



**А. С. АЛЕШИН**

главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

УДК 550.34

## О ГРУНТОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ

Недавно в России для сейсмического микрорайонирования был принят нормативный документ нового поколения СП 283.1325800.2016. В нем для описания связи свойств грунтов с параметрами сейсмических воздействий с помощью инструментальных характеристик, в частности спектров реакции, использованы грунтовые коэффициенты. Несмотря на то, что такой способ описания использован в целом ряде зарубежных норм (США, Еврокод, Казахстан и др.), для отечественных изыскателей это оказалось непривычным новшеством. В статье подробно описано как получены грунтовые коэффициенты и как ими пользоваться. Особое внимание уделено учету нелинейности связи параметров грунта и сейсмических воздействий.

**Ключевые слова:** сейсмическое микрорайонирование, сейсмические воздействия, спектр реакции, грунтовые коэффициенты, коэффициент динамичности, континуальность, моделирование, нелинейность, коэффициент редукации.

### Введение

Кажется, еще совсем недавно из уст многих ученых инженер-сейсмологов звучали упреки в отставании отечественных норм сейсмостойкого строительства от «передового уровня науки в развитых странах», заключающегося в сохранении макросейсмических представлений. И вот случилось, казалось, невероятное – в России приняты Своды Правил, в которых используются термины и методы инструментально-корреляционной теории детального сейсмического районирования и микрорайонирования (СМР) [1, 2]. В частности, для корректного учета инструментальных характеристик сейсмических записей предлагается использовать грунтовые коэффициенты. Тем более удивительными представляются раздающиеся на этом фоне голоса, что «включение данной методики в нормативный документ представляется недостаточно обо-

снованным и преждевременным» [3]. Справедливости ради следует отметить по этому поводу, что приоритет в этом деле принадлежит не отечественным ученым и потому странными выглядят выражения, подобные следующим: «идея соавтора СП об использовании при СМР грунтовых коэффициентов носит оригинальный характер, но, по нашему мнению, требует дополнительного обсуждения специалистами в области СМР». Что касается довода критиков о необходимости «дополнительного обсуждения», следует заметить, что идеи об использовании в СМР грунтовых коэффициентов неоднократно докладывались на многих конференциях, изложены в нескольких статьях [4,5] и книге [6].

Тем не менее, раз такое мнение существует, кажется необходимым высказаться по этому вопросу со всей определенностью еще раз.

### Представление сейсмических воздействий спектрами реакции

Для инженерных расчетов в практике сейсмического микрорайонирования уже давно принято использовать спектры реакции, которые представляют собой реакцию системы маятников с одной степенью свободы с одним и тем же затуханием, но различающихся периодом собственных колебаний. Такая система моделирует реакцию реально существующих сооружений. Инерционная сила, действующая во время сейсмического события на сооружение, равна произведению массы сооружения на величину ординаты графика спектра реакции. Правильное задание параметров сейсмического воздействия, с одной стороны, залог сейсмической безопасности, а с другой – обеспечивает разумное, без излишних подробностей, задание сейсмических усилий, что позволяет экономить средства без потери надежности.

Еще в 1997 году в США была опубликована серия карт, на которых вместо привычного значения пиковых максимальных ускорений отображались спектральные характери-

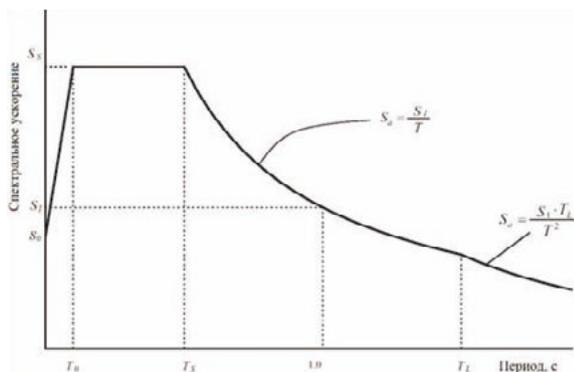


Рисунок 1 — Спектр реакции без учета грунтовых условий

ки сейсмических воздействий, а именно значения спектра реакции отдельно для высокочастотной и низкочастотной части диапазона периодов сейсмических колебаний, соответственно для периодов 0,2 с и 1,0 с. Такое разделение, несмотря на всю условность определения точного положения разделяющих их границы (0,2 или 0,3 с), соответствует зонам постоянства ускорений (высокочастотный диапазон) скоростей смещений (низкочастотный диапазон). Таким образом, для каждого пункта территории США были получены карты следующих параметров спектров реакции:  $S_S$  – спектра ускорения для периода 0,2 с,  $S_l$  – спектральной скорости на периоде 1 с и, кроме того,  $S_L$  – спектра на сверхнизких периодах  $T_L$ , что имеет значение для обеспечения сейсмической безопасности высотных зданий.

По названным трем параметрам можно построить полный график спектра реакции. Покажем на примере, как это делается.

Начнем с того, что на оси абсцисс наметим кардинальные точки, в которых вид спектральной плотности изменяется. Это точки  $0$ ,  $T_0$ ,  $T_S$  и  $T_L$ . Для определения первой и последней точек не требуется подробных пояснений:  $0$  – это точка нулевого периода, а значение  $T_L$  снимается с соответствующей карты. Значение  $T_S$  определяется выражением  $T_S = S_l / S_S$ . Обратим внимание на различие в размерностях  $S_l$  и  $S_S$ : первая величина  $S_l$  характеризует скорость смещений с размерностью см/с, во время как вторая –  $S_S$  относится к ускорениям с размерностью см/с<sup>2</sup>. Отношение обеих величин – размерная величина  $T_S$  с размерностью времени. Наконец, значение  $T_0$  определяется соотношением  $T_0 = 0,2 T_S$ .

