

УДК 550.347.097.33

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТА В ПРИРАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2000 Г. В ТОТТОРИ (ЯПОНИЯ)

© 2004 г. О. В. Павленко

Представлено академиком В.И. Осиповым 22.03.2004 г.

Поступило 23.03.2004 г.

Акселерограммы землетрясения, которое произошло в октябре 2000 г. в провинции Тоттори (Япония) ($M = 7.3$, глубина очага ~ 11 км) и было зарегистрировано станциями сети сильных движений Kik-Net, дают очевидные свидетельства нелинейности отклика грунта в приразломных зонах. По записям станций Kik-Net восстановлены напряжения и деформации, действовавшие в верхних слоях грунта в продолжение сильных движений; для этого применен разработанный автором метод, который ранее использовался для изучения отклика грунта при землетрясении 1995 г. в Кобе. Построенные модели поведения грунта при землетрясении в Тоттори использованы для оценки вызванных сильными движениями изменений модулей сдвига в грунтовых слоях. Подобие зависимостей напряжение–деформация, описывающих поведение однотипных грунтов при землетрясениях в Кобе и Тоттори, свидетельствует о принципиальной возможности прогнозировать отклик грунта при будущих землетрясениях в пунктах, где известны состав грунта и скоростной разрез и можно оценить входной сигнал от будущего землетрясения.

Записи землетрясений последних лет, в частности землетрясения 1995 г. в Кобе (Япония), с очевидностью показали существенную нелинейность отклика грунта в приразломных зонах. При землетрясении в Кобе нелинейно-упругое поведение грунта было идентифицировано в пунктах, расположенных на удалениях до 16 км от разломной плоскости; в этих пунктах оценено содержание нелинейных компонент в отклике грунта. Нелинейные компоненты составляли до $\sim 60\%$ интенсивности отклика грунта на удалениях ~ 2 км от разломной плоскости и $\sim 10\text{--}15\%$ интенсивности отклика на удалениях ~ 15 км от разломной плоскости [1, 2]. Получить такие оценки стало возможным по записям сильных движений, сделан-

ных вертикальными группами. В настоящее время повсеместно на земном шаре в сейсмичных районах разворачиваются сети вертикальных групп, которые предназначены для детального изучения отклика верхних слоев грунта при сильных землетрясениях. Вертикальная группа обычно состоит из 2–4 трехкомпонентных акселерометров, установленных на поверхности и в скважине на различных глубинах, до глубин $\sim 100\text{--}200$ м. Записи вертикальных групп позволяют восстановить напряжения и деформации, действовавшие при землетрясении в грунтовых слоях от поверхности до глубины установки наиболее заглубленного акселерометра [3]. Численное моделирование и анализ акселерограмм землетрясения 1995 г. в Кобе показали, что вблизи разломной плоскости нелинейность отклика грунта существенно выше, чем это ранее учитывалось компьютерными программами нелинейного анализа отклика грунта. Поведение грунтовых слоев при сильных сейсмических воздействиях определяется их составом, водонасыщенностью и глубиной залегания [3].

Землетрясение в Тоттори произошло 6 октября 2000 г. приблизительно в 13 : 30 по местному времени. Магнитуда землетрясения составила $M = 7.3$, плоскость разрыва имела протяженность ~ 30 км и простиралась на глубину ~ 10 км под углом, близким к вертикали. Верхняя граница плоскости разрыва проходила приблизительно на глубине 1 км от поверхности; на поверхности практически не заметно следов разрыва. По своим характеристикам, магнитуде и глубине очага землетрясение в Тоттори подобно землетрясению 1995 г. в Кобе. Согласно электронной базе данных сети Kik-Net, на территории Японии землетрясение было зарегистрировано 220 станциями Kik-Net, расположенными на эпицентральных расстояниях от 7 до ~ 626 км; записи станций Kik-Net предоставили хорошую возможность для исследования отклика грунтов в приразломных зонах и проверки выводов, сделанных ранее на основе изучения акселерограмм землетрясения в Кобе. В настоящей работе проанализированы ак-

