

УДК 550.3 + 519.7

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20810

АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛОСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ВЯЗКОУПРУГИХ НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ

© 2016 Ж.Д. Тотиева, к.ф.-м.н.

Геофизический институт ВНЦ РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: jannatuaeva@inbox.ru

Представлены модель, алгоритм и программный расчет нелинейного отклика среды на заданное возмущение для двухслойного полупространства. Теоретический подход основан на использовании функции Грина. Проведен анализ зависимости спектров синтетических акселерограмм от параметра нелинейности и частоты входного сигнала. Предложенная модель в полной мере учитывает физическую нелинейность: во-первых, нелинейную связь «напряжение-деформация», во-вторых, нелинейное затухание среды в зависимости от уровня деформации. Программный продукт может использоваться при прогнозировании нелинейного отклика грунта на ожидаемое расчетное землетрясение.

Ключевые слова: сейсмическая опасность и риск, база данных сильных движений, грунт, напряжение, деформация, нелинейность, модель, программа.

Введение

В настоящее время исследование нелинейного отклика грунта при сейсмических воздействиях – один из наиболее важных и сложных вопросов физики разрушения, инженерной сейсмологии и, в частности, сейсмического микрорайонирования.

Большинство урбанизированных территорий расположены на «мягких» осадочных грунтах, поведение которых при интенсивных воздействиях определяется в значительной мере их нелинейными свойствами.

При анализе поведения грунтов различают физическую, геометрическую и конструктивную нелинейности. Физическая нелинейность характеризуется нелинейной зависимостью между компонентами обобщенных напряжений и деформаций и характеризует поведение грунта в упругопластической области. Геометрическая нелинейность возникает, когда перемещения грунта вызывают значительное изменение его геометрии, вследствие этого уравнения равновесия приходится составлять с учетом изменения формы и размеров колеблющейся толщи. Неучтенными остаются нелинейные свойства реальных материалов.

В физически нелинейных задачах отсутствует прямая пропорциональность между напряжениями и деформациями. Грунт подчиняется нелинейному закону деформирования. Закон деформирования может быть и несимметричным – с различными пределами сопротивления растяжению и сжатию. Это явление т.н. «бимодальности» наблюдается на поверхности грунтовой толщи на «мягких» или слабых грунтах [Заалишвили, 2009].

В связи со сложностью и неоднозначностью результатов большинство подобных задач на исследуемых реальных грунтах решается лабораторными и натурными инструментальными методами [Габеева, Заалишвили, 2005; Заалишвили, 1996, 1997, 2014а, 2014б, 2014в]. При этом предварительно формируются карты инженерно-

геологического районирования территории, являющиеся основой таких исследований [Заалишвили и др., 2012, 2013а]. Другим возможным путем решения задачи является использование баз данных сильных движений [Заалишвили и др., 2013б]. Это позволяет напрямую решать рассматриваемую задачу и определять сейсмическую опасность территории [Zaalishvili, Rogozhin, 2011].

С целью прогноза возможных потерь на основе учета уязвимости территории далее производится оценка ее сейсмического риска [Заалишвили и др., 2014]. Последовательность рассмотренных этапов обеспечивает геофизическую инженерную сейсмозащиту застройки [Заалишвили, Кранцфельд, 2014].

С другой стороны, при инструментальных исследованиях, когда могут детально изучаться реальные грунты и их поведение, особенности сейсмического воздействия часто невозможно реализовать. В то же время расчетные исследования позволяют с высокой степенью достоверности моделировать любые воздействия, наблюдающиеся при реальных землетрясениях. Это обуславливает использование совокупности инструментальных, расчетных и инструментально-расчетных методов и способов при прогнозе поведения грунтов при сильных сейсмических воздействиях.

Расчеты параметров сейсмических колебаний на поверхности грунта или точнее грунтовой толщи необходимы для определения спектров отклика, динамических напряжений и деформаций конкретных участков грунта, которые могут вызвать его нестабильное поведение, последующее повреждение и разрушение зданий.

1. Реологическая модель грунта

Пусть имеем слой грунта с нелинейными свойствами ($0 \leq z \leq h$) и подстилающий слой ($z > h$), представляющий собой упругое полупространство с линейными упругими свойствами. Упругое полупространство характеризуется скоростью распространения поперечных волн v_s^E и плотностью ρ^E . Пусть поверхностный слой характеризуется аналогичными параметрами: v^n и ρ^n .

