традиции, выразившейся в нормах СНиП II-7-81\*, РСН 60-86 и РСН 65-87 [13, 14, 15], в качестве исходной концепции был взгляд на грунтовую толщу как на линейную систему. При этом при малых амплитудах она действительно ведет себя как близкая к линейной упругая или вязкоупругая система. На этой основе можно: (1)

принимать вклад грунтовой толщи в амплитуды просто в виде коэффициента  $k_{zm} = 2^{\Delta l} = 10^{0,3010 \Delta l} = 10^{(d \lg a / d) \Delta l}$  (где  $\Delta l$  — приращение балльности относительно эталонного грунта); (2) принимать коэффициент  $k_{zm}$  неизменным для слабых и сильных колебаний; (3) выбирать эталонный грунт как «средний» ( $c K = 2$ ); (4) принимать амплитудный коэффициент  $k_{zm}$  одинаковым также и для амплитуд ускорений, скоростей и (реже) смещений независимо от гипотезы линейности (это было принято допустимым из-за невозможности последовательного применения в доцифровую эпоху численных, и в частности спектральных, методов). Строго говоря, все эти четыре предположения неверны; но для инженерного расчета вопрос состоит в том, насколько серьезные ошибки вносятся, если пренебречь учетом отклонений. К сожалению, в каждом из случаев эти ошибки немалы. Разберем данный вопрос детальнее (отметим, что это обзор, не претендующий на новизну).

Предположение 4 нарушается оттого, что на самом деле в линейном случае  $k_{zm}$  — это частотно-зависимый коэффициент (передаточная функция). Его значения различны на разных частотах, что общеизвестно для ситуации резонанса в слое. Менее популярный, но тоже общеизвестный факт — это зависимость  $k_{zm}$  от толщины слоя. Зафиксируем длину волны в коренных породах и время пробега сквозь слой. Тогда эффект слоя будет мал для длинных волн, но будет следовать отношению акустических жесткостей (импедансов) для коротких волн. Переключение режимов происходит при толщине слоя, близкой к четверти длины волны. К сожалению, использование при СМР модели среды в виде упругого полупространства игнорирует данный факт и чревато существенными ошибками. Другая важная причина различий — это достаточно заметная частотная зависимость вклада в  $k_{zm}$  вязкоупругих потерь в грунтовой толще. Приведенный комментарий относился к передаточной функции. Но по причине реальной формы спектров оказывается, что максимальные ускорения и скорости можно ассоциировать со спектральными полосами 3,0–10 и 0,5–2,0 Гц, что ведет к невозможности отождествить  $k_{zm}$  для скоростей и ускорений. Это верно и по отношению к наблюдаемым смещениям грунта. Однако этот случай вызывает особые трудности. При анализе наблю-

денных смещений редко осознается, что реконструированная по акселерограмме временная функция смещения (и его максимальная амплитуда) существенно зависит от нижней границы полосы частот, выбранной при анализе. Этот выбор (обычно в области 0,07–0,20 Гц) диктуется в основном искажениями и помехами акселерографического канала. Подобный выбор частоты среза кажется объективным, и является корректным в каждом отдельном случае. Однако при этом никак не устраняется тот факт, что искажения сигнала на разных акселерограммах являются заметно неоднородными. В результате статистика максимальных смещений приобретает особый смысл — они являются «максимальными смещениями, вычисленными в условиях варьирующей от записи к записи нижней частоты среза корректирующего фильтра. К тому же реальные максимальные смещения могут вообще быть ненаблюдаемыми на записях акселерографов, будучи ассоциированными с периодами 20–50 с или более. Эмпирически значения  $k_{zm}$  уменьшаются с частотой или с переходом от смещений к скоростям и далее к ускорениям.

