

О необходимости одновременного и взаимно согласованного пересмотра комплекса документов ОСР - СМР - СНиП/СП, нормирующих сейсмические нагрузки для массовой застройки в России.

А.А.Гусев (gusev@emsd.ru)

ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

КФ ГС РАН, Петропавловск-Камчатский

В связи с подготовкой к 2012 г. новой версии карт ОСР России вновь встали вопросы общей структуры процедур оценки сейсмических нагрузок. Вдобавок к недостаточной изученности сейсмических нагрузок на территории России, большие проблемы связаны с устарелостью действующих традиций и норм в области ОСР, СМР и СНиП, (последние в части задания сейсмических нагрузок). Назрела существенная переработка норм для приведения их в соответствие с накопленной за последние 30 лет новой инженерно-сейсмологической информацией. При модификации ОСР, СМР и СНиП необходима единая научно-техническая линия. Без выработки такой согласованной линии независимые улучшения и изменения в каждой из областей ОСР, СМР и СНиП не смогут привести к новому качеству проектов, дезориентируют проектировщика, создадут путаницу, породят новые ошибки и неточности. Далее обсуждается, как этого избежать. При этом большинство замечаний и рекомендаций не новы.

Принятая сегодня процедура оценки сейсмических нагрузок для зданий и сооружений (кроме уникальных) такова: по результатам ОСР по периоду повторяемости и координатам площадки выдается целое I_{p2} -«балл на среднем грунте». По результатам инженерно-геологических изысканий или СМР определяются грунтовые условия площадки как целое число K - «категория грунта», которую, в отклонение от СНиП, будем далее обозначать арабской цифрой 1,2 или 3 (вместо I, II или III). По величине K определяется поправка за условия площадки - целое $\Delta I = K - 2$, а сумма $I_p = I_{p2} + \Delta I$ используется в СНиП для расчета нагрузки методом спектров реакции (МСР). Это выполняется в два этапа: (1) выполняется пересчет I_p в расчетное пиковое («максимальное») ускорение колебаний грунта A ; затем (2) вводится «коэффициент динамичности» $\beta(T, K)$, где T - собственный период сооружения или его моды колебаний. Инерционное расчетное ускорение (спектр реакции) равно $SA(T) = A \cdot \beta(T, K)$. Выполнение СМР желательно, но не обязательно; СНиП уже содержит детальные типовые характеристики грунтов с $K=1, 2$ и 3. СМР при назначении ΔI может учитывать, помимо литологии площадки, еще ряд факторов (эффект рельефа, эффект резонанса в слое). Предпочтительный метод СМР - на основе измерений амплитуд волн от слабых источников на грунте площадки (целевом) в сравнении с такими амплитудами на эталонном грунте.

Данная схема во многих аспектах устарела. Далее рассматриваются по отдельности две группы вопросов: (1) принципы блока ОСР и СНиП отдельно от СМР, и затем (2) проблемы блока СМР-СНиП.

Принципы пересмотра блока ОСР-СНиП.

Развитые страны перешли на характеризацию нагрузок при ОСР в физических параметрах колебаний - в виде карт А либо SA(T) для выделенных периодов. Этот переход стал возможен при определенном уровне изученности сильных движений грунта (СДГ). Традиция использования балла на карте ОСР временно приемлема в России с учетом имеющей место низкой изученности СДГ. Однако при использовании балла с карты ОСР этап перехода от балла к параметрам расчетного СДГ реализуется внутри СНиП. В рамках СНиП этот переход идет по традиционной схеме

$$A = 0.1 \cdot 2^{I_P-7} = 0.1 \cdot 2^{I_{P2}+\Delta I-7} = 0.1 \cdot 2^{I_{P2}-7} \cdot 2^{\Delta I}$$

Эта схема имеет следующие важные **слабые места**:

(1) Принятый ход коэффициента $C_{\Delta I} = 2^{\Delta I}$, учитывающего влияние литологии на ускорения грунта, **противоречит наблюдениям**. С учетом последних, переходя от среднего ($K=2$) к скальному ($K=1$) грунту, следовало бы принимать заметно большее значение $C_{\Delta I} = \frac{1}{1.6}$ (вместо $\frac{1}{2.0}$), даже при малых амплитудах. Такое значение коэффициента, однако, приемлемо лишь в случае малых амплитуд. При больших амплитудах значение $C_{\Delta I}$ растет до единицы и вполне может принимать значения более единицы. Это - эффект нелинейности нескального грунта в поле упругой волны большой амплитуды. Для мягких грунтов ($K=3$) подобные явления еще более яркие и характерны.