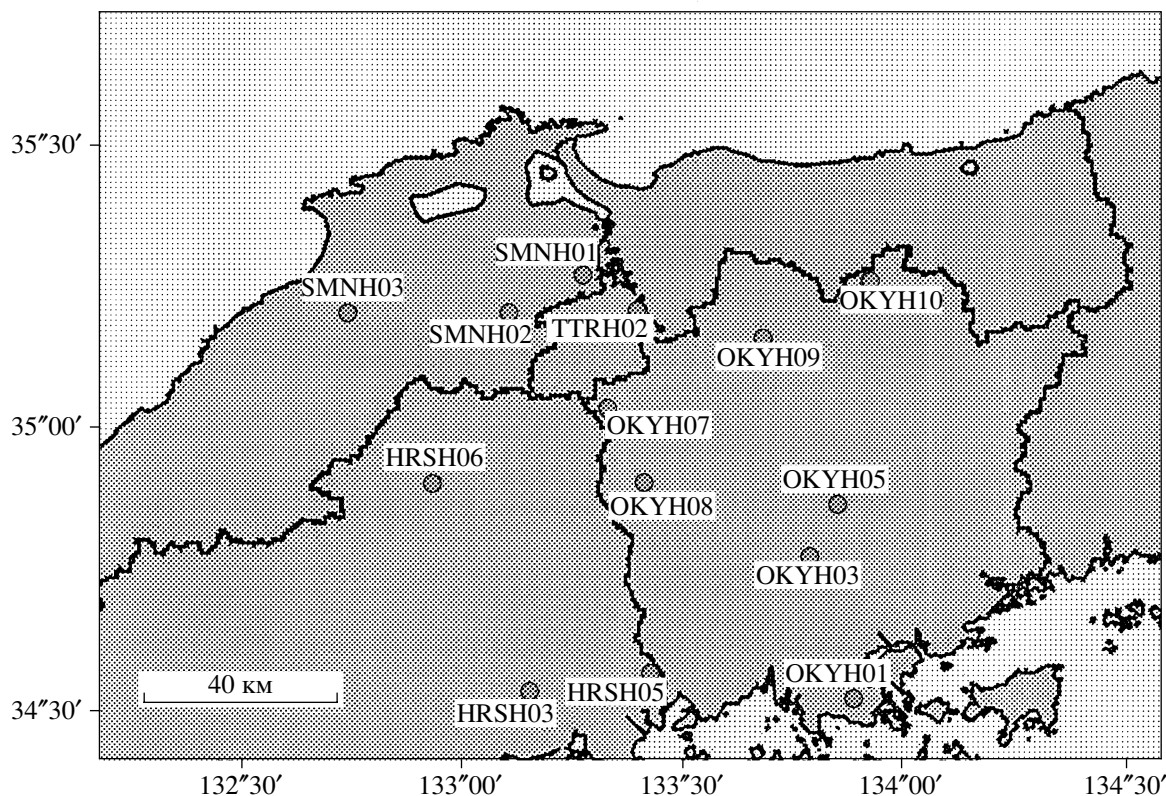


Рис. 1. Расположение станций сети Kik-Net и разломной плоскости землетрясения в Тоттори у северного побережья острова Хонсю (Япония).

селерограммы землетрясения в Тоттори и оценены напряжения и деформации, вызванные сильными движениями в грунтовых слоях на глубинах 0–100 м на различных расстояниях от очага. Для обработки выбраны записи станций Kik-Net с эпицентрными расстояниями не более 100 км, на которых зарегистрированные ускорения на поверхности превышали 100 Гл (поскольку при меньших ускорениях проявления нелинейности отклика грунтов будут очевидно слабы).

На рис. 1 показано расположение гипоцентра землетрясения и ближайших к нему станций сети Kik-Net. Станции Kik-Net включают два акселерометра, один из которых установлен на поверхности, а другой на глубине порядка 100 или 200 м. В записях землетрясения, сделанных вблизи очага, отчетливо видны проявления нелинейности отклика грунта: существенные различия форм и частотного состава сейсмических сигналов на поверхности и на глубине, усиление низкочастотных компонент при распространении сигналов вверх, к поверхности.

Нелинейно-упругое поведение грунта идентифицировано для следующих станций сети Kik-Net: ближайших к эпицентру станций TTRH02 и SMNH01 (эпицентрные расстояния 7 и 8 км, максимальные зарегистрированные ускорения

927.2 и 720.4 Гл соответственно) и для станций HRSH06, SMNH03, HRSH05, где отмечаются лишь слабые проявления нелинейности (эпицентрные расстояния 57–80 км, максимальные ускорения 131–240 Гл). Для других станций сети Kik-Net, зарегистрировавших землетрясение в Тоттори и расположенных на удалении 24 км и более, либо толщина грунтового слоя меньше 10 м и преобладают резонансные, а не нелинейные эффекты, либо отсутствуют профильные данные, либо максимальные зарегистрированные ускорения меньше 100 Гл.