Осознав существенную частотную зависимость  $k_{zm}$ , перейдем к предположениям 1 и 2. Помимо уже обсужденной частотной зависимости значение  $k_{zm}$  также зависит и от амплитуды. Простейшее описание эффекта грунтового слоя (см. рис. 2) заключается в том, что возникают дополнительные неупругие потери, которые нельзя описать через вязкость (хотя уменьшение эффективного  $Q$  слоя с ростом амплитуды отмечалось, последовательное описание на этой основе невозможно). Иногда встречаются случаи, когда нелинейность ведет к заметной «перекатке» энергии между разными полосами частот, но в рамках проблемы строительных норм эти вопросы рассматривать нецелесообразно. Ограничимся лишь случаем дополнительных неупругих потерь. Этот эффект может быть описан в простейших и часто встречающихся случаях через введение для каждого уровня амплитуды своей эффективной передаточной функции. Это соответствует подходу ИВС-2006, где нелинейные эффекты описываются по отдельности для высоких частот (через таблицу  $F_a$ ) и для «окрестности» 1 Гц (через таблицу  $F_v$ ). Еще проще описание (в виде таблицы) через единый для всех частот корректирующий коэффициент, который за-

висит от амплитуды, что, по существу, делается в МСН-2002. Можно принимать набор поправок при переходе от малых к большим амплитудам не в виде таблицы, а как серию поправок, привязанных к некоторому фиксированному/опорному значению амплитуды, как это делается в Еврокоде 8.

Рассмотрим предположение 3. Как показывает пример норм МСН-2002 [9], использование в качестве опорного значения амплитуды для среднего грунта технически возможно. Но этот путь сводится к тому, что мы прогнозируем поведение нелинейной системы на основе ее выходной амплитуды. Обычный подход к описанию несложной нелинейной системы с ограничением — это линеаризация, то есть использование, с необходимыми оговорками, амплитудно-зависимой передаточной функции, действующей на входной сигнал. При использовании в качестве исходного амплитудного параметра выходной амплитуды добавляется еще необходимость пересчета сигнала от выхода ко входу. Алгоритм становится неуклюжим и логически непрозрачным. В сейсмологии СДГ пересчета сигнала от выхода ко входу — это хорошо известная классическая проблема пересчета акселерограммы при переходе от поверхности грунта к коренным породам с учетом нелинейности. Этот шаг является неустойчивой задачей даже в линейном случае, что добавляет существенную неопределенность в результат, и при возможности от этого шага следует избавляться.

### 3.6. Выводы и рекомендации

Изложенный в данном разделе материал вполне уверенно обосновывает следующие тезисы (в основном уже развитые ранее в статье [5]).

1. Реальные различия максимальных ускорений для грунтов разного типа плохо описываются коэффициентом  $2^{\Delta l}$ . Грунтовые эффекты сильно зависят от частоты, поэтому коэффициент  $2^{\Delta l}$  дает разумную оценку для спектров вблизи периода 1 с или для максимальных скоростей, но для ускорений его использование в типичных случаях некорректно. Рост амплитуд ускорения и спектров при коротких периодах с увеличением категории грунта от  $K = 1$  к  $K = 2$  как правило происходит медленнее, чем в принятых в России нормативных документах.

2. Имеет место выраженная зависимость грунтовых эффектов от амплитуды колебаний. Особенно ярко это явление проявляется при высоких частотах.

**Предлагаемый вариант связи нормативной балльности на среднем грунте  $I_{K2}$  и нормативного значения максимального ускорения  $A_{kn}$  (ед. g) на коренных породах или на грунте категории I**

№ вар.	Характеристика ускорения	Значение балльности $I_{K2}$ на среднем грунте (например, по карте ОСР)										
		6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0
1	$I_{K1}^{**}$	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
2	$d \lg A / dK$	0,200	0,200	0,200	0,190	0,170	0,140	0,110	0,065	0,060	0,060	0,060
3	$A_{K2}$	0,0703	0,1030	0,1410	0,2060	<b>0,2810</b>	0,3650	0,4680	0,6740	0,9370	1,3100	1,8700
4	$A_{kn}$	0,0443	0,0650	0,0886	0,1330	0,1900	0,2650	0,3630	0,5810	0,8160	(1,1420)	(1,6320)

\*\* Предполагаемое значение балльности на скальном грунте.