(2) В условиях не малых амплитуд и выраженных нелинейных эффектов, использование в качестве опорного значения пикового ускорения для

среднего грунта **приводит к логической неясности**. Традиция теории систем со всей определенностью говорит, что при изучении нелинейной системы ведущим параметром должна быть входная (а не выходная) амплитуда, что в наших условиях означает амплитуду на коренных породах ($K=1$, «скала»). Только для коренных пород, при их высокой прочности и слабой нелинейности, сохраняется прямая четкая связь балл - амплитуда и при низких, и при высоких баллах. Именно к этому случаю должны относиться параметры и карт ОСР, и СНиП. Отсюда важное практическое следствие - выбор значения A для коренных пород (A_1) как единого параметра колебаний для всей грунтовой толщи.

(3) Сделано неявное предположение, что связь $A(I)$ между пиковым ускорением и макросейсмическим баллом одинакова для грунтов разного типа (при разных K). **Это предположение опровергается наблюдениями**. При равных баллах, пиковое ускорение для скального грунта на 25-40% выше, чем для среднего. При $I=8-9$ баллов, значение пикового ускорения для мягкого грунта насыщается в области 0.3-0.5 g; дальнейший рост баллов и повреждений застройки (а также пиковых скоростей) не сопровождается ростом пиковых ускорений.

(4) Коэффициент 0.1 ($A(I=7)$) **занижен**; сегодняшняя наблюдательная сейсмология дает оценки, близкие к 0.15. Напротив, принятый шаг связи - 2 раза на балл - при 5-10 и $K=1$ ревизии не требует.

(5) Использование исключительно целых I_{p2} , ΔI и K создает чисто **искусственный источник ошибок** в нагрузках, достигающих почти 1.0 балла. Нарушена старая и правильная научная традиция - сохранять «лишнюю» или «запасную» цифру в промежуточных вычислениях.

Рекомендации по перечисленным пунктам

(с учетом действующих норм США и Европы и проекта МСН СНГ)

(1) Для любых, низких и высоких амплитуд на коренных породах, следует привести правила задания ускорений на основе литологии, включенные в строительные нормы, в соответствие с сейсмологическими фактами. Для высоких амплитуд следует, в частности, учесть эффекты резко увеличенных потерь энергии в разрушающемся грунте. Примеры см. в нормах США, Европы, СНГ(проект). (Нескальные грунты частично экранируют сильные колебания коренных пород; это не вполне последовательно учтено понижающим коэффициентом 0.75 для $K=3$.)

(2А, 3, 4) Если отображать на карте ОСР значения нормативного пикового ускорения, следует приводить на карте пиковые ускорения для условий скального грунта, даже если в процессе построения карты использовать, как обычно, балл на среднем грунте. При расчетах ВАСО для создания карты ОСР карта ВАСО для среднего грунта (аналог карт ОСР-97) была бы промежуточным результатом. Далее следует перейти к карте балльности для скального грунта, а затем строить карту нормативного пикового ускорения, используя для пересчета специфическую связь балл-ускорение именно для этого, скального ($K=1$) грунта, в согласии с современными сейсмологическими исследованиями. См. детали на странице

http://emsd.ru/~gusev/2011/Gusev2011-Normirovanie_nagruzok_uskoreniya.pdf

(2Б) Спектральная сейсмическая нагрузка в нормах могла бы вычисляться по формуле следующей структуры

$$SA(T) = A_1 \cdot Fa(A_1, K) \beta^*(T, K).$$

где A_1 - ускорение коренных пород, грунтовый коэффициент $Fa(A_1, K)$ отражает влияние грунтовой толщи на ускорение с учетом нелинейности, а функция $\beta^*(T, K)$ близка к традиционной. Возможно, но нежелательно, использование при этом единой $Fa(A_1, K) \equiv Fa(K)$ для любых амплитуд, как это сделано в Eurocode-8