В модели рассматривается воздействие только поперечных волн, так как именно с ними связывают разрушительные последствия землетрясений. В частности, на границу раздела грунта $z = h$ (вязкоупругий слой) действует падающая поперечная SH-волна, распространяющаяся в вертикальном направлении с частотой f_h . Нелинейная зависимость «напряжение-деформация» для вязкоупругой среды представлена в виде (модель Кельвина-Фойгта):

$$\tau = G(\gamma)\gamma + \eta(\gamma)\dot{\gamma}, \quad (1)$$

где τ – касательное напряжение, γ – деформация, $\dot{\gamma}$ – скорость деформации, G – модуль сдвига, η – вязкость.

Модуль сдвига G может определяться через известный гиперболический закон по Хардин-Дрневичу:

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + \frac{|\gamma|}{\gamma_0}} = \frac{G_0}{1 + \alpha|\gamma|}, \quad (2)$$

G_0 характеризует наибольшее значение модуля сдвига, $\gamma_0 = \frac{\tau_{\max}}{G_0}$, τ_{\max} – предельно допустимое значение напряжения, α – параметр нелинейности (определяется по типу грунта)

Параметр нелинейности α характеризует степень убывания модуля сдвига и определяет нелинейное поведение грунта при больших значениях напряжений. Обычно за параметр α принимают $1/\gamma_0$ (как это видно из формулы 2). При $\alpha = 0$ данная модель, учитывающая нелинейность среды, становится адекватной линейному закону связи «напряжение-деформация».

Введем вспомогательную нелинейную функцию $\varphi(\gamma) = \frac{\alpha|\gamma|}{1 + \alpha|\gamma|}$. Тогда $G(\gamma) = G_0 [1 - \varphi(\gamma)]$. Таким образом, последовательные значения данной функции будут характеризовать степень убывания модуля сдвига.

Для математического описания степени затухания $\beta(\gamma)$ воспользуемся другим представлением Хардин-Дрневича:

$$\frac{\beta(\gamma)}{\beta_m} + \frac{G(\gamma)}{G_0} = 1, \quad \beta(\gamma) = \beta_m \left[1 - \frac{G(\gamma)}{G_0} \right] = \beta_m \varphi(\gamma) \text{ или } \beta(\gamma) = \beta_0 + [\beta_m - \beta_0] \varphi(\gamma), \quad (3)$$

где параметр β_0 соответствует значению затухания при нулевой деформации, а β_m характеризует нелинейное затухание в условиях интенсивной нагрузки.

Пусть $\gamma = \gamma(z, t)$ и $\tau = \tau(z, t)$ (t – временная координата). Применим к равенству (1) преобразование Фурье:

$$\bar{G}(z, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\gamma(z, t)) e^{-j\omega t} dt, \quad \omega = 2\pi f. \quad (4)$$

Тогда

$$\bar{\tau}(z, f) = [\bar{G}(z, f) + j\omega \bar{\eta}(z, f)] \circ \bar{\gamma}(z, f), \quad (5)$$

$$\bar{G}(z, f) = G_0 [\delta(f) - \bar{\varphi}(z, f)], \quad \bar{\eta}(z, f) = \frac{2G_0}{\omega} [\beta_0 \delta(f) + (\beta_m - \beta_0) \bar{\varphi}(z, f)], \quad \omega \neq 0. \quad (6)$$

Учитывая равенства (5) – (6), получим следующие выражения

$$\bar{\tau}(z, f) = [\bar{G}_0(z, f) - \Delta \bar{G} \bar{\varphi}(z, f)] \circ \bar{\gamma}(z, f), \quad (7)$$

$$\bar{G}_0 = G_0 (1 + 2j\beta_0), \quad \Delta \bar{G} = G_0 (1 - 2j[\beta_m - \beta_0]). \quad (8)$$

Знак « \circ » означает операцию свертки по переменной f .

Таким образом, выражения (1) – (8) являются математическим описанием представленной модели грунта.

2. Динамическая модель грунта

В качестве основного уравнения математической модели, описывающей поведение грунтовой толщи с течением времени, используется одномерное уравнение движения:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho a, \quad (9)$$

ρ – плотность грунта, a – ускорение.