тах 3–10 Гц (периодах 0,1–0,3 с). Учитывать названные явления можно либо по грубой схеме (различая только слабые и сильные колебания и используя в нормах параметры для сильных колебаний), либо более аккуратно, вводя явную зависимость грунтовых коэффициентов от амплитуды. В целом по пп. 1 и 2, учет эффектов грунта на основе приращения балльности является чрезмерным упрощением и ведет к заметным ошибкам, и от этого подхода следует отказаться.

3. Наличие выраженных нелинейных эффектов на нескальных грунтах затрудняет понимание и анализ нормативных движений грунта. Эти трудности имеют ограниченный характер, если нормативные параметры колебаний отнесены к скальному грунту и эффект грунтовой толщи можно рассматривать в каждый момент как действие заданного нелинейного оператора (например, как эквивалентного линейного оператора с параметрами, зависящими от амплитуды). Трудности анализа дополнительно резко усиливаются, если нормативные параметры колебаний отнесены к нескальному грунту. С учетом зарубежного опыта целесообразно использовать в нормах такой базовый параметр, как максимальное ускорение (и/или иные параметры), отнесенный к скальному грунту. Поясним, что СНиП в практике играет важную роль не только как непосредственный инструмент нормирования при массовом строительстве, но и как база для более глубокого, или обобщенного, или нестандартного анализа сейсмических нагрузок, как точка отсчета при адаптации наблюдаемых и искусственных или синтетических акселерограмм. Решение именно этих задач особенно затрудняется в том случае, если нормативные нагрузки заданы для нескальных пород.

4. Следует также отметить целесообразность перехода к более дробной

градации грунтов, например, следуя европейским нормам, с шагом 2 раза по средней скорости вместо принятых сейчас 4 раз. Только такой или близкий к нему подход будет логически совместим с предполагаемым шагом дискретизации новой карты ОСР, равным 0,5.

#### 4. Обоснование и вариант процедуры для составления карт сейсмической опасности (карт ВАСО) РФ в терминах сейсмических ускорений

##### 4.1. Предлагаемый вариант схемы пересчета при переходе от баллов к ускорениям

С учетом норм МСН-2002, ИВС-2006 и др. был составлен вариант грунтовых коэффициентов  $K$  в диапазоне 1–2, и жестко с ним связанный вариант численной связи балльности с ускорением (табл. 5). В качестве исходных опорных значений комбинаций «баллы — ускорение» согласно нашему анализу данных европейской базы акселерограмм (кроме Италии) было принято значение  $A = 0,33$  g для  $I = 8$ . Это значение было получено без деления на группы по видам грунтов.

В шапке табл. 5 имеется набор уровней нормативной балльности  $I_{K2}$  на среднем грунте. Сетка значений категории грунта с шагом 0,5, принятая здесь, согласуется с шагом дискретизации новой карты ОСР, который, как предполагается, должен составлять 0,5 балла [4, 5]. В первой строке таблицы даны соответствующие значения балльности  $I_{K1}$  для коренных пород или площадки со скальным грунтом. Во второй строке даны значения коэффициента  $d \lg A / dK$ , численно определяющего способ перехода от  $A_{K2}$  к  $A_{kn} = A_{K1}$ . Значения этого коэффициента сильно зависят от амплитуды, определяемой, например, через  $A_{K2}$ . Они также могли бы зависеть от категории грунта  $K$ , но фактические цифры даны

исходя из предположения, что категория грунта находится в ограниченном диапазоне 1–2. Они пригодны для максимальных ускорений, но также дают типичное поведение спектральных амплитуд для периодов 0,1–0,3 с. Для численной оценки ( $d \lg A / dK$ ) были использованы в основном значения  $F_a$  табл. 2 для диапазонов классов грунта А–В, В–С и С–D. С этой целью были использованы первые разности таблицы  $F_a$  по аргументу «класс грунта» с дальнейшим сглаживанием.

