



**А.С. АЛЕШИН**

главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

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

УДК 550.34

## О СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ГРУНТОВОЙ ТОЛЩИ

*Нормативная база сейсмического микрорайонирования России недавно пополнилась целым рядом документов нового поколения. В частности, был принят документ СП 283.1325800.2016. В нем для описания спектральных характеристик грунтовой толщи была использована величина максимума коэффициента динамичности  $b$ . Рамки нормативного документа не позволяли подробно описать способ получения и особенности использования этого параметра, в силу чего для изыскателей это оказалось непривычным новшеством. В статье подробно описано, как получена эта величина и как ею пользоваться. Особое внимание уделено учету нелинейности связи параметров грунта и сейсмических воздействий.*

**Ключевые слова:** сейсмическое микрорайонирование, сейсмические воздействия, грунтовая толща, спектр реакции, коэффициент динамичности, моделирование, нелинейные свойства.

### Введение

Внедрение в практику сейсмического микрорайонирования (СМР) новых идей и представлений оказалось сопряжено с этапом непонимания и неприятия. Старые, привычные представления кажутся априорно установленными, а их слом – недопустимым новаторством. Они понятны, с ними сжились, кажется, они были всегда... Для принятия нового требуется время, требуются усилия и доводы. Перед выходом в свет нормативного документа [1] основные идеи, входящие в него, уже были опубликованы в ряде статей [2-4] и докладов, что можно было рассматривать в качестве подготовительной работы, но, видимо, этого оказалось недостаточно, и новые понятия упомянутого документа были частью ученых восприняты «в штыки», вызвали прямую и

скрытую полемику. Автор не склонен все неприятие отнести за счет косности оппонентов. Возможно, и автору надо было найти более убедительные аргументы, не спешить с окончательными выводами. Но обстоятельства и время не предоставляли такой возможности. Теперь такая возможность появилась, и можно снова вернуться к изложению «новых» понятий и представлений.

По поводу грунтовых коэффициентов уже опубликована соответствующая «разъяснительная» работа [5]. Теперь пришла пора подробно разобраться со спектральными характеристиками грунтовых толщ. В основе настоящей статьи лежит методика компьютерного моделирования прямой задачи сейсмического микрорайонирования (СМР): по заданным параметрам грунтовой толщи построить реакцию сейсмического волнового поля на особенности грунтового массива. Такой способ решения многих проблем СМР представляется автору предпочтительным в сравнении с ранее используемым макросейсмическим подходом, как во временном отношении – не надо ждать очередного сильного землетрясения, так и в возможности использования результатов моделирования в интерактивном режиме. Разумеется, при этом не отвергается постулат, что окончательная проверка выводов моделирования (как вообще любого метода СМР) остается за материалами макросейсмического обследования последствий сильного землетрясения [6].

### Теоретические основы

Основная особенность методики моделирования заключается в выборе в качестве зондирующего воздействия короткого импульса, длительность которого определяется величиной  $\Delta\tau$  – временного интервала между равномерно расположенными точками отсчета акселерограммы, описывающей входное движение грунта.

Как известно [7], откликом линейной системы (в том числе и системы слоев грунта) на единичный импульс является импульсная реакция, спектр которой есть частотная характеристика системы. Преимуществом такого способа исследования частотных характеристик грунтового массива является то, что в данном случае спектр входного (возбуждающего) воздействия точно известен: в частотной характеристике короткого входного импульса длительности  $\tau$  присутствуют «все частоты» от нуля вплоть до частоты  $f = 1/\tau$ .

Действительно, рассмотрим короткий импульс, начинающийся при  $t = 0$  и заканчивающийся при  $t = \tau$ . Внутри интервала  $0 < t < \tau$  функция, описывающая форму импульса, положительна и обозначена через  $x(t)$ , а вне отмеченного выше интервала тождественно равна нулю. Спектр такого импульса выражается формулой

$$S(\omega) = \int_0^{\tau} x(t)e^{-j\omega t} dt,$$

Положим, что длительность импульса  $\tau$  очень мала, так что экспоненциальный множитель в подынтегральном выражении, принимающий значения от 1 до  $e^{-j\omega\tau}$ , можно приближенно считать равным единице. Тогда приведенное выше выражение можно записать как

$$S(\omega) \cong \int_0^{\tau} x(t) dt = q,$$

где через  $q$  обозначена площадь импульса. Получается, что короткий импульс имеет равномерный спектр, не зависящий от вида функции  $x(t)$ . Приведенное выше допущение  $e^{-j\omega\tau} \cong 1$  справедливо при  $\omega\tau \ll 1$ . Следовательно, спектральная плотность  $S(\omega)$  остается постоянной вплоть до частот, сравнимых по порядку величины с  $1/\tau$ . При этих частотах спектральная плотность  $S(\omega)$  начинает убывать. Таким образом, при длительности импульса  $\tau = 0,02$  с ширина спектра возбуждающего импульса имеет порядок 50 Гц, иными словами, полностью перекрывает полосу диапазона частот инженерной сейсмологии. Итак, в спектре входного импульса представлены все частоты инженерного диапазона. Отсюда следует вывод, что реакция системы грунтовых слоев на короткий импульс должна представлять спектр реакции. Нормированный на значение в «нулевом» периоде (практически на значение при минимальном

периоде) спектра реакции есть по определению коэффициент динамичности.