Определим теперь ординаты графика. Спектральная плотность  $S_a$  определяет полку значений между  $T_0$  и  $T_S$ . Ордината на нулевом периоде  $S_0$  определяется соотношением  $S_0 = 0,4 S_S$ . График роста ускорений между нулевым периодом и периодом

$T_0$  определяется выражением  $S = 0,6 \cdot \frac{S_S}{T_0} \cdot T + 0,4 \cdot S_S$ . Далее на графике отмечается полка на уровне  $S_S$  в диапазоне периодов от  $T_0$  до  $T_S$ . Правый (низкочастотный) край полки соответствует значениям  $T = S_l / S_S$ . Наибольшее отношение величин  $S_l / S_S$ , снятых с соответствующих карт, не превышает 0,6. Значит ширина полки (по крайней мере для условий территории США) не превышает 0,5 с. График спектральной плотности

на интервале от  $T_S$  до  $T_L$  дается выражением  $S_a = \frac{S_l}{T}$ . В этом диапазоне периодов, чтобы получить постоянное ускорение, необходимо спектральную скорость делить на период  $T$ . При

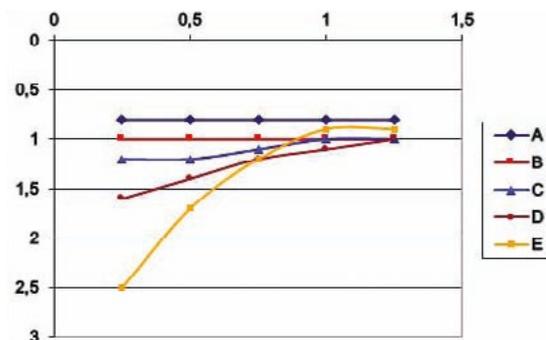


Рисунок 2 — Графики грунтовых коэффициентов, диапазон коротких периодов

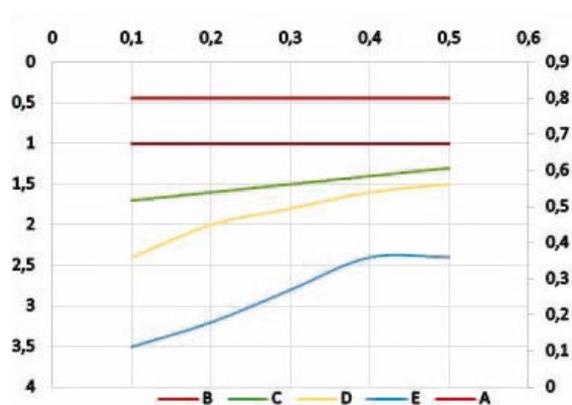


Рисунок 3 — Графики грунтовых коэффициентов, диапазон длинных периодов

периодах больших  $T_L$  в области с постоянным смещением, чтобы скомпенсировать падение ускорений, необходимо использовать выражение  $S_a = \frac{S_l}{T^2} T_L$ , т.е. делить спектральное смещение на  $T^2$ .

На рис. 1 приведен спектр реакции во всем диапазоне частот – от самых высоких, соответственно самых коротких периодов, до самых низких частот, и соответственно сверхдлинных периодов.

Наполним этот график численными (количественными) значениями, для большей конкретности попутно обращаясь к реалиям отечественных норм. Уровень ускорений на высоких частотах (нулевых периодах) определяется значением  $S_0$ . В отечественных нормах [7] это значение связано с сейсмической интенсивностью: 7 баллов – 0,1 g; 8 баллов – 0,2 g; 9 баллов – 0,4 g. Ускорения полки значений между  $T_0$  и  $T_S$  в 2,5 раза больше. Положения точек  $T_0$  и  $T_S$  в отечественных нормах в отличие от американских фиксированное.

Несмотря на отмеченные отличия, все же нельзя не признать, что отечественные и американские нормы (а следом за ними нормы многих зарубежных стран – Китай, Канада, Европейские страны и др.) в основном согласуются: графики спектров реакции включают участки постоянства ускорений и скоростей.

На графике рис. 1 не учтено влияние грунтовых условий. Описанию влияния грунтовых условий на параметры сейсмических воздействий посвящен следующий раздел.

**Таблица 1** — Коэффициенты грунтовых условий для короткопериодной части спектра  $F_a$

Класс грунта	Исходное спектральное ускорение				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1$	$S_s \geq 1,25$
<b>A</b>	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
<b>B</b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
<b>C</b>	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
<b>D</b>	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
<b>E</b>	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

**Таблица 2** — Коэффициенты грунтовых условий для длиннопериодной части спектра  $F_v$

Класс грунта	Исходное спектральное ускорение				
	$S_l \leq 0,1$	$S_l = 0,2$	$S_l = 0,3$	$S_l = 0,4$	$S_l \geq 0,5$
<b>A</b>	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
<b>B</b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
<b>C</b>	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
<b>D</b>	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
<b>E</b>	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4

**Грунтовые категории и коэффициенты**

Для учета влияния локальных свойств грунта на сейсмические воздействия в полученные значения спектральной плотности ускорений вносятся соответствующие грунтовые коэффициенты, представленные в таблицах 1 и 2. В графическом виде эти коэффициенты представлены на рис. 2 и 3.

С учетом этих поправок определяются спектры реакции, учитывающие как региональные, так и локальные грунтовые особенности сейсмических воздействий.