Введем функцию смещения $u = u(z, t)$. Тогда уравнения (9) и (1) в терминах функции $u = u(z, t)$ переписывается в следующем виде

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (10)$$

$$\tau = G \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \frac{\partial u}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \frac{\partial u}{\partial t \partial z} \quad (11)$$

В предыдущих работах [Заалишвили, Туаева, 2002; Заалишвили, Тотиева-Туаева, 2010; Заалишвили и др., 2005; 2009; Туаева, 2005; Zaalishvili, et al., 2008] модель (10) – (11) реализована методом конечных разностей (при определенных начальных и граничных условиях). При этом использовались данные базы сильных движений Геофизического института ВНИЦ РАН. В процессе расчетов применялись разные схемы приближений, был проведен анализ зависимостей расчетных (синтетических) нелинейных акселерограмм от различных параметров поверхностного слоя грунта (коэффициентов затухания, мощности грунтовой толщи, скоростей распространения поперечных волн). Вычислительный эксперимент показал, что при работе с базой данных сейсмических записей конечно-разностный метод:

- 1) неустойчив при изменении параметра нелинейности α , а также при изменении в большом диапазоне скоростей поперечных волн;
- 2) не учитывает сейсмические (акустические) характеристики грунта нижнего подстилающего слоя.

В настоящей работе осуществлена программная реализация аналитического решения, основанного на использовании функции Грина, где указанная проблема решена.

Приведенное ниже решение использует аппарат дифференциальных уравнений и технику преобразования Фурье.

а) Решение линейной модели. Применим преобразование Фурье к (6), тогда получим уравнение:

$$\frac{\partial \bar{\tau}}{\partial z} + \rho \omega^2 \bar{u} = 0, \quad (8)$$

где

$$\bar{\tau}(z, f) = \bar{G}_0 \frac{\partial u}{\partial z}(z, f) - \Delta \bar{G} \bar{H}(z, f), \quad \bar{H}(z, f) = \frac{\partial u}{\partial z}(z, f) \circ \bar{\varphi}(z, f)$$

Пусть $\tilde{\beta} = \frac{\Delta \bar{G}}{G_0}$, тогда

$$\bar{\tau}(z, f) = \bar{G}_0 \left[\frac{\partial u}{\partial z}(z, f) - \tilde{\beta} \bar{H}(z, f) \right]. \quad (9)$$

С учетом (9) уравнение (8) переписывается

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \tilde{k}^2 \bar{u} = \bar{F}[\bar{u}], \quad (10)$$

$$\text{где } \tilde{k} = \frac{\rho \omega^2}{G_0}, \quad \bar{F}[\bar{u}] = \tilde{\beta} \left[\bar{\varphi} \circ \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} \circ \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right]$$

Частное решение уравнения (10) ищется методом последовательных приближений. При этом за нулевое приближение берется решение соответствующего линейного об однородного уравнения (при $\bar{F} = 0$):

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_0}{\partial z^2} + \tilde{k}^2 \bar{u}_0 = 0. \quad (11)$$

Как известно из теории дифференциальных уравнений, общее решение уравнения (11) представимо в виде

$$\bar{u}_0(z, f) = A_0(f)e^{j\tilde{k}z} + B_0(f)e^{-j\tilde{k}z}. \quad (12)$$

Для определения частного решения, иначе говоря, для определения коэффициентов $A_0(f)$, $B_0(f)$ нужны два граничных условия. Примем

1) на свободной поверхности ($z=0$) $\bar{\tau}_0(0, f) = 0$; тогда

$$\frac{\partial \bar{u}_0(0, f)}{\partial z} = j\tilde{k}A_0(f) - j\tilde{k}B_0(f) = 0 \Rightarrow A_0(f) = B_0(f);$$

2а) на глубине $z=h$ задано спектральное смещение

$$\bar{u}_0(h, f) = \bar{u}_0^E(h, f) = A_0^E(f)e^{j\tilde{k}_E h} + B_0^E(f)e^{-j\tilde{k}_E h},$$

$k_E = \frac{\omega}{c_E}(1 - j\beta_E)$, β_E – соответствующий среде коэффициент затухания; или

$$2б) \text{ на глубине } z=h: \bar{\tau}_0(h, f) = \bar{\tau}_0^E(h, f); \bar{G}_0 \frac{\partial \bar{u}_0(h, f)}{\partial z} = \bar{G}_E \frac{\partial \bar{u}_0^E(h, f)}{\partial z}.$$

В результате подстановки граничных условий 2а) – 2б) в (12), опуская выкладки, получаем решение для линейной модели:

$$\bar{u}_0(z, f) = \frac{2\tilde{R}A_0^E(f)e^{j\tilde{k}_E h}}{1 + (\tilde{R}^2 - 1)\cos^2 \tilde{k}h} [\tilde{R} \cos \tilde{k}h - j \sin \tilde{k}h] \cos \tilde{k}z, \quad (13)$$

