

УДК 550.347.097.33

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ ВИД СПЕКТРА ИНТЕНСИВНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

© 2007 г. О. В. Павленко

Представлено академиком В.Н. Страховым 19.05.2005 г.

Поступило 05.10.2006 г.

В численных экспериментах исследованы преобразования спектров интенсивных сейсмических волн, распространяющихся в грунтовых толщах. Установлено, что преобразование спектров к виду $E(f) \sim f^{-k}$ в грунтах происходит вследствие нелинейной (гистерезисной) диссипации энергии и перераспределения энергии колебаний в спектре посредством взаимодействия волн. Подчеркивание низкочастотных составляющих согласуется с соотношениями распадной неустойчивости Мэнли–Роу, согласно которым передача энергии низкочастотных колебаний в высокочастотные затруднена, но облегчен распад высокочастотных колебаний и передача их энергии низкочастотным колебаниям.

В работах [1, 2] по акселерограммам землетрясений 1995 г. в Кобе и 2000 г. в Тоттори (Япония), записанным скважинными сейсмическими группами, построены численные модели поведения грунтовых слоев *in situ*, т.е. оценены напряжения и деформации, возбуждаемые сильными движениями в верхних ~100 м грунта. Численные модели описывают поведение слоев грунта в десяти 1.5-секундных временных интервалах в продолжение 15 с сильных движений. В работе [3] построенные модели использованы в численных экспериментах, где исследовалось распространение в грунтовых слоях интенсивных шумовых (поперечных) волн. Полученные результаты характеризуют статистические явления, наблюдающиеся при распространении интенсивных сейсмических волн в нелинейных средах – приповерхностных грунтах. Взаимодействия отдельных спектральных компонент приводят к размножению спектральных линий, нелинейному уширению спектров, появлению постоянной составляющей сейсмического поля.

Рисунок 1 иллюстрирует преобразования спектров распространяющихся в грунтовых слоях интенсивных сейсмических волн: представлены ре-

зультаты тестирования численных моделей поведения грунта в пунктах Порт-Айленд и СЖК* при землетрясении 1995 г. В Кобе гауссовским белым шумом (длительность тестирующих сигналов была выбрана достаточно большой, ~40 мин, для получения гладких спектров, а их интенсивность выбиралась так, чтобы возбуждаемые в грунте напряжения и деформации в среднем совпадали с напряжениями и деформациями, возбуждаемыми при землетрясении, – для оценки степени нелинейности отклика грунта при землетрясении). Результаты представлены для пяти из десяти 1.5-секундных интервалов (1-го, 3-го, ...). Как видно из рисунка, спектры колебаний на поверхности принимают форму, близкую к $E(f) \sim f^{-k}$. В слоях на промежуточных глубинах (16 и 32 м в Порт-Айленде; 24.9 м в СЖК) формы спектров показывают резонансное усиление отдельных составляющих. Наряду с резонансным усилением имеет место взаимодействие спектральных компонент, образуются высоко- и низкочастотные комбинационные гармоники. При этом энергия распространяющихся сейсмических волн перераспределяется по спектральной полосе, спектральные пики сглаживаются и результирующий спектр сигнала на поверхности грунта стремится принять предельную форму $E(f) \sim f^{-k}$. Относительные деформации в грунте в обоих пунктах достигали $\sim 10^{-3}$ в поверхностных слоях и $\sim 10^{-5}$ на глубине.

В табл. 1 приведены оценки коэффициента k , полученные в численном моделировании для спектра колебательной скорости $V(t)$ в пяти 1.5-секундных интервалах (соответствующих интервалам на рис. 1), а также оценки k , сделанные по велосиграммам землетрясения 1995 г. в Кобе. В Порт-Айленде, ближайшей к разломной плоскости станции (2 км от разломной плоскости), наблюдалось разжижение грунта при землетрясении; нелинейные искажения распространяющихся сигналов велики, и все спектры сигналов на