Подобно тому, как ранее был построен спектр реакции без учета грунтовых условий, построим теперь семейство графиков для различных категорий грунта. Для этого спектральную плотность низкочастотного диапазона  $S_0$  и высокочастотную составляющую спектра реакции  $S_s$  умножим на соответствующие коэффициенты из таблиц 1 и 2. Тогда для величины  $T^*s$  получим выражение  $T^*s = (S_r \cdot F_v / S_s \cdot F_a)$ . Выражение для  $T_0$  останется прежним:  $T_0 = 0,2 T^*s$ . Тем самым мы определили кардинальные точки на оси абсцисс.

Ординаты кардинальных точек целиком зависят от величины  $S_s \cdot F_a$ . Эта величина в нормах США определяет величину максимального ускорения. Наряду с этой величиной в нормах США используется также величина проектного ускорения (design spectral response), составляющего 2/3 от максимального. Ординаты полки на графике определяется выражением  $2/3 \cdot S_s \cdot F_a$ , где  $F_a$  берется различной зависимости от категории грунта из таблицы 1. Точки на оси ординат при  $T = 0$  для разных категорий грунтов определяются выражением  $S_0 = 0,4 \cdot (2/3 \cdot S_s \cdot F_a)$ . На периодах больших  $T_s$  спектральные ускорения уменьшаются по закону  $1/T$ . Графики ускорений спектров реакций  $S_0$  разных категорий грунта в абсолютных единицах (как

по периодам, так и по спектральному ускорению) приведены на рис. 4.

Из сказанного становится ясно, что основной вклад в параметры сейсмических воздействий вносят короткопериодные коэффициенты, влияющие на уровень спектра реакции. Длиннопериодные коэффициенты определяют положение правого конца полки. Из рис. 4 следует также, что никакие изменения свойств грунтовой толщи не в состоянии увеличить ширину полки более 0,6 с.

Теперь посмотрим, как в отечественных нормах учитывается влияние свойств грунта на форму спектров реакции. Это влияние иллюстрируется взятым из норматива [7] рис. 5, где приведен график коэффициента динамичности или спектра реакции, нормированного на величину ускорения  $A$  в зависимости от расчетной сейсмической интенсивности  $I$ .

Из графика рис. 5 определим точки на оси абсцисс  $T_0 = 0,1$ с;  $T_s = 0,4$  с для грунтов I и II категорий и  $T_s = 0,8$  с для грунтов III и IV категорий. Эта величина полки с постоянством ускорений (0,7 с) заметно превышает предел (0,5 с), определенный из американских норм, что требует объяснения. На периодах больших  $T_s$  ускорения уменьшаются по закону  $(T_s/T)^{0,5}$ , что также заметно отличается как от американских норм, так и значений, используемых в нормах СССР [СНиП II-7-81\*,1982]. Помимо отмеченных отличий в отечественных нормах не учитываются особенности на сверхнизких периодах.

**Как были получены грунтовые коэффициенты?**

Рассмотрим, как получены грунтовые коэффициенты, приведенные в американских нормах [NEHRP, 2003]. Вопрос этот подробно рассмотрен в работе [Power M., et al., 2004], матери-

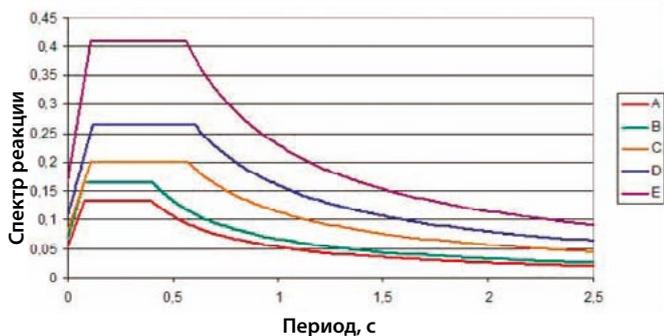


Рисунок 4 — Спектры реакции для различных категорий грунта

алами которой мы воспользуемся. В этой работе приведены сведения, полученные в основном из эмпирических данных обследования крупных землетрясений Запада США, а также результаты компьютерного моделирования [Silva et al., 2000].

Как видно из приведенного рис. 6, значения грунтовых коэффициентов, определенные различными авторами, варьируют в довольно широких пределах, что отражает как объективный фактор – различие параметров землетрясений и грунтов, так и является следствием субъективного фактора, проявляющегося в различии методов обработки данных. Поэтому кажется предпочтительным основываться на результатах компьютерного моделирования.

Они представлены данными [Silva et al., 2000] в виде моделирования двух различных природных условий: модели EPRI и модели Peninsular Range. Относительно грунтовых условий обоих случаев не известно ничего, кроме того, что площадка EPRI расположена в окрестности залива Сан-Франциско, а площадка Peninsular Range находится в эпицентральной зоне землетрясения Нортридж. Для этих двух площадок, исследованных по одинаковой методике, в большинстве случаев имеют место сравнительно небольшие различия в величинах грунтовых коэффициентов, которые вполне могут быть объяснены локальным различием свойств грунтов. Тем не менее и в этом случае имеет место факт довольно значительного расхождения в значениях грунтовых коэффициентов  $F_a$  для одного и того же грунтового класса D, что является дополнительным аргументом относительно недостаточности характеристики грунта с помощью грунтовых категорий.

Интересно сравнить значения грунтовых коэффициентов на основе измерений колебаний от землетрясения в Лома Приета, принятые в качестве нормативных [BSSC, 2003], с данными других источников. Очевидно, что нормативные значения грунтовых коэффициентов не являются средними по ансамблю значений. Сказанное обуславливает необходимость искать более надежное обоснование принятого величин грунтовых коэффициентов.