где

$$\tilde{R} = \frac{\bar{G}_E \tilde{k}_E}{\bar{G}_0 \tilde{k}} = \frac{\rho_E c_E (1 - j(\beta_0 - \beta_E))}{\rho_n c_n (1 + \beta_0^2)}.$$

б) Решение нелинейной модели u_i ($i=1,2,3,\dots$). Функция Грина $G_f(z; z_0)$ рассматриваемой задачи есть фундаментальное решение, удовлетворяющая уравнению:

$$\frac{\partial^2 G_f}{\partial z^2} + \tilde{k}^2 G_f = \delta(|z - z_0|, f)$$

и представляемая в виде [7]

$$G_f(z; z_0) = \begin{cases} \frac{j}{2\tilde{k}} e^{j\tilde{k}|z-z_0|}, & z \neq z_0, \\ \frac{j}{2\tilde{k}}, & z = z_0. \end{cases} \quad (14)$$

Будем искать решение исходного нелинейного уравнения (10) в виде $\bar{u}_i = \sum_{k=0}^i \bar{u}_k$.

Пусть первое приближение частного решения (10) u_1 удовлетворяет следующему равенству:

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_1^p}{\partial z^2} + \tilde{k}^2 \bar{u}_1^p = \bar{F}[\bar{u}_0].$$

Второе и последующие приближения:

$$\frac{\partial^2 \bar{u}_i^p}{\partial z^2} + \tilde{k}^2 \bar{u}_i^p = \bar{F}[\bar{u}_{i-1}] - \bar{F}[\bar{u}_{i-2}], \quad i = 2, 3, \dots$$

Тогда, как известно, частное решение неоднородного уравнения (10) представится в виде:

$$\bar{u}_i^p(z, f) = \int_0^h G_f(z, z_0) (\bar{F}[\bar{u}_{i-1}(z_0, f)] - \bar{F}[\bar{u}_{i-2}(z_0, f)]) dz_0$$

Что касается общего решения (10), то для каждого приближения оно определяется равенством

$$\bar{u}_i^H(z, f) = A_i(f) e^{jkz} + B_i(f) e^{-jkz}. \quad (15)$$

Окончательно, имеем

$$\bar{u}_i(z, f) = \bar{u}_i^p(z, f) + \bar{u}_i^H(z, f).$$

Коэффициенты уравнения (15) $A_i(f)$, $B_i(f)$ находятся аналогично тому, как это было сделано в случае линейного приближения, только для напряжения используется представление (9). В силу присутствия свертки функций в правой части (9) для коэффициентов $A_i(f)$ получается система алгебраических уравнений с эрмитовой матрицей, которая решается методом Гаусса. Приближения \bar{u}_i вычисляются до тех пор, пока $|\bar{F}[\bar{u}_{i-1}] - \bar{F}[\bar{u}_{i-2}]| \leq \varepsilon$, где $\varepsilon = 10^{-5} \max|\bar{F}[\bar{u}_0]$.

Численная реализация проведена в среде программирования MathLab 6.5. Расчеты показывают достаточность трех итераций для достижения заданной точности ε .

3. Результаты численных расчетов

В качестве входного сигнала была использована функция смещения на глубине $h=60$ [Bonnet, Heitz, 1995]:

$$u_0(t) = u_0 \left(\left[\pi \frac{(t-t_p)}{t_p} \right]^2 - \frac{1}{2} \right) e^{-\left[\pi \frac{(t-t_p)}{t_p} \right]^2}, \quad u_0 = const,$$

где t_p – период сигнала.

Входные данные: коэффициент $u_0 = 0.5$, частота воздействия $f_h = 0,33$, $t_p = 1/f_h$, скорость распространения поперечных волн в подстилающем упругом полупространстве $v_s^E = 1500$ м/с² и плотность $\rho^E = 2200$ кг/м³, $v^n = 240$ м/с² и $\rho^n = 1200$ кг/м³, $\beta_0 = 0,02$, $\beta_E = 0,02$, $\beta_m = 0,25$ (рис. 1).

При анализе спектров колебаний на поверхности грунтового слоя вычислительный эксперимент показал, что при увеличении параметра нелинейности α наблюдается уменьшение первого пика амплитуды и увеличение второго, то есть при больших параметрах осуществляется большая «перекачка» спектральной площади (при уменьшении первого пика соответственно увеличивается второй пик) (рис. 3).