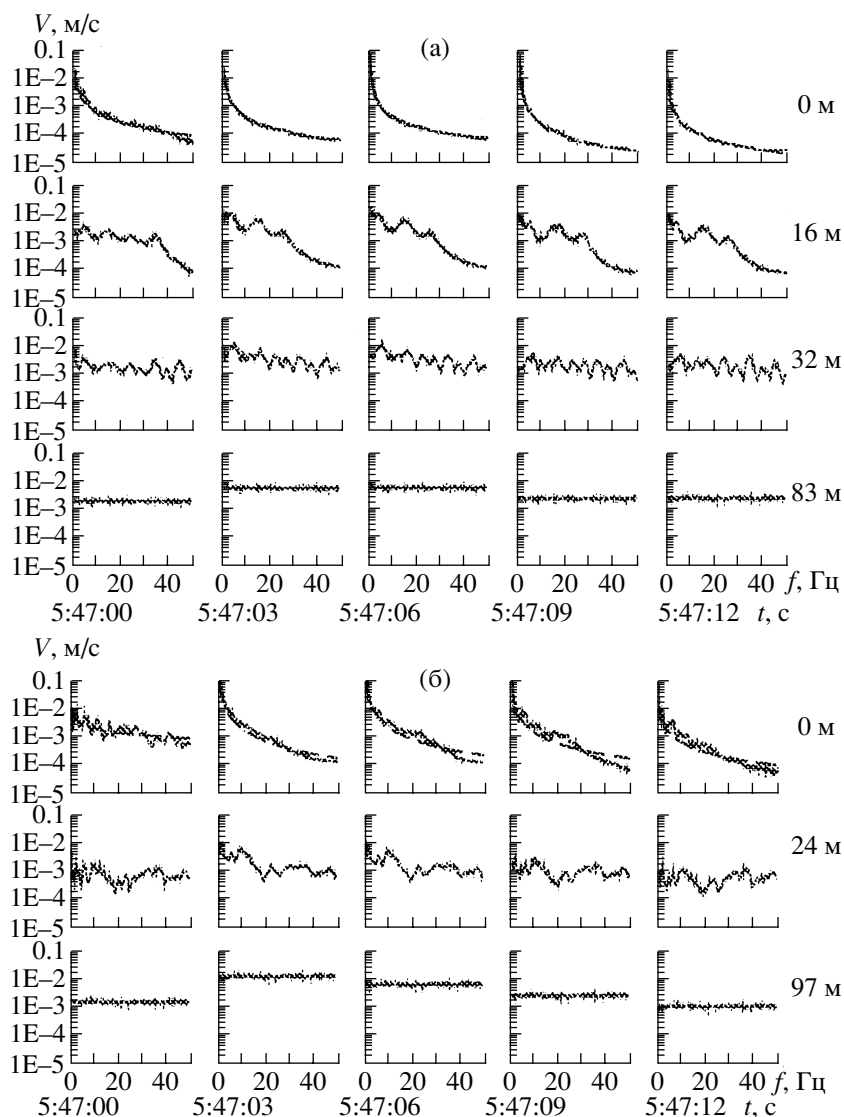


Рис. 1. Спектры тестирующих сигналов гауссовского белого шума в грунтовых слоях на глубинах установки регистрирующих приборов скважинных групп в Порт-Айленде (а) и СЖК (б) в пяти 1.5-секундных интервалах в продолжение сильных движений; компонента В-3 (восток-запад).

поверхности принимают сглаженную форму, близкую к предельной $E(f) \sim f^{-k}$ (см. рис. 1). Как видно из таблицы, k с развитием разжигания (интервалы 7 и 9) лишь незначительно изменяется во времени, оставаясь в пределах 1.13–1.44. В СЖК (6 км от разломной плоскости) нелинейность поведения грунта несколько меньше, чем в Порт-Айленде, и вариации k более заметны. В случаях, когда спектры сигналов на поверхности можно достаточно точно аппроксимировать зависимостью $E(f) \sim f^{-k}$, значения k близки к 1.3–1.4. В СЖК в интервалах, где интенсивность колебаний достаточно высока (в 3-м интервале), $k \sim 1.26$ –1.51, что близко к значениям k для Порт-Айленда. Оценки k , рассчитанные по велосиграмам землетрясения в Кобе, представлены в по-

следней колонке табл. 1. Они в целом близки к значениям, полученным в численном моделировании.

При анализе реальных акселерограмм также наблюдается возрастание низкочастотных компонент и сглаживание спектральных пиков в колебаниях на поверхности. Это ясно видно на примере спектров акселерограмм землетрясения 1995 г. в Кобе в Порт-Айленде и СЖК (рис. 2). Спектры сигналов на поверхности и на ~100 м заметно различаются, что говорит о существенной нелинейности отклика грунта. Таким образом, входные сигналы любого спектрального состава преобразуются на поверхности в сигналы со спектром $E(f) \sim f^{-k}$, т.е. информация о спектральном составе волн, бегущих из очага землетрясения,

полностью или частично теряется в результате нелинейных искажений сейсмических волн в приповерхностных грунтах.