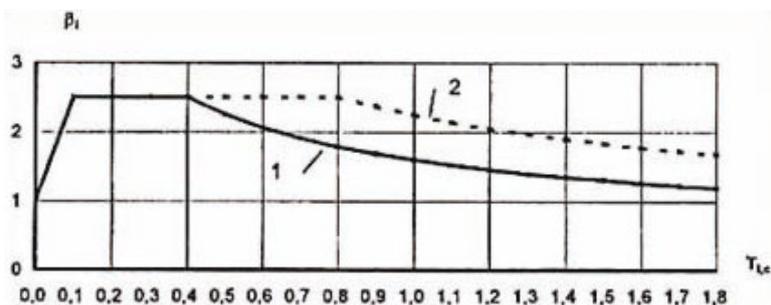


Рисунок 5 — Коэффициент динамичности, 1 – категории I и II, 2 – категории III и IV

### Континуальная теория

Обратим внимание на то, что как сейсмические воздействия, так и свойства грунта определены в табличной форме, т. е. дискретно, и переход из одной категории в другую сопровождается скачком. И если в отношении сейсмических воздействий непрерывность подтверждается картой, на которой параметры  $S_2$  и  $S_3$  приведены с любой степенью детальности (иными словами, непрерывно), то в отношении свойств грунтов прерывность свойств закреплена в форме грунтовых категорий. Между тем совершенно очевидно, что дискретная форма представления с использованием понятия грунтовых категорий противоречит природе свойств грунтов, непрерывных по своей сути. Использование постоянных грунтовых поправок, соответствующих определенной грунтовой категории, обуславливает скачкообразные изменения на границах категорий и соответствующие ошибки.

Постоянство значений грунтового коэффициента для всего диапазона свойств, характеризуемых грунтовой категорией, обуславливает нагружение среды воздействием, неадекватным свойствам среды. Поясним смысл сказанного иллюстрирующим примером, приведенным на рис. 7.

Непрерывная кривая нагрузки, показанная красным цветом, построена по экспериментальным данным, выделенным кружками. С учетом границ грунтовых категорий (обозначены вертикальными линиями) непрерывная кривая аппроксимирована ступенчатым графиком, выделенным синим цветом. Очевидно, что область грунтовой категории D состоит из двух участков,  $a$  и  $b$ . На участке  $a$  реальные сейсмические воздействия больше значения на ступенчатом графике, а на участке  $b$  меньше. Аналогичные замечания могут быть высказаны относительно других категорий. Таким образом, аппроксимация грунтовой поправки, которая непосредственно влияет на параметры сейсмических воздействий, ступенчатым законом несомненно является недостаточно точной и неадекватной.

Отметим также еще один недостаток названных работ по определению грунтовых коэффициентов – в качестве характеристики свойств грунтов рассматривается скорость поперечных волн. Следует заметить, что скорость поперечных волн, хотя и является важнейшей характеристикой сейсмических свойств грунтового массива, но это не единственная величина, определяющая сейсмические свойства грунта. Реакция грунта на сейсмические воздействия определяется также плотностью, точнее сейсмической жесткостью – произведением плотности на скорость поперечных волн. Будет уместно отметить, что именно эта величина фигурирует в

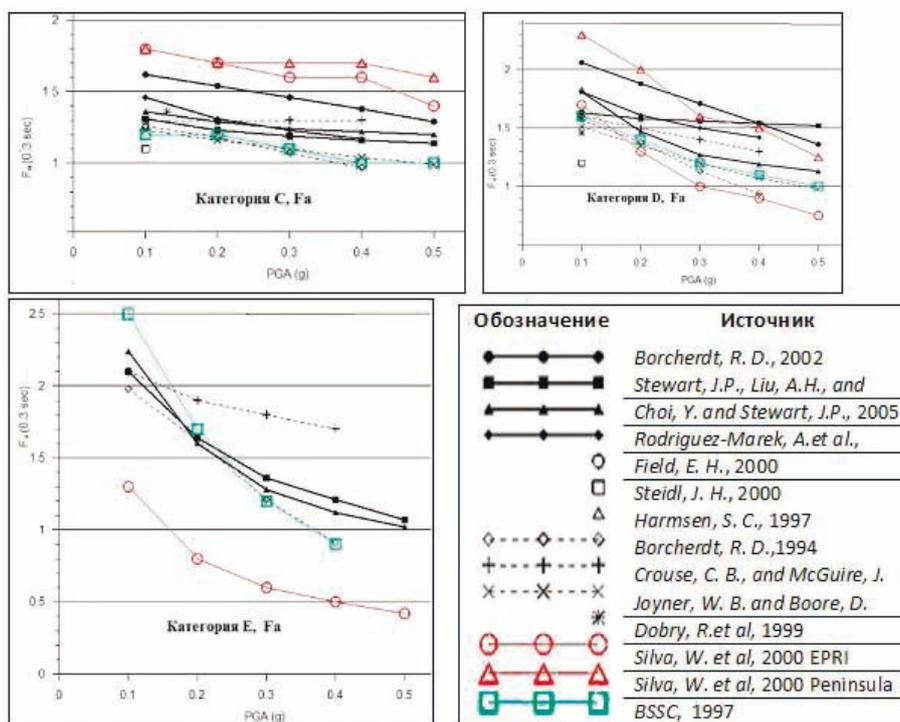


Рисунок 6 — Графики грунтовых коэффициентов по данным различных авторов (см. легенду)