Рассмотрим сигналы $u_0(t)$ с различными частотами и установим зависимость поведения спектра нелинейного отклика от частоты входного сигнала. Ниже представлены графики ускорений (входной сигнал) на глубине $h = 60$ и с коэффициентом $u_0 = 1$, параметром нелинейности $\alpha = 2000$, а также расчетных спектров ускорений отклика на поверхности $z = 0$ при различных преобладающих частотах воздействия

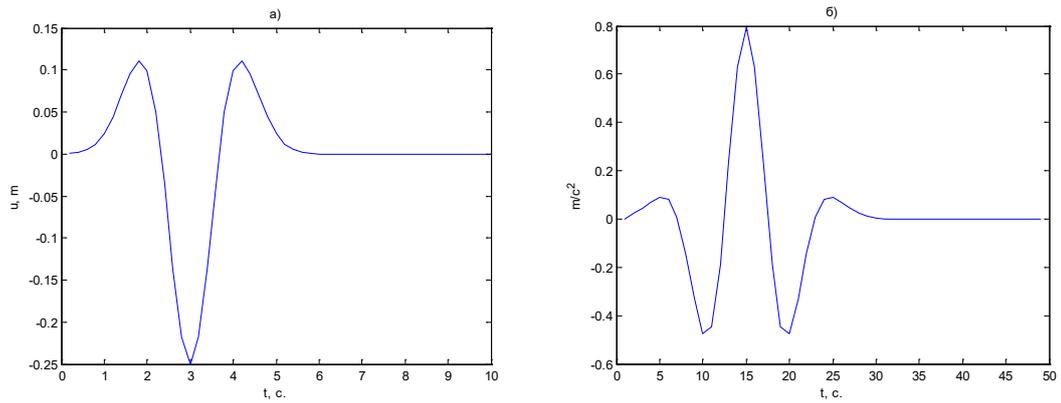


Рис. 1. Входной сигнал: а) – смещение, б) – ускорение.

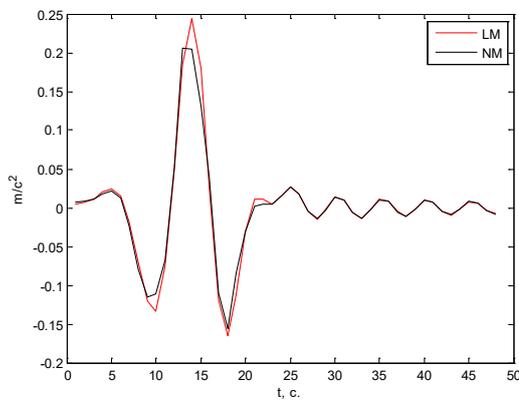


Рис. 2. Расчет ускорений на поверхности $z=0$ с параметром нелинейности $\alpha=2000$ (LM – линейное моделирование, NM – нелинейное моделирование).