В настоящей работе моделировалась прямая задача сейсмического микрорайонирования. Определялись резонансные свойства рыхлого однородного слоя толщины  $h$ , лежащего на плоской поверхности жесткого полупространства при нормальном падении волны сдвигового типа. Параметры модели задаются семью величинами: скоростями и константами поглощения поперечных волн, и плотностями слоя  $(V_1, \theta_1, \rho_1)$  и полупространства  $(V_0, \theta_0, \rho_0)$  и мощностью слоя  $h$ . Параметры рыхлого слоя традиционно принято определять при инженерных изысканиях с помощью либо инженерно-геологических, либо сейсморазведочных исследований.

Еще одно важное замечание следует сделать в связи с линейностью спектра реакции относительно входного воздействия: увеличение амплитуды входного воздействия в  $k$  раз означает точно такое же увеличение амплитуды спектра реакции. При этом вид коэффициентов динамичности не изменяется. Сказанное иллюстрируется рис. 1, где представлены: а) спектры реакции на две амплитуды ускорений 0,1 g и 0,2 g и б) коэффициенты динамичности при тех же воздействиях. Очевидно разница в форме двух графиков: амплитуды спектров реакции различаются точно в два раза, в то время как графики коэффициентов динамичности полностью сливаются, что является следствием нормировки.

Если влияние грунтовых условий сводится к умножению каждого значения спектра реакции на постоянное значение, это означает, что частотная характеристика слоя грунта постоянна и действие ее на входной сейсмический сигнал подобно действию неискажающего фильтра. При этом коэффициент динамичности не изменяется. Только амплитудно-искажающая фильтрация грунтового массива существенна при исследовании влияния грунтовой толщи на сейсмический сигнал. Тем самым влияние грунтовых условий на параметры спектра реакции может быть корректно определено с помощью коэффициента динамичности.

### Нормативные графики коэффициентов динамичности

Прежде чем рассмотреть результаты компьютерного мо-

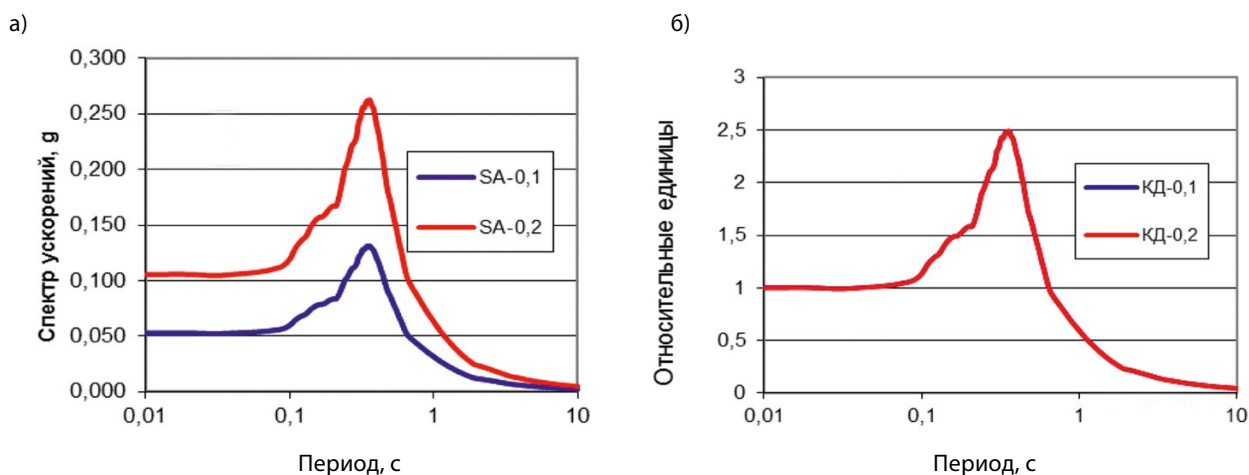


Рисунок 1 — Спектры реакции (а) и коэффициенты динамичности (б) при различных амплитудах воздействий

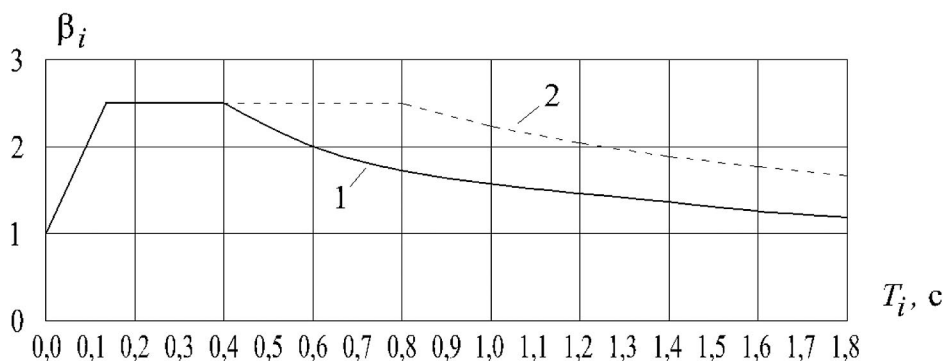


Рисунок 2 — Графики коэффициентов динамичности из [8]