Таблица 3 — Параметры моделей грунтовых коэффициентов

Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5
$V_s = 100$ м/с	$V_s = 270$ м/с	$V_s = 580$ м/с	$V_s = 1000$ м/с	$V_s = 1700$ м/с
$\rho = 1,5$ т/м <sup>3</sup>	$\rho = 1,7$ т/м <sup>3</sup>	$\rho = 1,9$ т/м <sup>3</sup>	$\rho = 2,2$ т/м <sup>3</sup>	$\rho = 2,4$ т/м <sup>3</sup>
R = 150	R = 460	R = 1100	R = 2200	R = 4080
$F_a = 2,8$	$F_a = 1,7$	$F_a = 1,25$	$F_a = 1$	$F_a = 1$

качестве главной количественной характеристики свойств грунта в таблице 1 норматива [7].

Все сказанное выше об определении грунтовых коэффициентов: эмпирические данные в основе принятия нормативных значений, недостаточность характеристики грунтов величиной только скорости поперечных волн – заставило автора настоящей работы провести собственное компьютерное моделирование влияния свойств грунта, представленных сейсмической жесткостью, на параметры сейсмических воздействий в виде грунтовых коэффициентов.

Модель представляла собой 30-метровый слой грунта, различающийся по величине сейсмической жесткости, лежащий на скальном основании. Параметры моделей и результаты моделирования (грунтовые коэффициенты  $F_a$ ) представлены в таблице 3.

Здесь  $R$  [т · м<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>] – сейсмическая жесткость.

Результаты моделирования в виде семейства графиков коэффициентов динамичности представлены на рис. 8. Нормирование максимумов коэффициентов динамичности на значение  $F_a = 1,9$  для модели 4 дает величину грунтовых коэффициентов, приведенную в нижней строке таблицы 3.

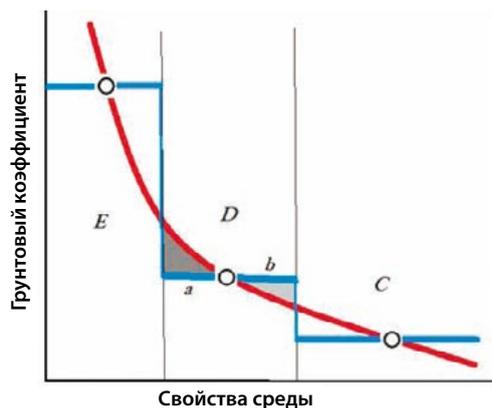
Использование сейсмических жесткостей в качестве единственного параметра, характеризующего свойства грунтового массива, позволяет перейти к принципиально новому описанию взаимосвязи свойств грунта и параме-

тров сейсмических воздействий с использованием непрерывных (не дискретных) величин. В отношении сейсмических воздействий это уже используется в американских нормах, в которых вместо балла сейсмические воздействия описываются инструментальными величинами, например, ускорениями. Но использование сейсмических жесткостей позволяет описывать свойства грунтового массива также непрерывным способом. На рис. 9 приведены графики связи величин грунтовых коэффициентов  $F_a$  и  $F_v$  с сейсмической жесткостью  $R$ .

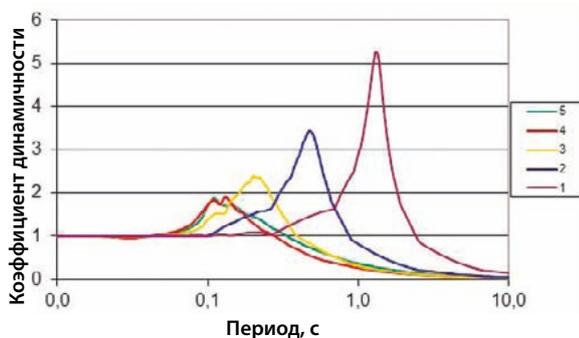
Очевидно, что определенные нами модельные значения грунтовых коэффициентов близки к величинам  $F_a$  и  $F_v$  из американских норм [8].

Итак, наша цель достигнута: мы получили непрерывную зависимость грунтовых коэффициентов от величины сейсмической жесткости без использования категорий грунтов. Понятно, однако, желание выразить эту зависимость в аналитическом виде, в виде формулы.

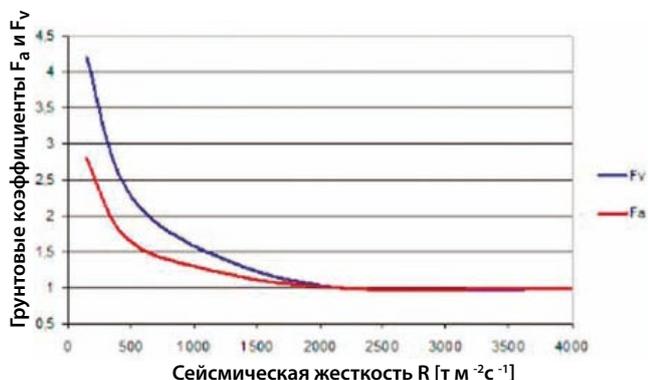
Логарифмируя зависимость  $F_a$  от  $R$ , можно получить выражение  $\lg F_a = -0,34 \lg R + 1,1$ . Аналогичным способом можно получить выражение для связи низкочастотных грунтовых коэффициентов  $F_v$ :  $\lg F_v = -0,52 \lg R + 1,75$ . В обоих выражениях размерность сейсмической жесткости  $R$  [т · м<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>]. Графики полученных зависимостей приведены на рис.10.