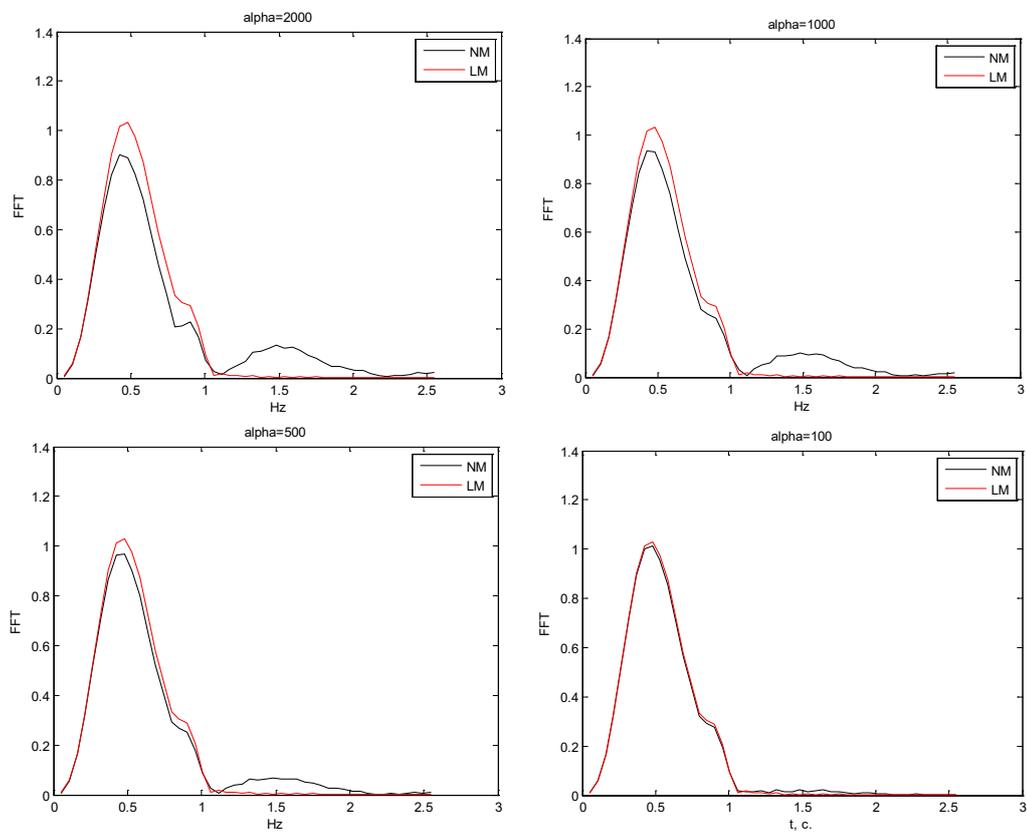


Рис. 3. Спектры ускорений при различных α .

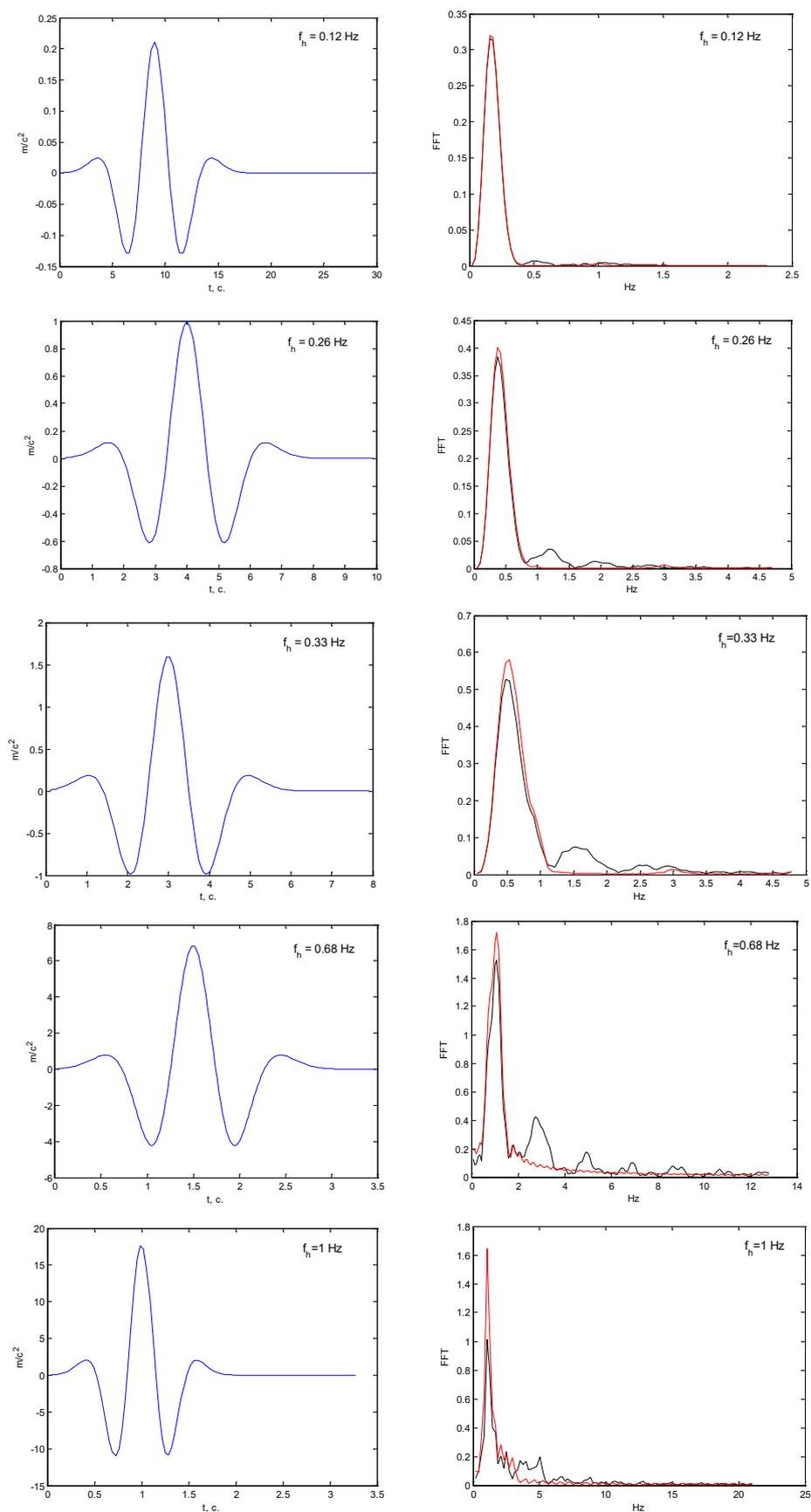


Рис. 4. Графики спектров расчетных акселерограмм (слева – входной импульс, справа – спектр расчетных акселерограмм)