Метод оценивания зависимостей напряжение–деформация в грунтовых слоях на различных глубинах на основе записей вертикальных групп детально описан в работе [3]. Для расчетов грунтовые профили на станциях Kik-Net были разделены на группы слоев в соответствии с профильными данными (составом грунта, скоростями P- и S-волн): выделены верхние группы слоев (10–12 м), где скорости S-волн не превышают ~300 м/с, и нижние группы, где скорости S-волн выше 300 м/с и возрастают с глубиной. Поскольку в верхних слоях скорости P-волн, как правило, достаточно высоки (>600 м/с), что указывает на присутствие грунтовых вод в этих слоях, для описания поведения слоев верхних групп выбраны зависимости

напряжение–деформация, характерные для приповерхностных водонасыщенных грунтов; при больших деформациях они отклоняются в сторону оси напряжений (рис. 2). Такие зависимости использовались для описания поведения верхних слоев грунта в пунктах СЖК и ТКС при землетрясении в Кобе [2, 3]. Поведение слоев нижних групп описывалось с помощью зависимостей напряжение–деформация, полученных в лабораторных экспериментах Хардина и Дрневича (Hardin, Drnevich) [4] (рис. 2). Рассчитывали распространение падающих вертикально снизу сейсмических волн вверх к поверхности; в качестве входных сигналов использовали записи скважинных акселерометров. Для расчетов были сгенерированы параметрические серии зависимостей напряжение–деформация выбранных типов для двух групп слоев и последовательно протестированы (оценивались отклонения рассчитанных акселерограмм на поверхности и на глубине от зарегистрированных) для нахождения зависимостей, дающих наиболее близкое соответствие зарегистрированных и рассчитанных акселерограмм. Для учета временных изменений в поведении грунтов “входные сигналы” были разделены на интервалы продолжительностью по 1.5 с и вычисления проводили последовательно, интервал за интервалом. Программа расчета написана автором на основе алгоритма, описанного в работе [5].

Профильные данные, предоставленные на вебсайте Kik–Net, включают лишь сведения о составе грунта и приблизительных значениях скоростей P- и S-волн в слоях, поэтому предварительно были оценены необходимые для расчетов максимальные сдвиговые напряжения τ_{\max} и уточнены значения скоростей S-волн в слоях. Для этого решалась обратная задача с использованием генетического алгоритма, входными данными которой служили записи 20 афтершоков, зарегистрированных каждой станцией в течение месяца после основного толчка. Предельно допустимые значения τ_{\max} в слоях выбирали на основе эмпирических соотношений с учетом состава грунта, скоростей S-волн и действовавших в среде эффективных напряжений. Для верхних слоев принимали значения 0.4–1.3 бар, затем в зависимости от скоростей P- и S-волн и глубины выбирали ту или иную скорость возрастания τ_{\max} до значений порядка 6–10 бар на глубине ~100 м. В соответствии с методикой Хардина и Дрневича [4] для осадочных пород следует принять скорость возрастания τ_{\max} с глубиной ~2.94 бар на каждые 100 м, однако для рассматриваемых грунтовых профилей была принята несколько большая скорость возрастания с учетом того, что залегающие на глубинах более 30 м породы достаточно плотные: граниты, базальты, андезиты, диориты, аргиллиты и диабазы.

Оценены вызванные землетрясением напряжения и деформации в грунтовых слоях на некоторых станциях сети Kik–Net. На рис. 2 представлены результаты, полученные для станций TTRH02 и SMNH01: зарегистрированные и рассчитанные акселерограммы землетрясения и соответствующие зависимости напряжение–деформация в грунтовых слоях. Хорошее согласие рассчитанных и зарегистрированных акселерограмм свидетельствует о значимости полученного вертикального распределения напряжений и деформаций в грунтовых слоях. Как видно из рис. 2, на ближайших к разломной плоскости станциях TTRH02 и SMNH01 наблюдались сильные проявления нелинейности отклика грунта. Расчеты показывают, что на этих станциях поведение верхних слоев грунта в продолжение сильных движений невозможно описать с помощью одной неизменной зависимости напряжение–деформация; зависимость меняет свою форму в продолжение сильных движений, т.е. реологические свойства грунта вблизи разломной плоскости изменяются под действием интенсивных сейсмических волн. Аналогичный результат был получен при анализе записей землетрясения в Кобе [3]. По материалам этих двух землетрясений радиус зоны изменения реологических свойств грунта можно оценить в ~15–20 км.