(5) Следует ввести дробные уровни расчетного балла (с шагом не более 0.5, лучше 0.1-0.2), и дробные уровни категории грунта (например, с шагом 0.5). Аналогично, расчетное ускорение на карте ОСР должно меняться с шагом не более 0.15 по десятичному логарифму (1.25-1.45 раза), например, так:

0.02; 0.025; 0.03; 0.04; 0.05; 0.07; 0.1; 0.125; 0.15; 0.20; 0.25; 0.3;
0.4; 0.5; 0.7; 1.0;

Замечание: Описанная схема, если она будет использована на практике, должна внедряться **только и исключительно как единое целое**: в виде карты ОСР, изображающей A_1 , и раздела СНиП, включающего, например, набор коэффициентов Fa и кривых коэффициента динамичности $\beta^*(T, K)$. Не видно непротиворечивых путей внедрения такой схемы в пошаговом порядке, с модификацией методологии ОСР на первом шаге, но с переносом модификации методологии СНиП на более поздний этап. Чтобы не создавать путаницы и ошибок, подобного развития нужно избежать.

Принципы пересмотра блока СМР-СНиП.

Главное, чего не может учесть инженер на основе той простой схемы связи литология- ΔI , которая включена непосредственно в СНиП - это частотные (спектральные) эффекты. Даже при наличии результатов детального СМР, расчетчик по СНиП может законно использовать только приращение балльности ΔI - параметр, не учитывающий частоту/период. Поэтому задача СМР практически сводится к оценке ΔI , независимо от наличия данных о спектральных свойствах грунтовых толщ. В рамках СНиП эти данные не могут найти применения, хотя они часто могут быть получены при СМР. Очевидно, что частотно-независимое приращение балльности - логически непоследовательная идея в рамках принятого в СНиП *спектрального* подхода к нормированию сейсмических нагрузок. Но намного важнее нелогичности тот факт, что реальный эффект грунтовой толщи практически всегда существенно зависит от частоты (периода). В этих условиях **принцип частотной независимости приращения балльности автоматически ведет к существенным, иногда грубым ошибкам при прогнозе воздействия**. Последовательное использование частотно-независимых поправок к спектрам за грунты принципиально невозможно. Поэтому процедуру учета влияния грунта на амплитуды колебаний в терминах приращения балльности ΔI , принятую в действующей системе документов СП/СНиП и норм микросейсморайонирования РСН 60-86 и РСН 65-87, следует заменить на **использование спектральных (частотно-зависимых) грунтовых поправок**. Рекомендации названной системы документов должны быть модернизированы, а сами документы соответственно переработаны, причем **в комплексе**. В качестве выходной информации СМР, можно бы использовать, вместо ΔI , **$\Delta \lg SA(T)$ - приращение логарифма спектра реакции (ПДС-Р)**, или обычно численно близкое к нему **приращение логарифма сглаженного амплитудного спектра Фурье (ПДС-Ф)**.

Исторически, важнейшей задачей СМР являлось определение частотно-независимой поправки к амплитудам за счет различий в акустической жесткости (импедансе) верхов грунтовой толщи. Этот подход использует очень грубую модель среды как полупространства и линейное приближение. **Минимальной задачей современного СМР следует считать определение частотно-зависимого ПЛС относительно коренных пород ($K=1$).** При этом в первую очередь преодолевается хотя бы в принципе серьезнейшая проблема зависимости грунтового эффекта от толщины слоя. Простейший расчетный прием в этом случае - использование известного **«четверть-волнового приближения».**

При более детальном подходе можно выявить хорошо известные эффекты **резонансов грунтовых толщ**, целесообразность учета которых при проектировании обычно декларируется. Данный вопрос не рассмотрен в СНиП, и нет ясности, как учитывать данный фактор, даже если он явно важен, в практическом расчете. Заметим, что нормы США и Европы обходят данный вопрос, в то время как нормы Японии уделяют ему большое внимание.