В качестве возможной альтернативы был рассмотрен вариант с использованием постоянного, не зависящего от амплитуды значения коэффициента ( $d \lg A / dK$ ). Это легко сделать на основе грунтовых коэффициентов Еврокода-8. Оказалось, что зависимости  $A(K)$  по Еврокоду-8 (серые ломаные на рис. 2) можно аппроксимировать прямыми, построенными исходя из предположения фиксированного значения ( $d \lg A / dK$ ) для любых амплитуд. Соответствующая численная оценка ( $d \lg A / dK$ ) равна 0,09. Такой подход в решении инженерной задачи, вообще говоря, допустим. Однако это значение (привязанное к амплитудам  $A_{kn}$  порядка 0,25–0,45 g) в принципе невозможно получить в работах СМР с сигналами малых амплитуд. В результате возможна путаница и методические сложности, поэтому данный подход был отвергнут. В принятом ранее описанном подходе использование амплитудно-зависимого параметра ( $d \lg A / dK$ ) исключает подобные проблемы.

В третьей строке табл. 5 даны принятые при ее построении значения максимального ускорения  $A_{K2}$  для среднего грунта. Они получены на основе следующих соображений: (1) ход зависимости  $A(I)$  был принят в основном согласно действующему СНиП (2 раза на балл,  $d \lg A / dI = 0,3010$ ); (2) дополнительно при наибольших баллах была учтена небольшая тенденция к насыщению  $A_{K2}(I)$  с опорой на ход зависимости,

принятый в МСН-2002 (см. табл. 4); (3) было принято фиксированное опорное значение  $A_{K_2} = 0,281$  g при  $I_{K_2} = 8$ .

Последний выбор принципиален и имеет следующее обоснование. Согласно строке 2 табл. 5  $d \lg A / dK = 0,17$  при  $I_{K_2} = 8$ ;  $d \lg A / dK = 0,11$  при  $I_{K_1} = 8$ . Так что для таких уровней колебаний грунта можно принять среднее значение  $d \lg A / dK = 0,14$ , то есть изменение амплитуды примерно в 1,4 раза на категорию грунта. В качестве опорного значения на основе ранее сделанных эмпирических оценок можно принять, что значению  $I = 8$  соответствует значение  $A(I | I = 8) = 0,33$  g. Отнесем это значение к середине интервала между грунтами категорий 1 и 2. Тогда это значение можно считать средним геометрическим из величин для скального и среднего грунта. В результате подобного расчета получаем следующее: (1)  $A_{K_2} = 0,33 \times 10^{-0,07} = 0,281$  g (это значение было принято за базовое) при  $I = 8$  для среднего грунта; (2)  $A_{K_1} = 0,33 \times 10^{+0,07} = 0,388$  g при  $I = 8$  для скального грунта. Подчеркнем, что здесь речь идет о ситуациях, когда зафиксированы именно значения балльности, наблюдаемые на разнородных грунтах, а не уровень амплитуд на коренных породах.

В строке 4 табл. 5 приведен набор значений максимального ускорения  $A_{kn}$  для коренных пород, полученный по значениям  $A_{K_2}$  из строки 3 с использованием значений коэффициента ( $d \lg A / dK$ ) из строки 2. Этот набор является основным результатом данной работы. Численно зафиксированная в табл. 5 связь значений  $I_{K_2}$  (понимаемая в ее шапке как балльность на карте ОСР) и  $A_{kn}$  предлагается как нормативная для привязки значений ускорения для грунта с  $K = 1$  к балльности на карте ОСР.

Предполагается, что для расчета нормативного спектра реакции  $RA(T)$  будет применено нормативное ускорение  $A_{kn}$ , для чего будут использованы заданные для каждого  $K$  привязанные к  $A_{kn}$  спектральные функции  $\beta(T_c)$ . Поясним, что только строка 4 табл. 5 содержит нормативную информацию. Данные строк 1–3 приводятся для информации и не участвуют в прикладном расчете. В частности, значения ускорения  $A_{K_2}$  для среднего грунта из строки 3 имеют ориентировочный характер и не должны рассматриваться как рекомендуемые для среднего грунта. Предполагается, что рекомендуемое значение ускорения будет получаться на основе  $A_{kn}$  как ре-

зультат СМР. Возможно и использование упрощенных схем, но оно должно отражать региональную специфику. Используемые в расчетах значения ( $d \lg A / dK$ ) нет оснований считать специфичными для запада США и Европы. Однако, судя по японскому опыту, они не могут быть вполне уверенно рекомендованы для зон субдукции.