Напряжения и деформации в грунтовых слоях до глубин ~100 м были также оценены для станций HRSH06, SMNH03 и HRSH05, которые расположены на удалении более 55 км от разломной плоскости (результаты расчетов для этих станций в данной статье не приводятся). Отклик грунта на этих станциях был практически линейным, и поведение верхних слоев грунта можно описать одной зависимостью напряжение–деформация, т.е. реологические свойства грунта в продолжение сильных движений не изменялись.

Грунтовые условия на станциях OKYH07, OKYH08, OKYH09 и OKYH10 таковы (плотный грунт), что поведение грунта на этих станциях можно смоделировать с помощью одной зависимости напряжение–деформация, полученной в лабораторных экспериментах Хардина и Дрневича [4]. При этом рассчитанные и зарегистрированные акселерограммы достаточно хорошо согласуются между собой. На станциях OKYH05, OKYH03, OKYH11 и SMNH05 толщина мягкого осадочного слоя меньше 10 м, а расстояния до эпицентра достаточно велики и отклик грунта практически линейен. В поверхностных записях этих станций преобладают колебания одной частоты, т.е. определяющую роль играют резонансные, а не нелинейные эффекты; однако и в этих случаях поведение грунта можно достаточно точно смоделировать с помощью зависимости напряжение–деформация, полученной в лабораторных экспериментах Хардина и Дрневича [4].