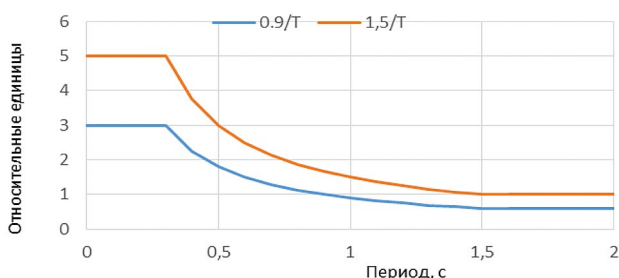


Рисунок 3 — Коэффициенты динамичности для двух типов сооружений

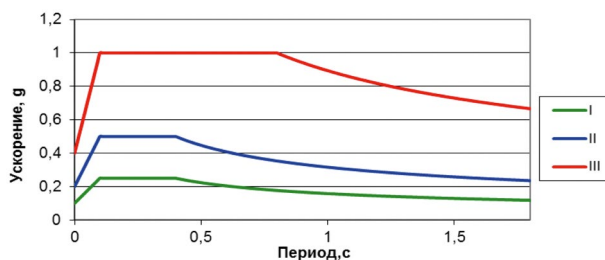


Рисунок 4 — Спектры реакции грунтовых категорий I – III из российских норм [8]

делирования рассмотрим нормативные способы и представления коэффициентов динамичности как в нынешнем документе [8], так и в более ранних его редакциях [9, 10], а также в зарубежных нормативных документах [11, 12]. Во всех перечисленных нормативных документах значение коэффициента динамичности фиксировано для всех грунтов, относящихся к одной определенной грунтовой категории. Вид графика коэффициента динамичности из действующих российских норм приведен на рис. 2.

Для грунтов категорий I и II по сейсмическим свойствам (кривая 1) при:

$$\begin{aligned} T_i \leq 0,1 \text{ с } \beta_i &= 1 + 15 T_i; \\ 0,1 \text{ с } < T_i < 0,4 \text{ с } \beta_i &= 2,5; \\ T_i \geq 0,4 \text{ с } \beta_i &= 2,5(0,4 / T_i)^{0,5}; \end{aligned} \quad (3)$$

Для грунтов категорий III и IV по сейсмическим свойствам (кривая 2) при:

$$\begin{aligned} T_i \leq 0,1 \text{ с } \beta_i &= 1 + 15 T_i; \\ 0,1 \text{ с } < T_i < 0,8 \text{ с } \beta_i &= 2,5; \\ T_i \geq 0,8 \text{ с } \beta_i &= 2,5(0,8 / T_i)^{0,5}. \end{aligned} \quad (4)$$

Во всех случаях значения  $\beta_i$  должны приниматься не менее 0,8.

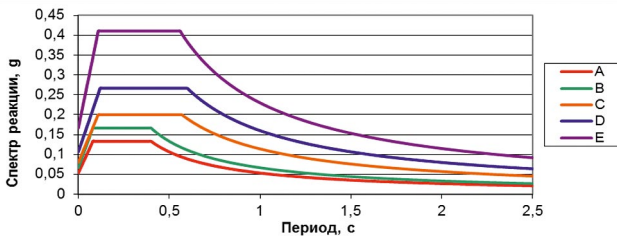
Относительно способа получения графиков коэффициентов динамичности в специальной литературе имеются весьма скудные сведения. Лишь в книге [13] приведено достаточно подробное описание порядка определения величины коэффициента динамичности в зависимости от параметров системы, в данном случае – для систем разных типов сооружений. На рис. 3 приведены два графика коэффициен-

та динамичности, соответственно для зданий промышленного и гражданского типа с законом изменения  $\beta = 0,9/T$ , где  $0,6 \leq \beta \leq 3$  и сооружений, обладающих малым затуханием, например, конструкций типа дымовых труб, мачт, башен и подобных сооружений, работающих в основном на изгиб. В этом случае значения  $\beta$  возрастут, и график нового коэффициента динамичности будет подобен предыдущему, но ординаты его примут несколько большие значения, а именно  $\beta = 1,5/T$ , где  $1 \leq \beta \leq 5$ .

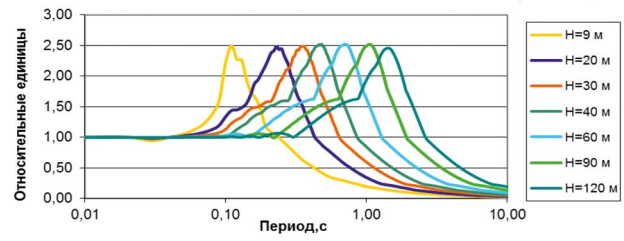
Понятно, что вид коэффициентов динамичности помимо типов сооружений зависит также от свойств грунтовой толщи. Отчасти это нашло отражение в виде рассмотренных ранее графиков коэффициента динамичности для двух типов грунтов: соответственно для категорий I и II – кривая 1 и категорий III и IV – кривая 2. Приведенные на рис. 2 графики нормативных зависимостей  $\beta_i$  лишь частично учитывают возможные эффекты, связанные с влиянием свойств грунтовой толщи на параметры сейсмических колебаний.