f_h (рис. 4). Как и в предыдущих графиках красная линия соответствует линейной модели, черная – нелинейной.

Значения f_h были взяты из таблицы модельных входных параметров, полученных с помощью аналитической аппроксимации записей сильных движений вблизи разломов [Mavroedis et al., 2003]. Данный теоретический подход к моделированию сильных движений основан на использовании функции Грина динамической теории упругости, которая представляет собой функцию смещения грунтовой толщи на поверхности от единичной импульсной силы, приложенной в некоторой точке пространства. Как известно [Петухин, 1997; Katsuhiko et al., 1998], теоретический расчет функции Грина возможен (при детальной изученности среды и грунтовых условий) на низких частотах до 1 Гц. Свыше 1 Гц обычные теоретические методы расчета дают ненадежные результаты, либо вообще теряют применимость (рис. 4, $f_h = 1$ Hz).

С другой стороны [Mavroedis et al., 2003], входные параметры сильных землетрясений, полученные с помощью аппроксимаций аналитическими функциями записей сейсмических событий в ближней зоне, указывают на то, что диапазон преобладающих частот воздействия f_h колеблется, в основном, в пределах 0,1–0,9 Hz. Поэтому считаем, что данный пакет программ может быть использован в качестве инструмента оценки возможных последствий именно сильных движений (в ближней зоне). В дальнейшем предполагается при моделировании параметров короткопериодных колебаний на частотах выше 1–2 Гц применить стохастический подход и основанный на нем метод случайных колебаний.

Выводы

1. Графики (рис. 3) амплитудно-частотных характеристик расчетных акселерограмм наглядно показывают прямую зависимость величины второго пика (максимума) на спектральной кривой от параметра нелинейности. Иначе говоря, чем больше значения параметра нелинейности, тем больше «перекачивается» энергии (площади спектра) из области низких частот в область более высоких частот, и наоборот. При $\alpha = 0$ спектры полностью совпадают друг с другом.

2. Графики (рис. 4) спектров расчетных акселерограмм указывают на следующую зависимость проявления нелинейности среды в зависимости от частоты воздействия: при увеличении f_h и одновременного увеличения амплитуды сигнала, которая зависит от частоты воздействия, наблюдается усиление «перекачки» площади спектра из области низких частот в более высокочастотную область, причем появляется уже не один, а несколько пиков на кривой спектра.

Литература

1. Габеева И.Л., Заалишвили В.Б. Анализ колебаний нелинейной, поглощающей грунтовой среды по данным инструментального метода сейсмического микрорайонирования // В сборнике: Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе I Кавказская международная школа-семинар молодых ученых. Центр геофизических исследований ВНЦ РАН и РСО-А, Заалишвили В.Б. (редактор), Владикавказский научный центр РАН и РСО-А. 2005. С. 205–211.

2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. М.: МГУ. 1996. 43 с.

3. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования. Владикавказ, СОГУ, 1997. 67 с.
4. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок / Центр Геофизических исследований Владикавказского НЦ РАН и РСО-А (отв. ред. А.В. Николаев). М.: Наука, 2009.
5. Заалишвили В.Б. Некоторые проблемы практической реализации сейсмического микрорайонирования. Факторы, формирующие интенсивность землетрясения // Геология и геофизика Юга России. 2014а. № 3. С. 3–39.
6. Заалишвили В.Б. Корреляционные взаимосвязи между линейными и нелинейными характеристиками грунтов по инструментальным данным // Геология и геофизика Юга России. 2014б. № 4. С. 45–57.
7. Заалишвили В.Б. Зависимость спектральных характеристик сейсмических волн от строения верхней части разреза // Геология и геофизика Юга России. 2014 в. № 4. С. 15–44.
8. Заалишвили В.Б., Туаева Ж.Д., Харебов А.К. Современная концепция динамических моделей грунтовых оснований // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2005. № 1. С. 15–17.
9. Заалишвили В.Б., Туаева Ж.Д., Дзэбоев Б.А. Численный анализ нелинейного отклика среды // Вестник МАНЭБ. 2009. Т. 14. № 5. С. 28–31.
10. Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Невский Л.Н., Трофименко С.Н., Шемпелев А.Г. Глубинные геофизические исследования в Северо-Кавказском федеральном округе: проблемы глубинной геологии и геофизики в региональных исследованиях. О зоне предполагаемого Ардонского межглыбового разлома // Геология и геофизика Юга России. 2012. № 2. С. 11–20.
11. Заалишвили В.Б., Джгамадзе А.К., Гогичев Р.Р. О создании карт инженерно-геологического районирования населенных пунктов республики Северная Осетия-Алания, как основы сейсмического микрорайонирования // Геология и геофизика Юга России. 2013а. № 3. С. 20–28
12. Заалишвили В.Б., Харебов К.С., Харебов А.К. Создание баз данных сильных движений на основе современных воззрений // Геология и геофизика Юга России. 2013б. № 3. С. 39–44
13. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Невский Л.Н., Архиреева И.Г. Оценка сейсмического риска урбанизированной территории // Геология и геофизика Юга России. 2014. № 2. С. 22–29.
14. Заалишвили В.Б., Кранцфельд Я.Л. Геофизическая основа инженерной сейсмозащиты ответственных объектов строительства // Геология и геофизика Юга России. 2014. № 1. С. 39–50.
15. Заалишвили В.Б., Туаева Ж.Д. Математическое моделирование колебаний грунтовой толщи на основе учета нелинейных свойств при интенсивных воздействиях // В сборнике: Информационные технологии и системы: наука и практика. Владикавказский научный центр РАН и РСО-А. 2002. С. 367–370.
16. Заалишвили В.Б., Тотиева-Туаева Ж.Д. Расчет нелинейных колебаний грунтовой толщи по базам данных сильных движений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 5. С. 25–28.
17. Туаева Ж.Д. Распространение волн в нелинейных поглощающих средах при интенсивных нагрузках. // В сборнике: «Сейсмическая опасность и управление

сейсмическим риском на Кавказе»: Владикавказский научный центр РАН и СО-А. 2005. С. 199–204.

18. Петухин А.Г. Оценка параметров сейсмических колебаний грунта на Камчатке. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Москва, 1997.

19. Bonnet G., Heitz J.F. Non linear Seismic Response of a Soft Layer // 10-th European Conference on Earthquake Engineering. Duma (et). 1995. Balkema, Rotterdam. ISBN 9054105283. PP. 361–364.

20. Katsuhiko Kamae, Kojiro Irikura, and Arben Pitarka A Technique for Simulating Strong Ground Motion Using Hybrid Green's Function // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88, No. 2, pp. 357–367, April 1998

21. Mavroedis P. and Apostolot S., Papageorgiou. Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93 No. 3, pp. 1099–1131, June 2003.

22. Zaalishvili V.B., Tuaeva Z., Dzeboev B. Numerical Modeling of Non-Linear Seismic Response of The Soft Layer. В сборнике: First International Conference on Seismic Safety Problems of Caucasus Region Population, Cities and Settlements // Материалы I Международной конференции по вопросам сейсмических проблем безопасности населения Кавказского региона, городов и поселений. 2008. С. 127–130.

23. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of Seismic Hazard of Territory on Basis of Modern Methods of Detailed Zoning and Seismic Microzonation // Open Construction and Building Technology Journal. 2011. Т. 5. С. 30–40.

DOI: 10.23671/VNC.2016.2.20810

ANALYTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF PLANE SEISMIC WAVES IN NONLINEAR VISCOELASTIC MEDIA

© 2016 Zh.D. Totieva, Sc. Candidate (Phys.-math.)

Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center, Russia, 362002,
Vladikavkaz, Markov str., 93a, e-mail: jannatuaeva@inbox.ru

The model, algorithm and numerical results of the nonlinear response of the medium is presented. The theoretical approach is based on the use of the Green's function. Analysis of the dependence of the spectra of synthetic accelerograms of the nonlinearity parameter and frequency of the input signal is carried out. The model takes into account the physical nonlinearity: at first, non-linear relationship «stress-strain», secondly, nonlinear damping medium depending on the strain level. The software can be used for predicting the nonlinear response of the ground to the expected estimated earthquake.

Keywords: seismic hazard and risk, strong motion database, soil, stress, strain, nonlinearity, model, software.