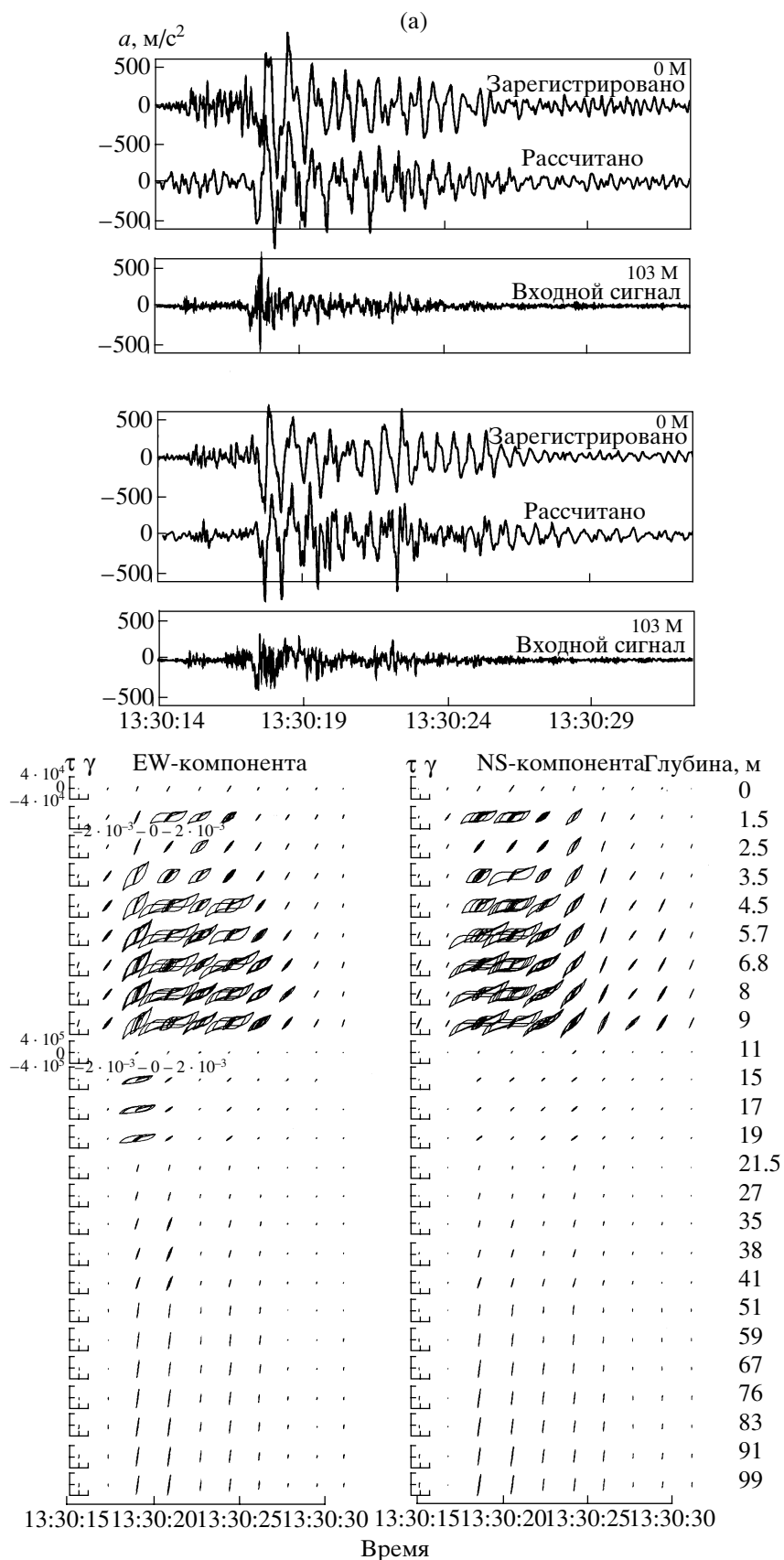


Рис. 2. Акселерограммы землетрясения в Тоттори, зарегистрированные и рассчитанные, и соответствующие зависимости напряжение–деформация в грунтовых слоях, изменяющиеся во времени в продолжение сильных движений, на станциях TTRH02 (a) и SMNH01 (б) (напряжения в кПа, деформации в отн. ед.).