Помимо коэффициента динамичности сейсмические нагрузки в российских сейсмических нормах зависят от величины  $A$  – величины ускорения в уровне основания, принимаемой равной 1,0; 2,0; 4,0 м/с<sup>2</sup> для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов соответственно. Произведение коэффициента динамичности  $\beta$  на  $A$  есть спектр реакции. На рис. 4 приведены спектры реакции для грунтов категории I, II и III при исходном воздействии уровня 0,2 g (VIII баллов).

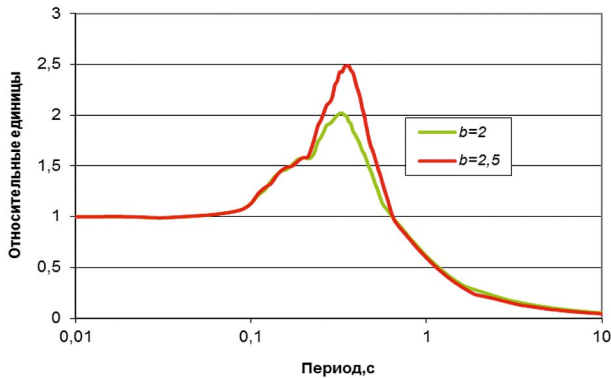
Аналогичные по смыслу графики из норм США приведены на рис. 5. При принципиальном сходстве обоих графиков представляет интерес анализ различий в отечественных и американских способах задания сейсмических нагрузок. На обоих графиках отмечается полка максимальных ускорений,



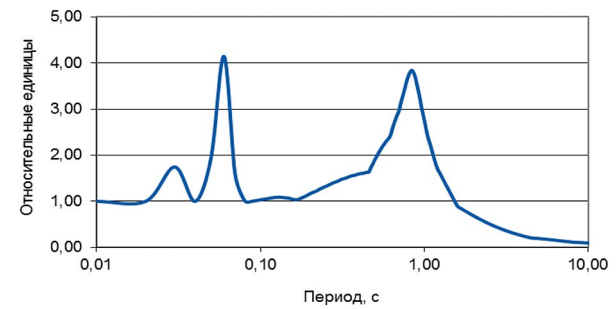
**Рисунок 5** — Спектры реакции из норм США [11]



**Рисунок 6** — Семейство графиков коэффициентов динамичности



**Рисунок 7** — Расчетные коэффициенты динамичности при различных соотношениях слоя и полупространства



**Рисунок 8** — График коэффициента динамичности модели грунтов Ленинкакана

но ширина полки не постоянна, а определяется категорией по сейсмическим свойствам грунтов. В российских нормах ширина полки одинакова для категорий грунтов I и II и несколько меняется для категорий III и IV. В американских нормах ширина полки одинакова для категорий грунтов A и B, а также одинакова для C и D, но заметно отличается для обеих отмеченных категорий. Подчеркнем, что американские категории A и B соответствуют российской категории I, а свойства грунтов категорий C и D соответствуют российской категории II «средних» грунтов. Понятно, почему эти категории в американских нормах совпадают, но непонятно почему в отечественных нормах ширина полки для категорий I и II одна и та же.

Попробуем разобраться в вопросе, как образуется полка, столь характерная в представлениях нормативных графиков коэффициента динамичности. Нормативный график представляет собой огибающую всех графиков, относящихся к определенной грунтовой категории, но различающихся как мощностями верхнего рыхлого слоя, так и параметрами слоя, не выходящими за рамки грунтовых категорий, но допускающих в рамках определенной категории довольно значительные вариации. Моделирование этого случая иллюстрируется рис. 6, на котором приведено семейство графиков коэффициентов динамичности при различной мощности рыхлого слоя, но с неизменными параметрами слоя и подстилающего полупространства – с теми же, что приведены выше для модели, представленной графиком рис. 2. Очевидно, что огибающая семейства полученных графиков будет иметь достаточно протяженную полку.

### Спектральные характеристики грунтовой толщи

Выше мы описали технику компьютерного моделирования

влияния спектральных характеристик грунтовой толщи на параметры сейсмического воздействия. Теперь пришло время показать и обсудить полученные результаты. На рис. 7 приведен вид спектра реакции и коэффициента динамичности для простейшей модели: слой рыхлого грунта мощностью 30 м с плотностью  $\rho = 1,8 \text{ м/см}^3$  и скоростью поперечной волны  $V_s = 350 \text{ м/с}$  лежит на жестком упругом полупространстве с плотностью  $\rho = 2,0 \text{ г/см}^3$  и скоростью поперечных волн  $V_s = 750 \text{ м/с}$ .

Максимум коэффициента динамичности  $b \approx 2,5$  близко соответствует отношению сейсмических жесткостей полупространства и слоя  $1500/630 \approx 2,4$ , а значение периода, при котором отмечается максимум коэффициента динамичности, примерно соответствует четверти длины волны в слое  $T \approx 0,34 \text{ с}$ . На этом же рис. 7 приведен коэффициент динамичности в случае отсутствия резонанса в системе рыхлый грунт на полупространстве при близком соотношении сейсмических жесткостей слоя и полупространства. В этом случае максимум коэффициента динамичности  $b \approx 2$ .