Из приведенных материалов следует, что связь между баллами и ускорением должна, по крайней мере при больших баллах в диапазоне 8–10, существенно зависеть от типа грунта. При фиксированном значении балльности ускорение для скальных грунтов должно быть выше, чем для среднего грунта. Данная ситуация иллюстрируется на рис. 4 и в табл. 5. Как и следовало ожидать, при одинаковых значениях балльности в шапке и строке 1 табл. 5 этим грунтам соответствуют различные величины  $A$ . Например, величине  $I = 8$  соответствует (по предположению) значение 0,281 g в условиях среднего грунта, но значение 0,363 g в условиях скального. Для  $I = 8$  полученная ранее эмпирическая оценка  $a = 0,33$  g, при выводе которой род грунта не учитывался, оказывается примерно в середине диапазона 0,28–0,36 g.

На рисунке 4 также приведена зависимость для мягкого грунта. В этом случае при росте балльности и ускорения для скального грунта последнее при больших баллах в диапазоне 8–10 насыщается при значениях около 0,4 g. Любопытно, что ускорения при фиксированном значении балльности для мягкого грунта при  $I = 6 \div 8$  получились чуть выше, чем для среднего, а не ниже, как можно было бы ожидать на основе экстраполяции тенденции от  $K = 1$  на  $K = 2$ .

Фактическая тенденция прямо отражает устройство таблицы значений  $F_a$  из ИВС-2006, которая предсказывает более быстрый рост амплитуд при переходе от  $K = 2$  к  $K = 3$  по сравнению с переходом от  $K = 1$  к  $K = 2$ . Такое поведение параметра  $F_a$  обнаружено эмпирическим путем. По-видимому, оно связано с тем, что ситуация мягких грунтов возникает обычно в условиях осадочных бассейнов и аллювиальных долин, где рост амплитуд относительно условий скального грунта происходит не только за счет эффектов низкой акустической жесткости, но и в большей мере за счет формирования поля поверхностных волн.

Зависимость максимальных ускорений от рода грунта при фиксирован-

ном значении балльности не просто автоматически следует из принятых таблиц ИВС-2006, но имеет и определенную независимую наблюдательную основу. В работе [46] при анализе большого объема материалов США методом множественной регрессии была установлена именно такого рода зависимость для уровня спектра Фурье для коротких периодов (поведение этого параметра аналогично поведению максимального ускорения).

Данный вопрос был специально изучен в работе [47] по материалам регистрации СДГ Греции. Было обнаружено (см., например, рис. 4 в работе [47]), что связь «баллы ММ — ускорение» заметно зависит от типа грунта. При 7 баллах пиковое ускорение составляет около 0,16 g на скальном и около 0,09 g на мягком грунте. Авторы [47] отмечают, что эти акселерограммы необычно высокочастотные, и предостерегают от далеко идущих обобщений. Однако характер зависимости от грунтовых условий как в плане знака эффекта, так и в плане его амплитуды приемлемо согласуется с тенденцией, отображенной на рис. 4 (0,18 g на скальном и 0,14 g на мягком грунте при 7 баллах).

Надо, однако, отметить, что выполненный автором настоящей статьи анализ связи « $a-I$ » по европейской базе данных не показал выраженной тенденции зависимости от типа грунта, по крайней мере, в рамках принятой там классификации грунтов. Можно полагать, что четкий результат по данным Греции был связан с более тщательным и систематическим проведением там сбора и анализа данных.