В акустике описание трансформации широкополосных спектров относится к проблеме акустической турбулентности. Для простых акустических волн измеряемые статистические характеристики нелинейных возмущений удается рассчитать точно. Найдено общее выражение для корреляционной функции случайного процесса в произвольном сечении нелинейной среды через двухмерную характеристическую функцию входного сигнала. Для нормального процесса найдены формулы, связывающие спектральную плотность в среде с корреляционной функцией на входе [4, 5]. Если на входе нелинейной системы широкополосный шум, аномально низкое затухание высокочастотных компонент говорит о перекачке энергии вверх по спектру [6–8]. Также происходит перекачка энергии в низкочастотную часть спектра. Спектр широкополосного акустического шума расширяется из-за нелинейных взаимодействий как в высоко-, так и в низкочастотную области [9].

Наибольший интерес представляет равновесная форма спектрального распределения или универсальный закон спада на высоких частотах. По данным многих исследователей, при сильной нелинейности в области существования развитых ударных фронтов спектр мощности спадает как $\sim \omega^{-2}$, поскольку амплитуды гармоник, формирующих разрыв, уменьшаются как $\sim \omega^{-1}$ [4]. Такая

Таблица 1. Коэффициент k , оцененный в пяти 1.5-секундных интервалах в численных экспериментах и по записям землетрясения 1995 г. в Кобе (EQ) для двух горизонтальных компонент восток–запад (В–З) и север–юг (С–Ю)

Место	Направление	1	3	5	7	9	EQ
Порт-Айленд	В–З	1.33	1.35	1.24	1.31	1.28	1.21
	С–Ю	1.31	1.35	1.28	1.25	1.22	1.39
СЖК	В–З	0.31	1.51	1.43	1.3	1.08	1.46
	С–Ю	0.25	1.26	1.48	1.45	1.42	1.39

зависимость получена теоретически в приближении хаотических фаз для среды без дисперсии в инерционных (без источников и стоков энергии) интервалах частот [10].

В случае, когда имеются распределенные в пространстве источники, возбуждающие волны в нелинейной среде, распространение этих волн описывается неоднородными нелинейными уравнениями, правая часть которых – случайная функция, например уравнениями Бюргерса или уравнениями простых волн [9]. Рассчитывая корреляционные функции шумовых волн для приближенных решений этих уравнений и по ним спектры интенсивности волн, также получаем, что в квазистационарном спектре подчеркнуты низкочастотные компоненты, что обычно объясняется укрупне-

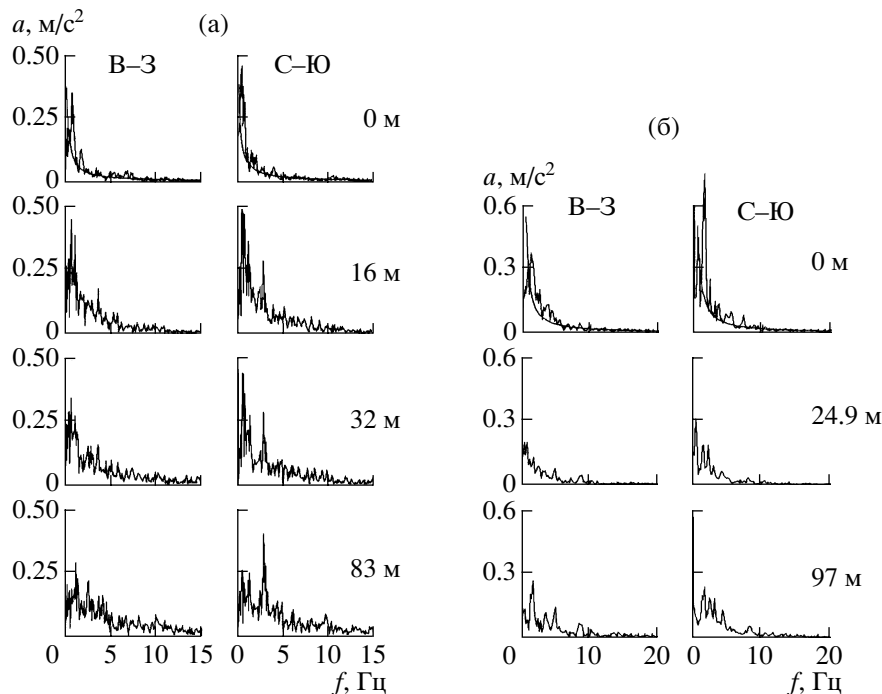


Рис. 2. Спектры акселерограмм землетрясения 1995 г. в Кобе, зарегистрированных скважинными группами в Порт-Айленде (а) и СЖК (б); компоненты В–З (восток–запад) и С–Ю (север–юг).