Полученный описанным способом коэффициент динамичности существенно отличается от формы кривых  $\beta$  и спектров реакции, приведенных выше в отечественных и зарубежных нормативных документах. Прежде всего отсутствует полка максимальных значений, и это понятно почему: ведь данный спектр характеризует конкретный грунтовой разрез, в то время как нормативный график есть суперпозиция всевозможных частных спектров. С другой стороны, как было показано ранее, максимум коэффициента динамичности может отличаться от нормативного значения 2,5 как в большую, так и меньшую сторону. Тем самым расчетный график коэффициента динамичности лучше, чем нормативный

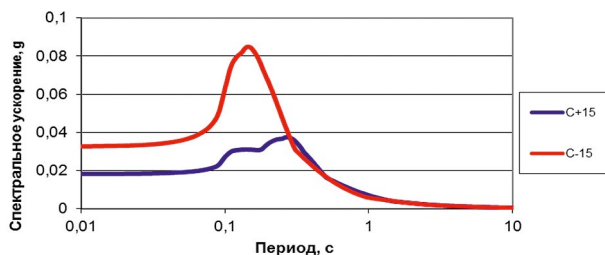


Рисунок 9 — Спектры реакции моделей C+15 и C-15

соответствует конкретной частотной характеристике реального грунтового массива, и соответствующая сейсмическая нагрузка, рассчитанная на основе коэффициента динамичности, будет лучше отображать реальную ситуацию.

Приращение сейсмической интенсивности за счет спектральных свойств грунтового массива может быть определено с помощью выражения:  $b/2 = 2,5 \Delta I$ . Коэффициент 2,5 взят в соответствии с данными новой шкалы сейсмической интенсивности ШСИ [14], согласно которой увеличению амплитуды ускорений в 2,5 раза отвечает увеличение сейсмической интенсивности на 1 балл. Отсюда, логарифмируя, получаем окончательное выражение:

$$\Delta I (\text{балл}) = 2,5 \lg b - 0,75$$

при  $b = 2$ ,  $\Delta I = 0$ ; при  $b = 4$ ,  $\Delta I = 0,75$ ; при  $b = 6$ ,  $\Delta I = 1,2$  балла.

Отметим также, что полученное приращение интенсивности за счет резонанса относится не ко всему инженерному диапазону частот (как, например, член, характеризующий сейсмическую жесткость грунтов), а только к тем частотам, которые лежат внутри интервала  $(f_0 - \Delta f \div f_0 + \Delta f)$  вблизи максимума, где ускорения не менее 0,5 от максимума. На это обстоятельство необходимо указывать в заключении относительно приращения сейсмической интенсивности и/или относительно суммарной сейсмической интенсивности.

В завершение этого раздела статьи еще раз подчеркнем, что мощность, на которую следует исследовать грунтовой массив, определяется четвертью длины волны для самого длинного периода, в свою очередь зависящего от собственных колебаний проектируемого сооружения.

В качестве поясняющего примера рассмотрим ситуацию, имевшую место в Ленинакане во время Спитакского землетрясения 1988 г. Для 12-этажных зданий, которые имели наибольшие разрушения, период собственных колебаний можно было оценить по формуле из документа [15]:  $T = 0,021 H$ , где  $H$  – высота здания. Отсюда при  $H = 40$  м получаем оценку периода собственных колебаний зданий  $T = 0,84$  с. По данным, приведенным в статье [16] средняя скорость поперечных волн слоя озерных глин в Ленинакане составила около 450 м/с, тем самым  $H = \lambda/4 = 450 \text{ м/с} \cdot 0,84 \text{ с} / 4 \approx 95$  м. График коэффициента динамичности модели грунтов Ленинакана приведен на рис.8. Максимум коэффициента динамичности, находящийся в области длинных периодов равен  $b = 3,8$ . Отсюда получаем оценку  $\Delta I = 2,5 \lg 3,8 - 0,75 \approx 0,7$  балла. Эта оценка справедлива для диапазона периодов  $0,66 \text{ с} \leq T \leq 1,0 \text{ с}$ .

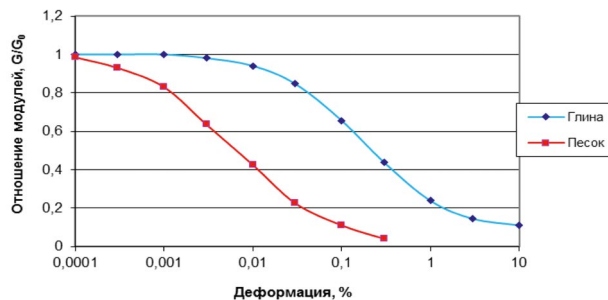


Рисунок 10 — Снижение модулей сдвига в глинах и песках

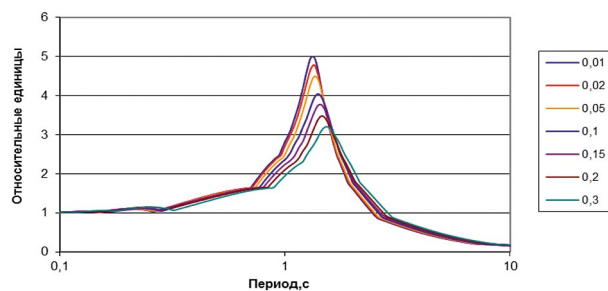


Рисунок 11 — Коэффициенты динамичности для нелинейной модели (глины)

Таким образом, зная строение грунтов в Ленинакане до глубины 100 м и рассчитав частотную характеристику, можно было бы избежать (или по крайней мере уменьшить) страшные разрушения при землетрясении 1988 г.