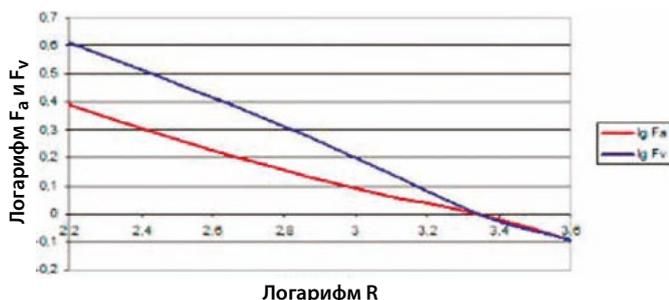
**Рисунок 7** — Неадекватная аппроксимация зависимости грунтовых коэффициентов от свойств среды ступенчатым графиком



**Рисунок 8** — Коэффициенты динамичности для моделей 1-5



**Рисунок 9** — Графики зависимости грунтовых коэффициентов  $F_a$  и  $F_v$  от сейсмической жесткости  $R$



**Рисунок 10** — Зависимости  $\lg F_a$  и  $\lg F_v$  от  $\lg R$

С помощью этих выражений по величине сейсмической жесткости можно получить значение грунтовых коэффициентов для высокочастотной и низкочастотной области спектра сейсмических колебаний. Для определения величины грунтовых коэффициентов достаточно знать сейсмическую жесткость верхней части грунта. Тем самым использование понятия категории становится излишним. Непрерывные свойства сейсмической среды адекватно описываются непрерывной величиной – сейсмической жесткостью. При этом обе величины, характеризующие свойства среды и параметры сейсмических воздействий, связаны простыми соотношениями.

Остается проверить возможность использования предложенных соотношений. Без ограничения общности предположим, что сейсмическая жесткость 30-метровой толщи грунта оценивается величиной  $R = 700 \text{ тм}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Тогда, подставив в выражение для  $F_a$  значение сейсмической жесткости  $700 \text{ тм}^{-2}\text{с}^{-1}$ , получим  $F_a = 1,36$ . Точно также для  $F_v$  получим оценку  $F_v = 1,86$ . Тогда для значения  $T^*$  имеем оценку  $T^* = (0,1 \cdot 1,86 / 0,25 \cdot 1,36) = 0,55 \text{ с}$ , а для  $T_0 = 0,11 \text{ с}$ . Ординаты графика спектра реакции  $S_s = 0,25 \cdot 1,36 = 0,34$ , а  $S_0 = 0,4 \cdot 0,34 = 0,14$ . По этим точкам построим график спектра реакции, приведенный на рис. 11.

Сейсмическая жесткость «среднего» (референтного) грунта устанавливает «отсчетную единицу», относительно которой определяются грунтовые поправки, причем, непрерывно в зависимости от сейсмических свойств грунтовой толщи. В нормативе [2] предложено в качестве параметра референтного грунта взять значение сейсмической жесткости  $\rho V_s = 2000 \text{ тм}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Этим исключается влияние нелинейной реакции рыхлых грунтов на достаточно сильные сейсмические воздействия. Заметим также, что это значение сейсмической жесткости соответствует категории В американских норм. Еще раз отметим, что полученные значения коэффициентов  $F_a$  и  $F_v$  характеризуют сейсмические процессы в линейной области зависимости напряжений от деформаций.

### Нелинейность и грунтовые коэффициенты

Приведенные выше рассуждения относились к линейным процессам в грунтах. Между тем, при сильных сейсмических воздействиях необходимо учитывать нелинейные свойства дисперсных грунтов. Применительно к грунтовым коэффициентам нелинейность проявляется в виде снижения их величины при возрастании исходной сейсмической интенсивности. Особенно ярко это проявляется для короткопериодных коэффициентов, что видно из таблицы 1: при  $S_s > 0,25$  г рост значений коэффициентов  $F_a$ , а с ними ускорений на рыхлых грунтах замедляется. При  $S_s \approx 1$  г ускорения практически не растут, а в ряде случаев (например, для грунтов с низкой сейсмической жесткостью, категории Е) даже становятся меньшими ускорений на скальном грунте.

В контексте этой статьи следует коснуться вопроса о возможности учета нелинейных свойств грунта непрерывной зависимостью. То, что нелинейные свойства грунтов в программе NERA описываются дискретным набором типовых моделей [Bardet J.P. and Tobita T.], сделано исключительно в целях удобства и не является принципиальным моментом. Нелинейные свойства рыхлых грунтов контролируются величиной эталонной деформации, зависящей от прочности