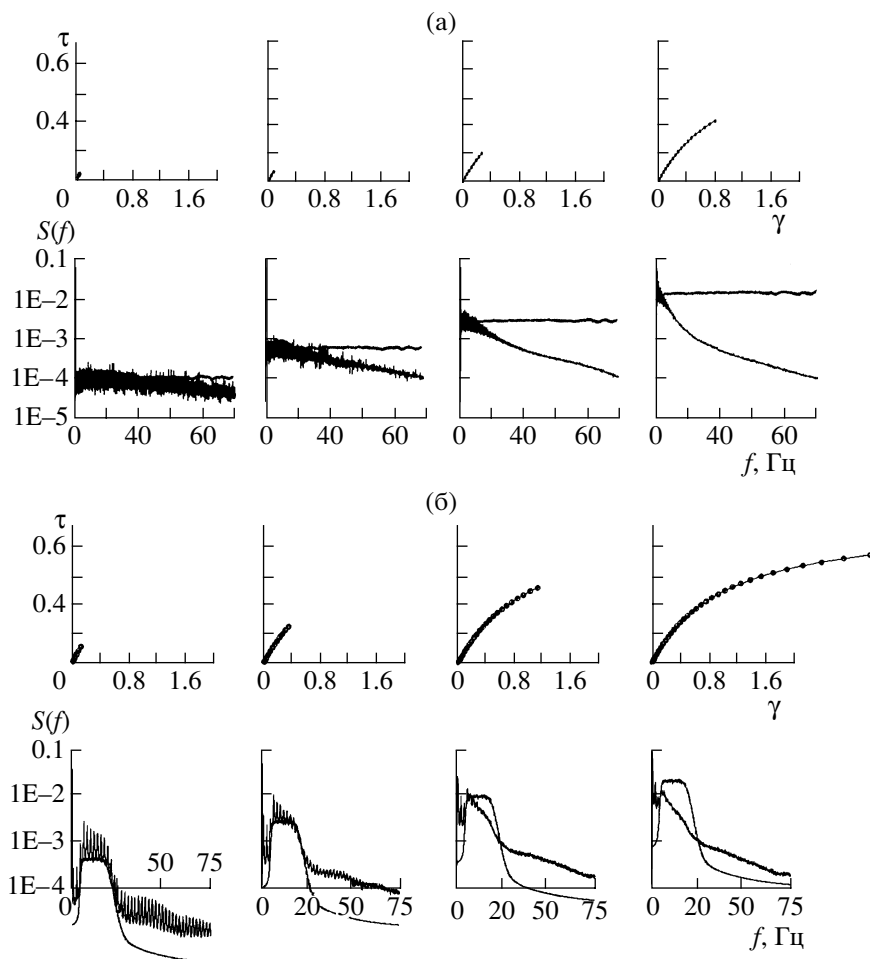


Рис. 3. Линейный и нелинейный отклики простого грунтового разреза на гауссовский белый шум (а), узкополосный шум различной интенсивности (б). Вверху – рабочие интервалы нелинейных зависимостей напряжение–деформация (напряжения и деформации нормированы, как описано в [12]), внизу – спектры колебаний на поверхности.

нием масштабов поля из-за слияния движущихся разрывов. Высоочастотная асимптотика, формируемая нелинейностью, связана со структурой фронта долгоживущих ударных волн, которая имеет вид ω^{-2} . Иногда при малых обратных числах Рейнольдса Γ ($\Gamma = x_p/x_d$, т.е. при малых отношениях характерных нелинейной x_p и диссипативной x_d длин волн) степенная асимптотика переходит в экспоненциальную вида $\exp(-\beta\omega)$ [9].

Как отмечается в обзорной работе [9], подчеркивание низкочастотных составляющих носит общий характер и физически связано с тем, что высокочастотная диссипация не в состоянии воспрепятствовать накоплению энергии в области низких частот. В соответствии с соотношениями Мэнли–Роу низкочастотные моды не передают энергию высокочастотным, тогда как высокочастотные моды могут распадаться, передавая энергию низкочастотным модам [11]. Аналогичные закономерности, таким образом, установлены и для сейсмических волн.