При этом обсуждавшаяся выше проблема нелинейного поведения грунтовых толщ при больших амплитудах приводит к тому, что ПЛС, найденное (эмпирически или расчетом без учета нелинейности) для среды под площадкой для условий малых амплитуд, **не может служить надежным инструментом СМР**; при $T < 0.5-1$ с подобные оценки обычно будут **нереалистически завышенными**. Учет нелинейности может быть проведен либо очень грубо на основе множителей вроде F_a , либо более аккуратно с использованием соответствующих программных средств (SHAKE и т.п.).

Примечания

[1]. Недавно возник подход к нормированию сейсмических нагрузок, когда на вероятностной основе делается попытка учесть разброс прочности реальных сооружений, формально рассчитанных на определенную нагрузку. Практически это означает необходимость введения дополнительного повышающего коэффициента к нагрузке ($k_{\text{вер}}$, 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 вполне возможно, особенно в линейном приближении (хотя не выглядит остро необходимым). Например, совместно с картой ОСР нетрудно построить карту параметра $B'_I = -d \lg B(I)/dI$; где $B(I)$ - годовая повторяемость событий балла I . Значение B'_I определяет, как быстро растет значение периода повторяемости при росте I вблизи некоторого опорного значения $I=I_p$. Вместо создания карты параметра B'_I для использования расчетчиком, было бы еще удобнее, задав предполагаемую статистику прочности сооружений, рассчитать значения $k_{\text{вер}}$ сразу на этапе ОСР и передать их расчетчику в виде готовой карты (с относительно низкой детальностью). Альтернативно, значения $k_{\text{вер}}$ можно было бы рассчитать на основе серии карт ОСР для разных периодов повторяемости (типа ОСР97-АВС). Но этот вариант можно было бы осуществить аккуратно, только если бы эти карты были бы неокругленными. Фактическое округление карт ОСР97-АВС до целого балла делает подобный обходный путь очень грубым, 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, заведомо неоптимальный, путь.

[2]. Выше отмечалось, что сейсмологические данные говорят о стабилизации (насыщении) или даже снижении амплитуд колебаний мягкого грунта при росте амплитуд колебаний скального фундамента. Однако при отсутствии явного роста амплитуд, в зданиях продолжают расти разрушения, а с ними и макросейсмический балл. Это выглядит как парадокс: разрушения растут, несмотря на стабилизацию нагрузки. Однако, как видно, например, из текста описания макросейсмической шкалы MSK64, балл 10 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. При этом действующие в разных странах нормы не предусматривают расчет на подобные нагрузки. При необходимости возведения сооружений на мягких грунтах

в условиях 9 и более баллов на коренных породах (или на средних грунтах в условиях 10 и более баллов на коренных породах) учет данного фактора необходим.

Вывод. В адекватных случаях строительные нормы должны включать требование дополнительного расчета здания на неравномерную осадку грунта.

[3] Традиционный подход при СМР - использование для расчета ΔI приращений логарифма пиковых амплитуд (ПЛА) ускорений (ПЛА-У), скоростей (ПЛА-С) или смещений (ПЛА-См). Если в качестве выходной информацией СМР будет принято использовать ПЛС, данные расчеты становятся, в сущности, ненужными. Однако накопленный опыт работы с ПЛА полезен, и следует понимать, что применимо из старого опыта. В этой связи надо учитывать следующее:

(1) Идея, что значения ПЛА для ускорений, скоростей и смещений одинаковы, грубо неверна. Обычно $\text{ПЛА-У} < \text{ПЛА-С} < \text{ПЛА-См}$.