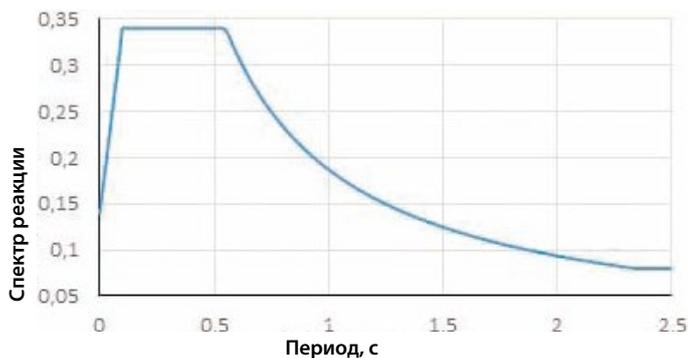


Рисунок 11 — Спектр реакции модельного примера

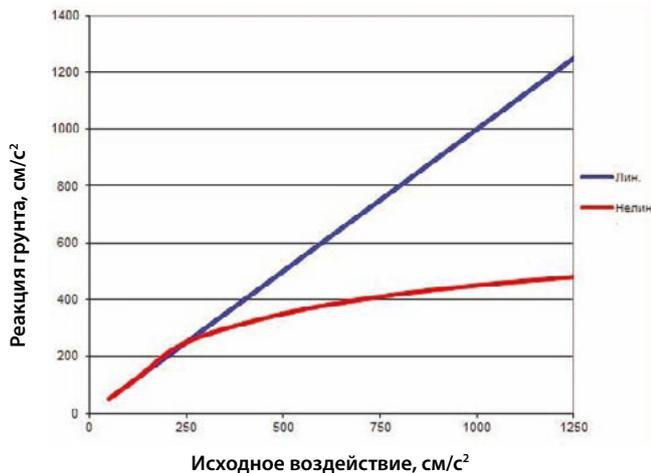


Рисунок 12 — Линейная и нелинейная реакция грунта

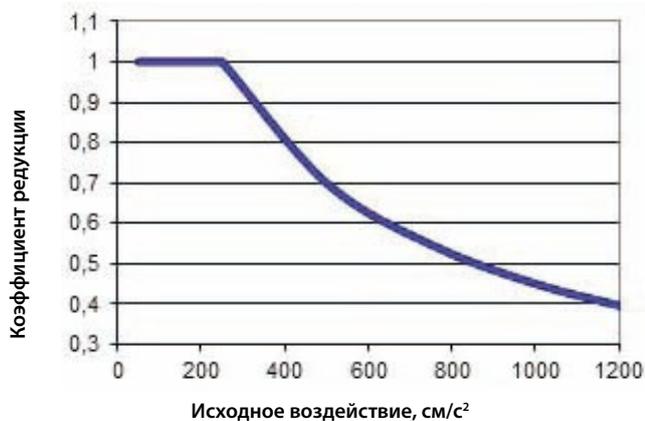


Рисунок 13 — График коэффициента редукции при  $R = 200 \text{ тм}^2\text{с}^{-1}$

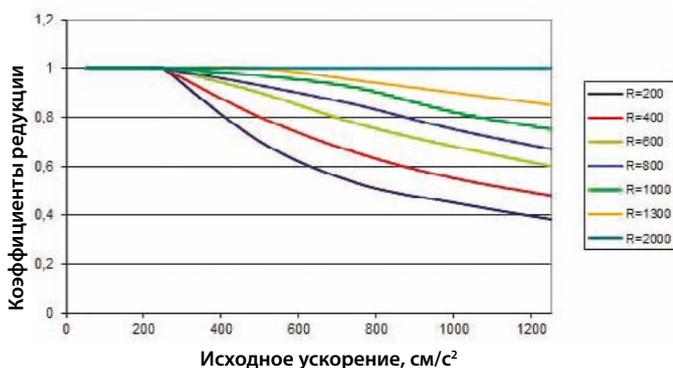


Рисунок 14 — Семейство коэффициентов редукции

грунта и его упругого модуля [Ишихара, 2006]. И то, и другое являются непрерывными функциями свойств грунта, следовательно, и нелинейные свойства грунта могут быть связаны непрерывными соотношениями с деформациями.

Мерой нелинейности в данном случае может быть коэффициент отклонения от линейности  $K$  (иногда этот коэффициент называют коэффициентом редукции [Симборт Э.]), представляющий отношение реального напряжения в грунте к напряжению, которое было бы достигнуто, если бы грунт был идеально упругим.

На рис. 12 показано различие между линейной и реальной нагрузочной характеристиками грунта. На следующем рис.13 показан график зависимости коэффициента редукции  $K = f_n/f_l$ , построенный для значения сейсмической жесткости  $R = 200 \text{ [т м}^2\text{с}^{-1}\text{]}$ .

Если теперь построить такие же графики для ряда других значений  $R$ , то получим семейство графиков коэффициентов редукции  $K$ , приведенное на рис. 14. Поскольку вариации коэффициентов редукции при достаточно больших уровнях исходных воздействий сравнительно невелики, имеет смысл представить полученный результат в виде таблицы 4, в которой по строкам приведены данные с одной и той же сейсмической жесткостью  $R$ , а в столбцах значения  $K$  при одной и той же амплитуде исходных воздействий.

Таким образом, показано, как зная сейсмическую жесткость грунтового массива и амплитуду исходных сейсмических воздействий – непрерывно распределенные в пространстве величины – можно определить любое значение коэффициента  $K$  в пространстве заданных параметров и по нему рассчитать значение грунтовых коэффициентов при любом уровне сейсмических воздействий.

**Заключение**

Внедрение в практику инженерно-сейсмологических исследований описания сейсмических воздействий инструментальными характеристиками настоятельно требует для учета влияния особенностей строения и характеристик верхней части геологического разреза использования грунтовых коэффициентов. В статье показано, что грунтовые коэффициенты, по крайней мере в области линейных представлений могут быть однозначно описаны через единственный параметр грунта – среднюю сейсмическую жесткость 30-метровой толщи, слагающей верхнюю часть разреза. Выведены простые соотношения, позволяющие по параметрам грунтовой модели определить спектры реакции грунтов на сейсмические воздействия. С помощью грунтовых коэффициентов можно построить спектр реакции грунтовой модели и рассчитать необходимые характеристики сейсмических воздействий. В области нелинейной связи свойств грунтовой модели и параметров сейсмических воздействий предлагается воспользоваться коэффициентами редукции.