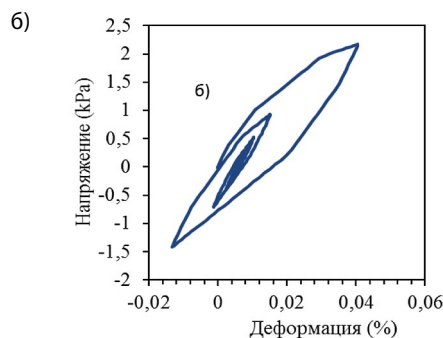
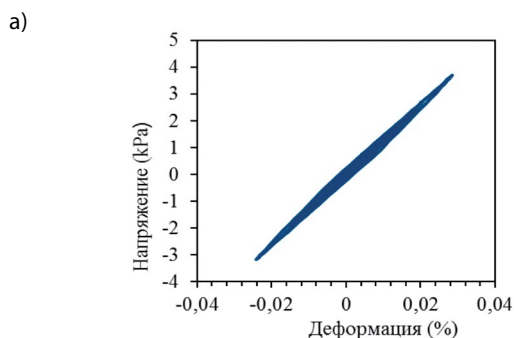
### Структурный фактор

Резонансные явления зависят не только от контраста рыхлого верхнего слоя грунтов, но также от структуры слоев, слагающих грунтовую толщу. Значение средней сейсмической жесткости 30-метровой толщи, как следует из норматива [11], определяет отнесение грунта к одной определенной категории. Но этого оказывается недостаточно для однозначного определения формы графика коэффициента динамичности. В данном случае следует учесть то, что в книге [17] названо *структурным фактором*. Этим термином обозначается влияние на параметры сейсмических воздействий внутренней структуры массива грунта, т.е. порядок чередования слоев в массиве, который может быть произвольным, хотя средние величины скоростей и плотностей сохраняются.

Иллюстрация сказанного представлена на рис.9, где приведены два модельных примера. Параметры моделей грунтовой толщи представлены таблицей 1. Результаты моделирования представлены в виде спектров реакции на рис. 9.

Очевидно, что для моделей C+30 и C-30 различаются как вид спектральной кривой, так и, что особенно наглядно, уровень спектров. Для модели C+30 он примерно в 1,5 раза ниже, что объясняется строением грунтовой толщи: в строении модели C+30 присутствует инверсный низкоскоростной слой, и к тому же самая верхняя часть разреза в модели C+30 представлена слоем с повышенной сейсмической жесткостью. Тем самым сейсмическая волна, проходящая





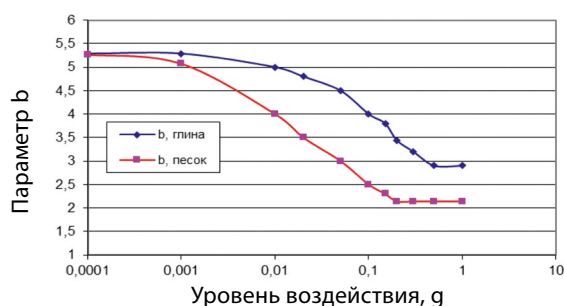
**Рисунок 12** — Графики зависимости "напряжение-деформация" для глин (а) и для песков (б)

снизу из жесткого полупространства, ослабляется ввиду двух факторов. Во-первых, на инверсной границе – кровле слоя с пониженной жесткостью – часть энергии отбрасывается назад в нижнее полупространство. Во-вторых, на кровле верхнего слоя колебания будут ниже именно в силу повышенной жесткости.

Таким образом, взамен грунтовых категорий основным понятием СМР, определяющим особенности инженерно-сейсмологических изысканий на изучаемой территории, предлагается использовать понятие *модель сейсмогрунтовых условий*. К этому понятию относятся все локальные особенности геологической обстановки, определяющие специфику сейсмических воздействий – их амплитуду и спектральный состав. При этом желательно представлять сейсмический разрез на глубину до скального фундамента или до регионального горизонта грунтов с достаточно высокой сейсмической жесткостью.

**Влияние нелинейности на спектральные характеристики грунтовой толщи**

При сильных сейсмических воздействиях необходимо учитывать нелинейные свойства дисперсных грунтов. Сама по себе нелинейность связи «напряжение-деформация» вряд ли проявляется в частотно-зависимом затухании. Но сильные сейсмические воздействия влияют на тонкую структуру и свойства среды и через это влияют на частотно-зависимое поглощение. Проявление нелинейности в виде снижения



**Рисунок 13** — Зависимость параметра b от уровня сейсмических воздействий в дисперсных грунтах

модулей сдвига с ростом деформации, как показывает график рис. 10, более значительно для песков по сравнению с глинами.

Как влияют нелинейные процессы на вид графиков коэффициентов динамичности показывает рис. 11, где приведено несколько различных ветвей графика коэффициентов динамичности при разных уровнях сейсмического воздействия.