(2) ПЛА-У, как следует из изложенного выше, - неудачный инструмент для СМР; в первую очередь, в силу его зависимости от амплитуды; но и по ряду иных причин. Даже вполне грамотные экспериментальные работы СМР на основе ПЛА-У, проведенные при малых амплитудах, должны, при следовании гипотезе линейности, приводить к ошибочным прогнозам для условий больших амплитуд.

(3) Только ПЛА-С дает численно корректную оценку макросейсмического приращения балльности ($\Delta I = 3.3 * \text{ПЛА-С}$). **Очень важно, что эта оценка слабо искажается нелинейными эффектами при больших амплитудах.**

(4) Использование параметра ПЛА-См является дискуссионным в принципе. Форма спектров смещений реальных сигналов (обычен рост до периодов 20, 30 или даже 100 с) ведет к тому, что полученная при обработке акселерограмм оценка амплитуды смещения грунта сильно зависит от выбора левого среза полосового фильтра, используемого при коррекции за прибор. Эта проблема не исчезла и с появлением цифровых акселерографов. Вычислять отношение амплитуд при неидентичных фильтрах просто бессмысленно. Если же фильтры идентичны, деление законно, но его результат зависит от выбора фильтра, что лишает его определенности.

Вывод. Проводить СМР на основе отношения амплитуд скорости допустимо; результат можно законно интерпретировать как приращение балльности. Однако, этот результат пригоден для прогноза нагрузок на сооружения с собственными периодами T лишь из ограниченного диапазона, приблизительно $T=0.7 \div 1.5$ с. Проводить СМР на основе отношения амплитуд ускорения или смещения нежелательно.