Механизмы трансформации спектров интенсивных сейсмических волн в приповерхностных грунтах важны для инженерной сейсмологии, поскольку связаны с проблемами усиления сейсмических волн в грунтовых толщах. Усиление зависит от уровня сейсмического воздействия, что связано, в частности, с зависимостью поглощения от интенсивности сейсмических волн. При распространении интенсивных волн в нелинейных грунтах, согласно теории, включаются нелинейные механизмы поглощения, не зависящие от диссипативных свойств среды [9], и в сейсмологии установлен рост коэффициента поглощения в осадочных породах при возрастании интенсивности сейсмических волн [12].

В следующих численных экспериментах исследовалась трансформация спектров сейсмических волн в приповерхностных грунтах: изучалось распространение широко- и узкополосных шумовых сигналов в грунтах различного состава и водонасыщенности. На рис. 3а и 3б представлены спек-

тры сигналов на поверхности в случаях линейного и нелинейного отклика простого грунтового разреза, 200-метровой толщи аллювиальных пород с плавным возрастанием сейсмических скоростей с глубиной, на гауссовский белый шум (а) и узкополосный (б) шум различной интенсивности. Как видно из рисунков, при нелинейном отклике грунта с возрастанием интенсивности входного сигнала спектр колебаний на поверхности плавно спадает в сторону высоких частот и принимает форму $E(f) \sim f^k$. При возрастании интенсивности входного шумового узкополосного сигнала спектры колебаний на поверхности также стремятся преобразоваться к виду $E(f) \sim f^k$; эта форма спектра достигается при сильных проявлениях нелинейности отклика грунта, при этом энергия из полосы частот входного сигнала переходит как в высоко-, так и в низкочастотные области спектра. В случае линейного отклика форма спектра сигнала на поверхности не изменяется (спектр линейного отклика для наглядности сглажен, периодичность спектров связана с реверберацией в грунтовом слое).

Результаты моделирования откликов других различных грунтовых разрезов на гауссовский белый шум показывают, что амплитуды низкочастотных колебаний при нелинейном отклике грунта практически не изменяются по сравнению с линейным случаем, а амплитуды колебаний средне- и высокочастотного диапазонов уменьшаются из-за нелинейного затухания. Это согласуется с результатами [13], где методами численного моделирования акселерограмм сильных землетрясений показано, что нелинейность отклика грунта ослабляет колебания в среднем диапазоне частот. Низкочастотные компоненты при этом не ослабляются, а высокочастотные несколько возрастают.

Таким образом, преобразование спектров к виду $E(f) \sim f^k$ в приповерхностных грунтах происхо-

дит вследствие нелинейной (гистерезисной) диссипации и перераспределения энергии колебаний в спектре посредством взаимодействия волн. Подчеркивание низкочастотных составляющих согласуется с соотношениями распадной неустойчивости Мэнли–Роу, согласно которым передача энергии низкочастотных колебаний в высокочастотные затруднена, но облегчена распад высокочастотных колебаний и передача их энергии низкочастотным колебаниям [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlenko O.V., Irikura K. // Pure and Appl. Geophys. 2003. V. 160. P. 2365–2379.
2. Павленко О.В. // ДАН. 2004. Т. 398. № 6. С. 803–809.
3. Павленко О.В. // ДАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 247–251.
4. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 302 с.
5. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 521 с.
6. Руденко О.В., Чиркин А.С. // ДАН. 1974. Т. 214. № 5. С. 1045–1050.
7. Howell G.P., Morfey C.L. In: IX Intern. Symp. on Nonlinear Acoustics. Leeds, 1981. P. 37–41.
8. Morfey C.L. In: Proc. X Intern. Symp. on Nonlinear Acoustics. Kobe, 1984. P. 199–204.
9. Руденко О.В. // УФН. 1986. Т. 149. № 3. С. 413–447.
10. Кадомцев В.В., Карпман В.И. // УФН. 1971. Т. 103. № 2. С. 27–48.
11. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
12. Hardin B.O., Drnevich V.P. // J. Soil Mech. and Found. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 1972. V. 98. P. 603–624.
13. Yu G., Anderson J.G., Siddharthan R.V. // Bull. Seism. Soc. Amer. 1992. V. 83. P. 218–244.