Отмеченная с ростом уровня исходных воздействий нивелировка значений грунтовых коэффициентов за счет нелинейных процессов указывает на необходимость поисков иных критериев сейсмостойкости, например, учитывающих снижение несущей способности грунтов. Развитие способов учета отмеченных эффектов снижения несущей способности грунтов – дело дальнейших исследований.

## Литература

1. СП 286.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования.
2. СП 283.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования.
3. Рецензия на проект (Вторая редакция) свода правил СПXXX.1325800.2017. «Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования».
4. Алешин А.С. Основные понятия сейсмического микрорайонирования: категория, балл, модель // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. №5. С.9-13.
5. Алешин А.С. Основы континуальной теории сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 5. С. 18-26.
6. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир, 2017. 300 с.
7. СП 14.13330.2014. Свод правил. Строительство в сейсмических районах. М., 2014.
8. BSSC (BUILDING SEISMIC SAFETY COUNCIL). 2003: NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (Report FEMA 450), Washington, D.C., 356 p.
9. СНиП II-7-81\* - Строительство в сейсмических районах. М., 1982. 48 с.
10. Power M., Borchardt R., Stewart J. Site amplification factors from empirical studies//NGA Working Group #5. September, 2004.
11. Silva, W., Darragh, R., Gregor, N., Martin, G., Abrahamson, N., and Kircher, C., 2000, Reassessment of site coefficients and near-fault factors for building code provisions, USGS NEHRP program report 98-HQ-GR-1010.
12. Bardet J.P., Tobita T. NERA. F Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, April, 2001. P. 44.
13. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. С-Пб., 2006. 192 с.
14. Симборт Э. Определение коэффициента редукиции с учетом динамических воздействий: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. С-Пб., 2012.

Материалы хранятся по адресу:  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
г. Москва, Россия

**ALESHIN A., Chief researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, DSc (Doctor of Science in Physics and Mathematics)**

## ON SITE COEFFICIENTS

### Abstract

Introduction into practice of engineering-seismological researches of the description of seismic impacts by instrumental characteristics demands use of site coefficients for the account of influence of structure features and characteristics of the top part of a geological section. The article shows that the site coefficients, at least in the field of linear representations, can be uniquely describe through a single parameter of the soils – the average seismic rigidity of the 30-meter thickness composing the upper part of the cut. Simple relations al-

lowing determining the response spectrum of soil by parameters of the soil model are deriving. By means of site coefficients, it is possible to construct a response spectrum of a soil model and to calculate necessary characteristics of seismic impacts. In the field of nonlinear coupling of soil model properties and seismic effects parameters, it is proposing to use reduction coefficients.

**Keywords:** seismic microzonation, seismic impacts, response spectrum, seismic rigidity, site coefficient, modeling, continuity, nonlinearity, reduction coefficient.

### References

1. SP 286.1325800.2016. Ob'ekty stroitel'nye povyshennoi otvetstvennosti. Pravila detal'nogo seismicheskogo raionorovaniia. (In Russian).
2. SP 283.1325800.2016. Ob'ekty stroitel'nye povyshennoi otvetstvennosti. Pravila detal'nogo seismicheskogo raionorovaniia. (In Russian).
3. Retsenziia na proekt (Vtoraia redaktsiia) svoda pravil SPXXX.1325800.2017. "Detal'noe seismicheskoe raionorovanie i seismomikroraionirovanie dlia territorial'nogo planirovaniia". (In Russian).
4. Aleshin A.S. Osnovnye poniatii seismicheskogo mikroraionirovaniia: kategoriia, ball, model' [The Basic Definitions of the Seismic Microzonation: Category, Intensity Value, Model]. *Seismostoi'koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2013.No.5. Pp.9-13. (In Russian).
5. Aleshin A.S. Osnovy kontinual'noi teorii seismicheskogo mikroraionirovaniia [Fundamentals of Continuum Theory of Seismic Microzonation] *Seismostoi'koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2015.No.5. Pp.18-26. (In Russian).
6. Aleshin A.S. Kontinual'naia teoriia seismicheskogo mikroraionirovaniia [The Continuum Theory of Seismic Microzonation]. Moskva, Nauchnyi mir, 2017. 300 s. (In Russian).
7. SP 14.13330. 2014. Svod pravil. Stroitel'stvo v seismicheskikh raionah. M., 2014. (In Russian).
8. BSSC (BUILDING SEISMIC SAFETY COUNCIL). 2003: NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency (Report FEMA 450), Washington, D.C., 356 p.
9. SNiP II-7-81\* - *Stroitel'stvo v seismicheskikh raionah*. M., 1982. 48 s. (In Russian).
10. Power M., Borchardt R., Stewart J. Site amplification factors from empirical studies//NGA Working Group #5. September, 2004.
11. Silva, W., Darragh, R., Gregor, N., Martin, G., Abrahamson, N., and Kircher, C., 2000, Reassessment of site coefficients and near-fault factors for building code provisions, USGS NEHRP program report 98-HQ-GR-1010.
12. Bardet J.P., Tobita T. NERA. F Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, April, 2001. P. 44.
14. Ishihara K. Povedenie gruntov pri zemletriase-niiah. S-Pb., 2006. 192 s. (In Russian).
14. Simbort E. Opredelenie koeffitsienta reduksiis s uchetom dinamicheskikh vazdeistvii: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tehnikeskikh nauk. S-Pb., 2012. (In Russian).

**Для цитирования:** Алешин А.С. О грунтовых коэффициентах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 2. С. 6-13.

**For citation:** Aleshin A.S. On site coefficients. *Seismostoi'koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 2, pp. 6-13. (In Russian)