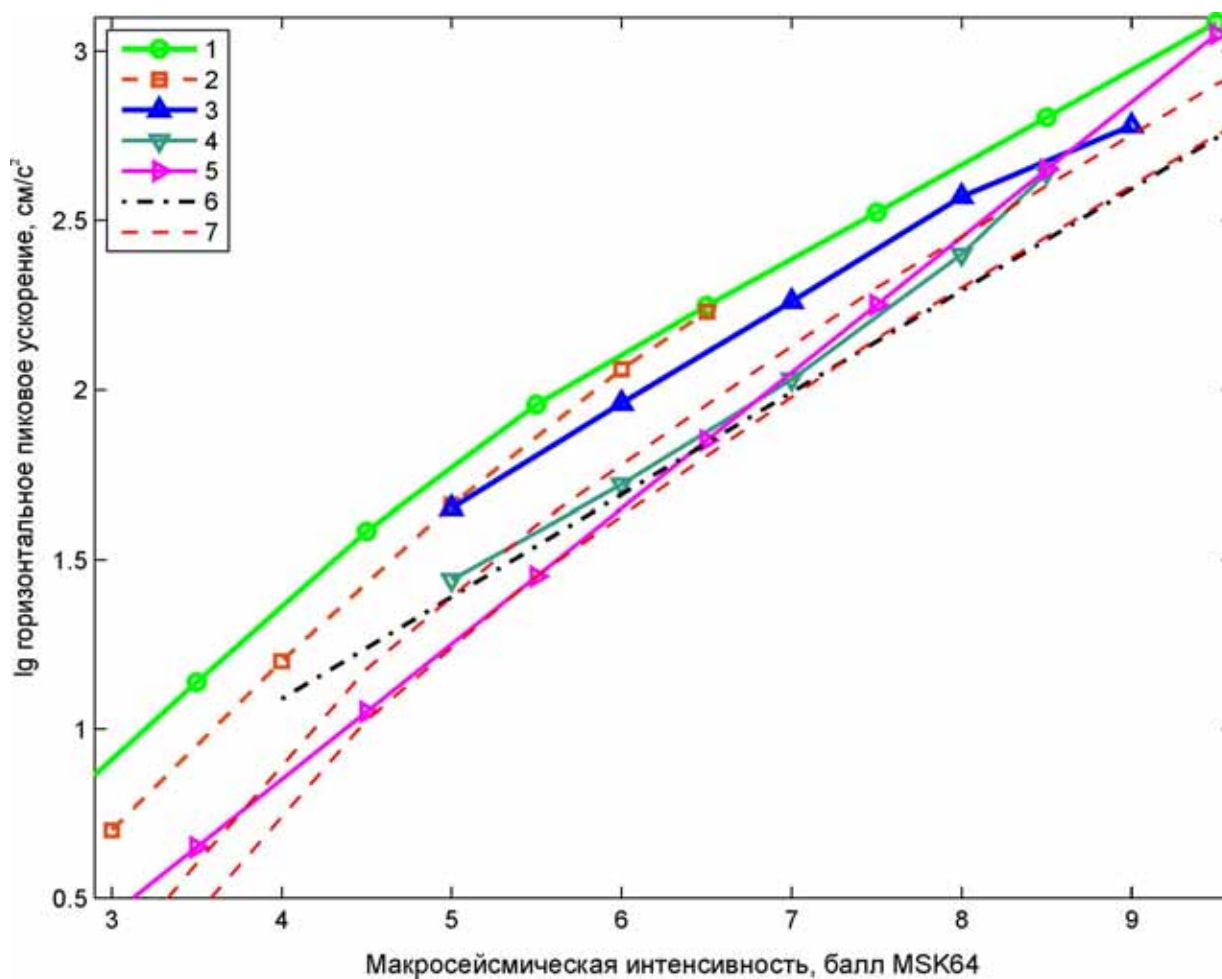


Рис 1. Варианты оценок средней эмпирической зависимости $a(I)$ наблюдаемых пиковых горизонтальных ускорений (ордината) от макросейсмической интенсивности по шкале MSK64 или другим 12-балльным шкалам (абсцисса).

Обозначения:

- 1 - $a(I_{MM})$ по массовому материалу для запада США (Wald et al 1999);
- 2 - наблюдаемая средняя зависимость $a(I_{MSK})$ по ограниченным данным для Камчатки
- 3 - то же по данным европейской базы данных сильных движений грунта вне Италии (предпочтительная);
- 4 - то же для Италии, причем фактически использована макросейсмическая шкала MCS;
- 5 - обобщенный прямолинейный график $\lg a = -0.75 + 0.40I$ согласно (Аптикаев 2001, 2005);
- 6 - $A(I)$ по СНиП II-7-81*, с линейной экстраполяцией;
- 7- средняя зависимость $a(I)$ по (Аптикаев и Шебалин 1988) для вариантов длительности $d_{50\%} = 5$ с (верхняя) и 10 с (нижняя кривая).

Кривые 2,3,4 получены с помощью приближенной нелинейной ортогональной регрессии.