Модель среды во всех случаях одна и та же: слой рыхлого грунта с параметрами  $V_s = 100$  м/с и  $\rho = 1,5$  г/см<sup>3</sup> мощностью 30 м лежит на упругом полупространстве с параметрами  $V_s = 1000$  м/с и  $\rho = 2,2$  г/см<sup>3</sup>. Параметры нелинейности соответствуют лабораторным данным, полученным при испытаниях глинистых грунтов. Индексами 0,01 ÷ 0,3 обо-

**Таблица 1** — Параметры моделей грунтовой толщи

Номер слоя	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость $V_s$ , м/с	Мощность, м
модель С+15			
1	2,0	667	15
2	1,8	400	15
3	2,2	1000	∞
модель С-15			
1	1,8	400	15
2	2,0	667	15
3	2,2	1000	∞

значены амплитуды возбуждающего импульса в долях  $g$ . График коэффициента динамичности при амплитуде 0,01  $g$  близок к линейной модели. Хотя значение периода в целом сохраняется для разных амплитуд возбуждения, нелинейность несколько расширяет частотный диапазон и заметно понижает правый низкочастотный срез характеристики.

Нелинейность песков значительно выше, чем в глинах. Это, в частности, можно увидеть на графиках рис. 10, где спад отношения модулей сдвига  $G/G_0$  для песков начинается значительно ранее, чем для глин. Другой иллюстрацией сказанного является рис. 12, где приведены графики связи «напряжение-деформация» для глин – (а) и песков (б) при уровне возбуждения 0,1  $g$ .

Параметр  $b$ , который, как было показано выше, определяет резонансные свойства грунтовой толщи, заметно изменяется в дисперсных грунтах под влиянием достаточно интенсивных сейсмических воздействий. Это показывает рис. 13, где приведены результаты расчетов параметра  $b$  на моделях дисперсных грунтов.

Как видно из рисунка, на графиках отчетливо выделяются три характерные зоны – начальное плато, характеризующее линейной связью напряжений и деформаций при низком уровне сейсмических воздействий, конечное плато, соответствующее уровню насыщения, при котором величина  $b$  не изменяется, несмотря на увеличение уровня сейсмического воздействия, и третий участок – уменьшения  $b$  при росте уровня сейсмических воздействий. Значения  $b$  на уровне конечного плато зависят от свойств грунта. Можно предположить, что в этом диапазоне сейсмических нагрузок происходит окончательное уплотнение грунтового массива, и он (массив) снова становится упругим.

В целом, нелинейность уменьшает величину параметра  $b$  и соответственно снижает уровень резонансов в слое рыхлого грунта.

## Заключение

В заключение формулируем основные результаты работы.

1. Разработана методика компьютерного моделирования прямой задачи СМР – рассчитать параметры сейсмического волнового поля по заданной модели грунтовой толщи. Возбуждение осуществляется стандартным способом с использованием короткого импульса заданной величины. В качестве отклика используется спектр реакции или его нормированный аналог – коэффициент динамичности.
2. Проанализированы способы задания нормативных значений коэффициента динамичности. Показано, что нормативные величины не перекрывают диапазон возможных вариаций как свойств сейсмических воздействий, так и реакций грунтового массива на эти воздействия. Значения максимума коэффициента динамичности могут значительно превышать нынешние нормативные значения 2,5.
3. В качестве характеристики спектральных свойств грунтовой толщи предложено использовать параметр  $b$  – максимум коэффициента динамичности.
4. Определено выражение, связывающее приращение сейсмической интенсивности со значением сейсмической жесткости грунтового массива и параметром  $b$ .
5. Показана важность учета внутренней структуры грунтового массива. Взамен грунтовых категорий основным понятием СМР, определяющим особенности инженерно-сейсмологических изысканий на изучаемой территории, предлагается использовать понятие модели сейсмогрунтовых условий.
6. Исследовано влияние нелинейности связи «напряжение-деформация» на спектральные характеристики грунтовой толщи при сильных сейсмических воздействиях. Показано, что нелинейность заметно уменьшает интенсивность резонансных процессов в грунтовом массиве.

## Литература

1. СП 283.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования.
2. Алешин А.С. Основные понятия сейсмического микрорайонирования: категория, балл, модель // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. №5. С.9-13.
3. Aleshin A.S "The paradigm of the seismic zonation continuity" // World Journal of Engineering and Technology, ISSN: 2331-4222). 2015. №3. Pp.338-343.
4. Алешин А.С. Основы континуальной теории сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. №5. С.18-26.
5. Алешин А.С. О грунтовых коэффициентах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2018. №2. С.6-13.
6. Шебалин Н.В. О макросейсмической основе сейсмического микрорайонирования. В кн.:

Сейсмическое движение грунта. М.: Наука. 1970. 202 с.

7. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи. М.: Связьиздат. 1957. 348 с.
8. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. М., 2014.
9. СНиП II 8 - 78. М.: Стройиздат. 1977.
10. Нормы и правила строительства в сейсмических районах (СН 8-57). Стройиздат. 1957.
11. 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.
12. European Committee for Standardization. (2003). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions, and rules for buildings, EN 1998-1:2003, Brussels, 229 p.
13. Корчинский И.Л., Бородин Л.А., Гроссман

А.Б. и др. Сейсмостойкое строительство зданий. М.: Высшая школа. 1971. 320 с.

14. Антикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование. 2012. 176 с.
15. Руководство по проектированию конструкций и технологии возведения монолитных бескаркасных зданий / ЦНИИЭП жилища Госгражданстроя. М.: Стройиздат. 1982. 216 с.
16. Сакс М.В., Штейнберг В.В. О частотной избирательности колебаний грунтов при Спитакском землетрясении 7 декабря 1988 г. // В кн. Оценка эффекта сильных землетрясений. Вопр. инж. сейсмол., вып.30. М.: Наука. 1989. С.164-166.
17. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир. 2017. 300 с.