#### 4.2. Предлагаемый вариант процедуры составления карты сейсмической опасности (карт ВАСО) РФ в терминах сейсмических ускорений

Предлагаемая процедура составления карты сейсмической опасности (карт ВАСО) РФ в терминах сейсмических ускорений включает следующие шаги.

1. Составляется карта ВАСО территории в терминах баллов макросейсмической интенсивности для заданных вероятности превышения  $P$  и периода времени  $T$  (например, для  $P = 10\%$  и  $T = 50$  лет).

2. Для каждой точки сетки расчета упомянутой карты ВАСО выполняется пересчет значений балльности  $I$  на среднем грунте в значения пикового ускорения  $A$  на скальном грунте. Ис-

пользуется непосредственно полученное расчетом ВАСО неокругленное значение  $I$ . Принятая связь  $A(I)$  имеет непрерывный (неступенчатый) характер и определяется линейной интерполяцией по данным шапки и строки 4 табл. 5.

Данный подход не должен комбинироваться с использованием фактически зафиксированного в ныне действующих СНиП предположения, что амплитуда пикового ускорения меняется вдвое при изменении категории грунта на единицу при постоянной амплитуде на скальных грунтах или коренных породах ( $d \lg A / dK = 0,3010$ ). Использование этого предположения обычно будет приводить к неоправданному завышению расчетных нагрузок в условиях среднего грунта. Вместо этого рекомендуется провести обзорные работы по СМР в регионе для определения спектральных характеристик типичных грунтовых толщ и прогноза изменения этих характеристик при больших амплитудах. При отсутствии данных СМР можно следовать правилу, отраженному в шапке и строке 2 табл. 5 (выведенному по опыту регистрации колебаний грунта в условиях запада США и Европы).

3. По значениям  $A$ , полученным на исходной сетке расчета карты ВАСО в баллах, составляется карта ВАСО в единицах ускорения (в изолиниях). Эта карта для каждой точки территории дает формальную вероятностную оценку сейсмической опасности в терминах пиковых ускорений на скальном грунте или коренных породах с заданной вероятностью превышения (например, 10%) за заданный срок (например, за 50 лет).

Имеются два варианта оформления карты в изолиниях: вариант с интерполяцией значений  $A$  между изолиниями (вариант И) и вариант с дискретизацией

(ступенчатым представлением) значений  $A$  (вариант С). Приведем примеры. Для варианта И рекомендуемый набор изолиний изображаемых значений ускорения таков: 0,02; 0,025; 0,03; 0,04; 0,05; 0,07; 0,1; 0,125; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,70; 1,0. Изолинии подписываются этими числами. Значение  $A$  считается гладкой функцией координат и рассчитывается путем линейной интерполяции значений  $A$  между изолиниями.

Для варианта С изолинии рисуются для следующих значений ускорения: 0,0173; 0,0224; 0,0274; 0,0346; 0,0447; 0,0592; 0,0837; 0,1118; 0,1369; 0,1732; 0,2236; 0,2739; 0,3464; 0,4472; 0,5916; 0,8367; 1,1180. При этом полям (полосам), заключенным между этими изолиниями, приписываются постоянные значения  $A$  из списка: 0,02; 0,025; 0,03; 0,04; 0,05; 0,07; 0,1; 0,125; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,70; 1,0. Например, фиксированное значение 0,02 g приписывается всей полосе между изолиниями 0,0173 и 0,0224 g.

При сохранении зафиксированного в действующих СНиП предположения, что амплитуда ускорения меняется вдвое при изменении категории грунта на единицу при постоянной амплитуде на скальных грунтах или коренных породах (при ), составление сейсмологически обоснованной карты расчетных пиковых ускорений, по существу, невозможно.

#### Заключение

Выполнение вероятностного анализа сейсмической опасности непосредственно в терминах амплитуд колебаний, в том числе в терминах максимальных ускорений грунта, в условиях России затруднительно из-за нехватки наблюдательных материалов инженерной сейсмологии. В принципе можно

было бы использовать обходные пути, но в настоящее время этот подход не может дать сколько-нибудь надежных результатов. Он может стать более приемлемым в перспективе после создания акселерографической сети России и накопления минимального объема зарегистрированных сильных движений грунта на территории РФ.