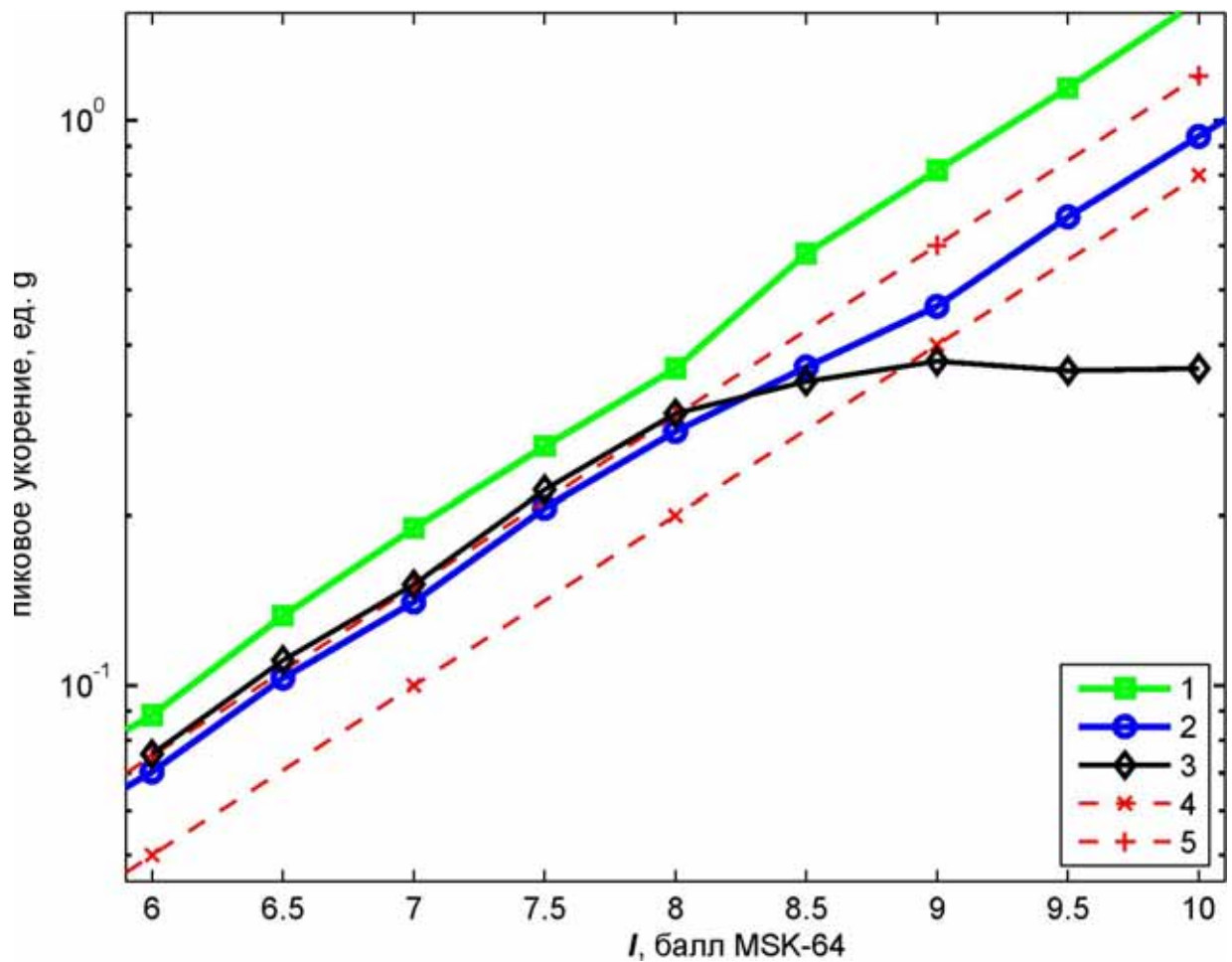


Рис. 2. Предполагаемые зависимости пикового ускорения от балла $A(I)$ для грунтов различного типа

Обозначения:

- 1 - специфическая зависимость $A(I)$ для грунта категории 1 по СНиП II-7-81* (скального)
- 2 - то же для грунта категории 2 (среднего)
- 3 - то же для грунта категории 3
- 4 - зависимость $A(I)$ по СНиП I-7-81*;
- 5 - то же, но с дополнительным коэффициентом 1.5.

Пояснение: при фиксированном балле, амплитуды на коренных породах для кривых 1, 2 и 3 предполагаются *различными*