Материалы хранятся по адресу: 123242, г. Москва, ул. Б.Грузинская, 10. ФГБУН ИФЗ РАН

---

**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 THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE SOIL MASSIF

### Abstract

The regulatory framework for seismic microzoning in Russia has recently been supplemented by a number of new generation documents. In particular, the document SP 283.1325800.2016 was adopted. In it for the description of spectral characteristics of a soil thickness the value of a maximum of coefficient of dynamism  $b$  was used. The scope of the normative document did not allow to describe in detail the method of obtaining and features of the use of this parameter, which is why it turned out to be an unusual innovation for prospectors. The article describes in detail how this value is obtained and how to use it. The ways of setting the standard values of the dynamic coefficient are analyzed. It is shown that the standard values do not cover the range of possible variations in both the properties of seismic effects and the reactions of the soil mass to these effects. The values of the maximum coefficient of

dynamism can be significantly higher than the current normative values of 2.5. The importance of taking into account the internal structure of the soil mass is shown. Instead of soil categories the basic concept of construction, the defining features of engineering-seismological investigations in the study area, it is proposed to use the notion of model ground conditions. Special attention is paid to the consideration of nonlinear phenomena under strong seismic impacts. The effect of the nonlinearity of the stress-strain relationship on the spectral characteristics of the soil layer under strong seismic impacts is studied. It is shown that the nonlinearity significantly reduces the intensity of resonance processes in the soil massif.

**Keywords:** seismic microzoning, seismic effects, soil thickness, the response spectrum, the dynamic factor, modeling, non-linear properties.

### References

1. SP 283.1325800.2016. Ob'ekty stroitel'nye povyshennoy otvetstvennosti. Pravila seysmicheskogo mikrorayonirovaniya. (High critical building objects. Rules of seismic microzoning), Moscow: 2016.
2. Aleshin A.S. Osnovnye ponyatiya seismicheskogo mikrorayonirovaniya: kategoriya, ball, model'[Basic concepts of seismic microzoning: category, intensity degree, model]//Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy [Earthquake Engineering. Constructions safety]. 2013. N5, pp.9-13(Rus.).
3. Aleshin A.S. "The paradigm of the seismic zonation continuity" // World Journal of Engineering and Technology, ISSN: 2331-4222, 2015, 3, 338-343
4. Aleshin A.S. Osnovy kontinual'noy teorii seismicheskogo mikrorayonirovaniya (Fundamentals of continuum theory of seismic microzoning)//Earthquake Engineering. Constructions safety. 2015.N5. pp.18-26.
5. Aleshin A.S. O gruntovykh koeffitsientakh// Earthquake Engineering. Constructions safety. 2018.N2. pp.6-13.
6. Shebalin N.V. O makroseismicheskoy osnove seismicheskogo mikrorayonirovaniya (On the macroseismic basis of seismic microzoning). -In the book.: Seismic ground motion. M.: Nauka, 1970.
7. Kharkevich A.A, Teoreticheskiye osnovy radio-svyazi (Theoretical bases of radio), Moscow: Svyasizdat, 1957, 348 p.
8. Stroitel'nye Pravila. Stroitel'stvo v seismicheskikh rayonakh. SP 14.13330.2014 (Seismic Building Design Code) SP 14. 13330. 2014.
9. SNiP II-7-81. Construction in seismic areas. M.: Stroyizdat, 1982.
10. Norms and rules of construction in seismic areas (CH 8-57). Stroyizdat, 1957.
11. 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.
12. European Committee for Standardization. (2003). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions, and rules for buildings, EN 1998-1:2003, Brussels, 229 p.
13. Korchinsky I.L., Borodin L. A., Grossman A. B., etc. Seysmostoykoye stroitel'stvo zdaniy (Earthquake-resistant construction of buildings). M., Vysshaya shkola, 1971. 320 pp.
14. Aptikaev F.F. Instrumental'naya shkala seismicheskoy intensivnosti (The instrumental seismic intensity scale), Moscow, Nauka i obrazovaniye, 2012, 176 p.
15. Rukovodstvo po proyektirovaniyu konstruktivnykh i tekhnologiy vozvedeniya monolitnykh beskarkasnykh zdaniy (Guidelines for the design of structures and technology of construction of monolithic frameless buildings). M., Stroyizdat, 1982. 216 p.
16. Saks M.V., Shteinberg V.V. O chastotnoy izbiratel'nosti gruntov pri Spitakskom zemletryaseni 7.12.1988 (About frequency selectivity of the soil oscillation during the Spitak earthquake 7.12.1988) Vopr. Inzh. Seismol., 1989, no. 30, pp. 164–166.
17. Aleshin A.S. Kontinual'naya teoriya seismicheskogo mikrorayonirovaniya (The continual theory of seismic microzoning). Moscow., Scientific World, 2017, 300 p.

---

**Для цитирования:** Алешин А.С. О спектральных характеристиках грунтовой толщи//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 5. С. 16-23.

**For citation:** Aleshin A.S. On the spectral characteristics of the soil massif // Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 5, pp. 16-23. (In Russian).