После проведения ВАСО в терминах баллов макросейсмической интенсивности  $I$  его результаты могут быть использованы для оценки сейсмической опасности в терминах амплитуд колебаний, путем прямого пересчета. Такая оценка будет приемлема по надежности. Выполнение пересчета оценок, полученных при ВАСО в терминах баллов  $I$ , в аналогичные оценки для максимальных ускорений на скальном грунте возможно и не должно давать существенных систематических ошибок. На основе накопленных в последние годы объемов наблюдений сильных движений грунта был предложен вариант использования для этого соотношения «баллы — максимальное ускорение» на скальном грунте. При этом исходили из предположения, что это соотношение может и должно быть специфическим для грунтов разных категорий.

Соотношения «баллы — ускорение» и «ускорение — категория грунта», используемые в СНиП II-7-81\* [15], следует считать устаревшими. Их невозможно комбинировать с расчетами по предлагаемой схеме. Это относится и к подходу к сейсмическому микрорайонированию на языке приращения балльности. Корректный переход к нормированию сейсмических нагрузок на основе карт ОСР, выраженных в ускорениях на скальном грунте, невозможен без одновременного внесения существенных изменений в принципы СНиП и СМР.

### Список литературы

1. *Антикаев Ф.Ф.* Инструментальная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 5. С. 33---37.
2. *Антикаев Ф.Ф.* Сильные движения грунта при землетрясениях; сейсмические воздействия: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2001.
3. *Антикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В.* Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта // Исследования по сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. М.: Наука, 1988. Вып. 29. С. 98---108.
4. *Гусев А.А.* Некоторые вопросы сейсмологического обоснования норм сейсмостойкого проектирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 1. С. 32---36.
5. *Гусев А.А.* О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // Физика Земли. 2002. № 12. С. 35---44.
6. *Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2---3. С. 289---299.
7. *Ершов И.А., Шебалин Н.В.* Проблемы конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов // Прогноз сейсмических воздействий. Вопросы инженерной сейсмологии. 1984. Вып. 25. С. 78---95.
8. *Медведев С.В.* Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 151---162.
9. МСН-2002 (Международные строительные нормы СНГ). Строительство в сейсмических районах (проект) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002. № 3. С. 27---54.
10. *Окамото Ш.* Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат, 1980. 342 с.
11. *Павленко О.В.* Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир, 2009. 284 с.
12. *Ризниченко Ю.В.* От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Известия АН СССР. Физика Земли. 1965. № 11. С. 1---12.
13. РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. М.: Госстрой РСФСР, 1986. 17 с.
14. РСН 65-87. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. М.: Госстрой РСФСР, 1987. 14 с.
15. СНиП II-7-81\*. Строительные нормы и правила. Строительство в сейсмических районах. М.: Минстрой России, 1995. 52 с.
16. *Страхов В.Н., Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Общее сейсмическое районирование территории России и сопредельных регионов // Физика Земли. 1998. № 10. С. 4---10.
17. *Чернов Ю.К.* Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. Ташкент: Фан, 1989. 296 с.