Пиковое ускорение A в зависимости от категории грунта K

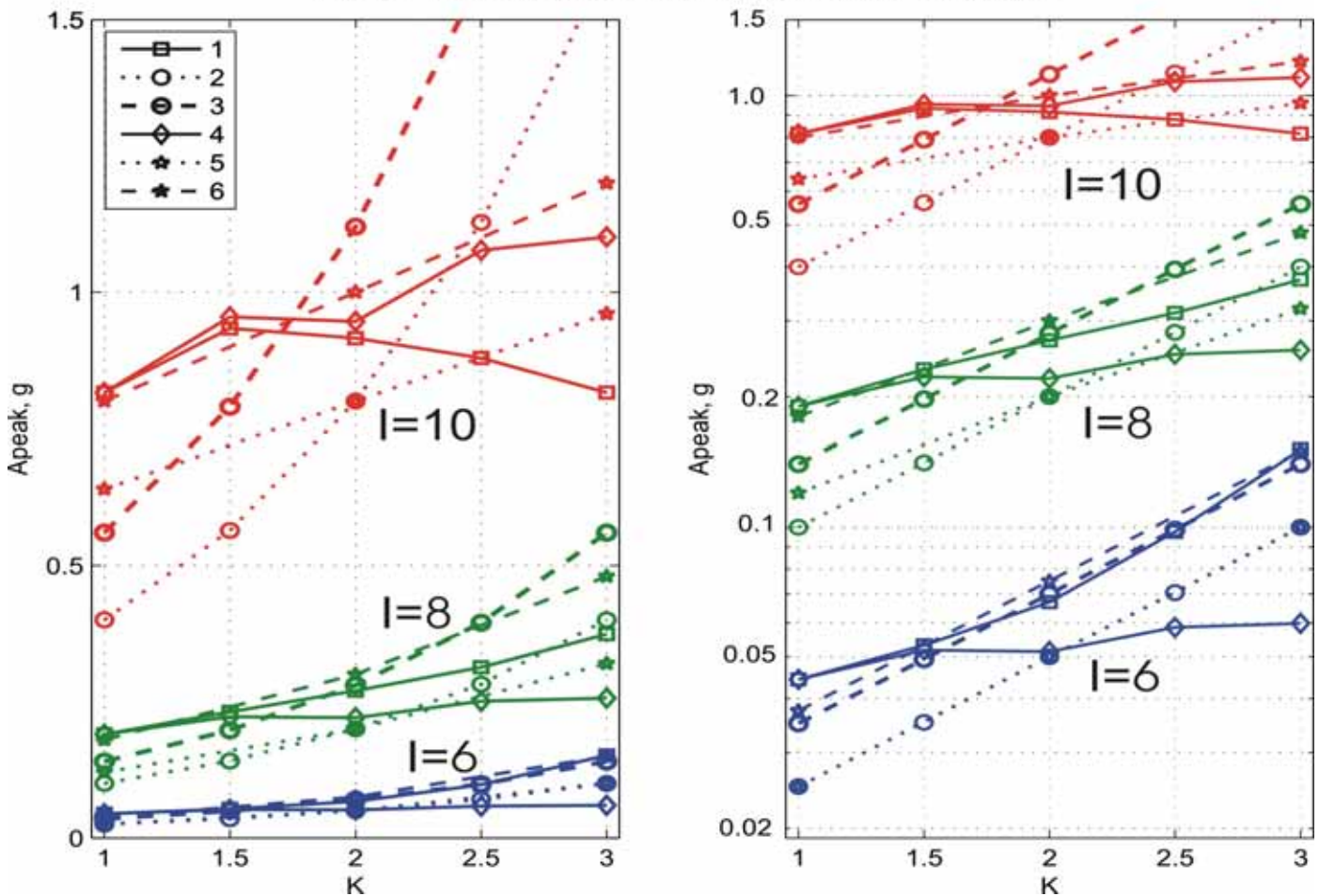


Рис.3. Зависимость пикового ускорения A от категории грунта для трех вариантов амплитуд сейсмической волны, соответствующих интенсивности $I=6, 8$ и 10 баллов на среднем ($K=2$) грунте. Предполагается, что для каждого из случаев $I=6, 8$ и 10 , распространяющаяся вверх сейсмическая волна, идентичная на коренных породах/скальных грунтах (случай $K=1$), наблюдается с различной амплитудой на поверхности различных колонок грунта с $K=[1, 1.5, 2.0, 2.5$ и $3.0]$. Обозначения

(1) Следуя нормам ИВС-2006 США. Для случаев $I=6, 8$ и 10 баллов на грунте с $K=2$, принято, что значения A равны, соответственно, $[0.044, 0.19, 0.82]$ g на скальном ($K=1$) грунте (при этом, $I=5, 7$ и 9 баллов на этом грунте)

(2,3) Согласно СНиП - II-7-81 с коэффициентами 1.0 и 1.5.

(4) Согласно Eurocode-8. Привязка как для ИВС-2006

(5,6) Согласно МСН-2002, для нижнего и верхнего варианта в табл. 2.5