18. *Шебалин Н.В.* О равномерности шкалы балльности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. С. 222---233.
19. *Шебалин Н.В., Антикаев Ф.Ф.* Шкала сейсмической интенсивности землетрясений MMSK-92 (проект) // Магнитное поле Земли: математические методы описания. Проблемы макросеймики. Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2002. Вып. 34. С. 235---253.
20. *Штейнберг В.В., Сакс М.В., Антикаев Ф.Ф. и др.* Методы оценки сейсмических воздействий // Вопросы инженерной сейсмологии. 1993. Вып. 34. С. 5---94.
21. *Atkinson G.M., Youngs D.M.* Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions // Bulletin of the Seismological Society of America. 2003. V. 93. № 4. P. 1703---1729.
22. *Bindi D., Luzi L., Massa M., Pacor F.* Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA) // Bulletin of Earthquake Engineering. 2010. V. 8. № 5. P. 1209---1230. [DOI: 10.1007/s10518-009-9130-9](https://doi.org/10.1007/s10518-009-9130-9).
23. *Boore D.M., Atkinson G.M.* Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s // Earthquake Spectra. 2008. V. 24. P. 99---138.
24. BS EN 1998-1:2004. Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. General rules, seismic actions and rules for buildings. 2004.
25. *Campbell K.W., Bozorgnia Y.* Next generation attenuation (NGA) empirical ground motion models: can they be used in Europe? // Proceedings of the 1st European conference on earthquake engineering and seismology, Geneva, Switzerland, 3---8 September 2006. Paper № 458.
26. *Chiou B.S.-J., Youngs R.R.* An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra // Earthquake Spectra. 2008. V. 24. № 1. P. 173---215.
27. DIN EN ISO 19901-2:2005. Petroleum and natural gas industries. Specific requirements for offshore structures. Part 2: Seismic design procedures and criteria (ISO 19901-2:2004). English version. 2005.
28. *Douglas J.* On the regional dependence of earthquake response spectra // ISET Journal of Earthquake Technology. 2007. V. 44. № 1. P. 71---99.
29. *Douglas J., Mohai R.* Comparing predicted and observed ground motions from subduction earthquakes in the Lesser Antilles // [Journal of Seismology](https://doi.org/10.1007/s10518-009-9130-9). 2009. V. 13. P. 577---587.
30. European strong-motion database / CD-ROM. London: The Department of Civil and Environmental Engineering, Engineering Seismology and Earthquake Engineering of the Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2000.
31. *Gregor N.J., Silva W.J., Wong I.G., Youngs R.R.* Ground-motion attenuation relationships for Cascadia subduction zone megathrust earthquakes based on a stochastic finite-fault model // Bulletin of the Seismological Society of America. 2002. V. 92. P. 1923---1932.
32. Grunthal G. (Editor). European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) / Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Seismologie. Luxemburg: ESC, 1998. V. 15. 79 p.
33. International Building Code (IBC). Washington, DC: International Code Council Inc., 2009. 676 p. ISBN: 978-1-58001-725-1.

34. *Kanno T., Narita A., Morikawa N. et al.* A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. V. 96. № 3. P. 879---897.
35. *Kobayashi S., Takahashi T., Matsuzaki S. et al.* A spectral attenuation model for Japan using digital strong motion records of JMA87 type // *Proceedings of the 12th World Conf. on Earthquake Engineering*. 2000. V. 1. P. 263---270.
36. *Kuramoto H.* Seismic design codes for buildings in Japan // *Journal of Disaster Research*. 2006. V. 1. № 3. P. 341---356.
37. *Midorikawa M., Okawa I., Iiba M. et al.* Performance-based seismic design code for buildings in Japan // *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*. 2003. V. 4. № 1. P. 15---25.
38. *Midorikawa M., Okawa I., Iiba M. et al.* Performance-based seismic design provisions newly introduced to the Building standard law of Japan // *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering (JAEE)*. 2004. V. 4. P. 162---173.
39. *Mohammadioun B., Pecker A.* Low-frequency transfer of seismic energy by superficial soil deposits and soft rocks // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1984. V. 12. P. 537---564.
40. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992---1999 // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. № 6. P. 957---974.
41. *Trifunac M.D.* Empirical scaling of Fourier spectrum amplitudes of recorded strong earthquake accelerations in terms of Modified Mercalli Intensity, local soil conditions and depth of sediments // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1991. V. 10. P. 65---72.
42. *Tselentis G-A., Danciu L.* Empirical relationships between Modified Mercalli Intensity and engineering ground-motion parameters in Greece // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2008. V. 98. № 4. P. 1863---1875.
43. *Ulomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. P. 1023--1038.
44. *Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H. et al.* Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and modified Mercalli intensity in California // *Earthquake Spectra*. 1999. V. 15. P. 557---564.
45. *Zhao J.X., Zhang J., Asano A. et al.* Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. V. 96. P. 898---913.