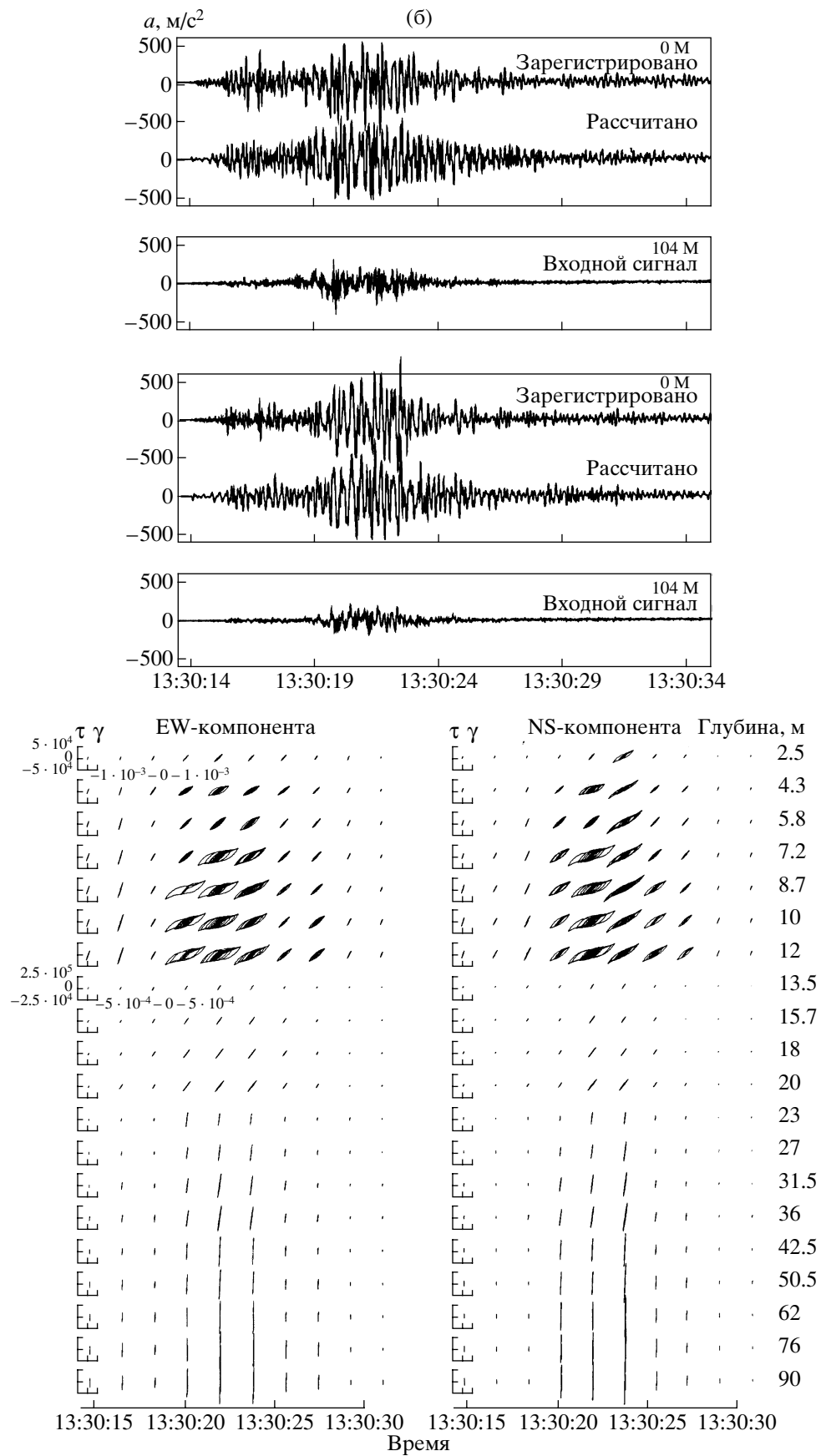


Рис. 2. Окончание.

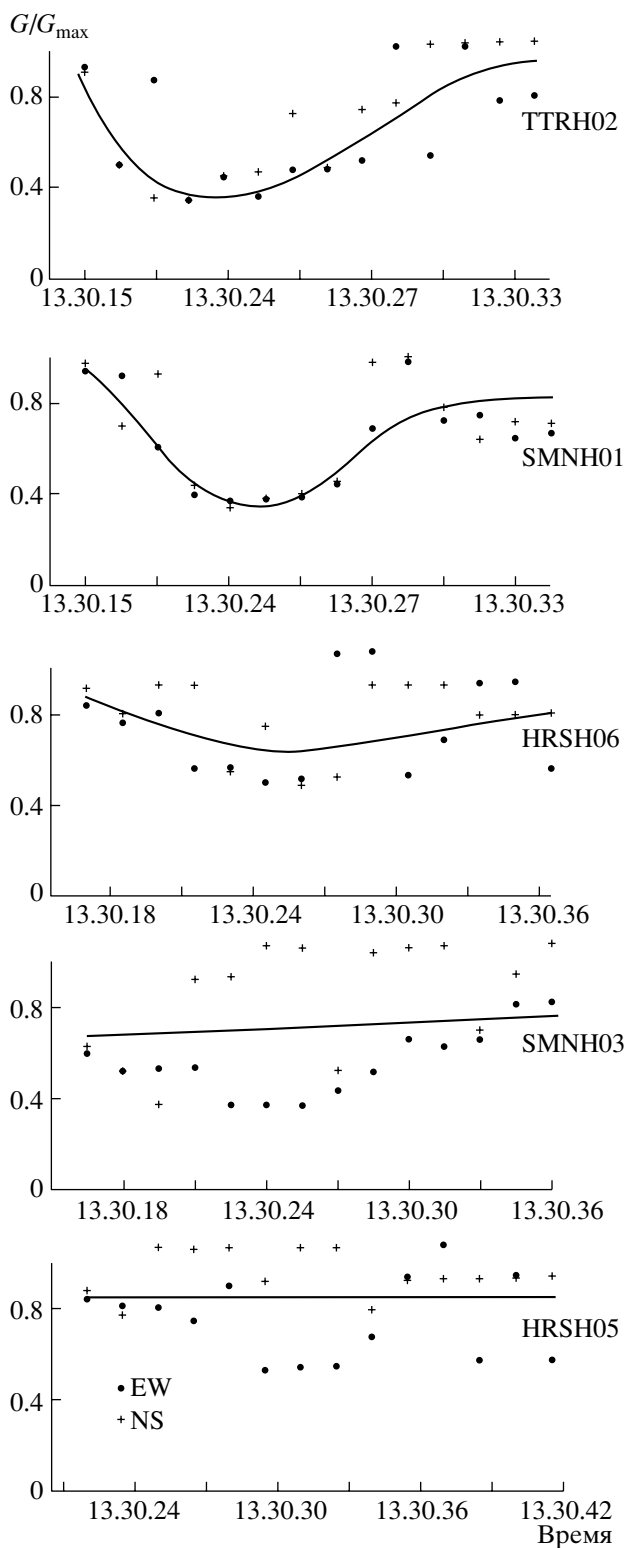


Рис. 3. Временные изменения модулей сдвига в верхних 10–20 м грунта в продолжение сильных движений на некоторых станциях сети Kik-Net.

По найденным зависимостям напряжение–деформация на ряде станций было оценено уменьшение модулей сдвига в продолжение сильных

движений. Как видно из рис. 2, наибольшие изменения в поведении грунтов наблюдаются в верхних 10–15 м, тогда как поведение грунтов на больших глубинах стабильно. На рис. 3 представлены изменения модулей сдвига в продолжение сильных движений для некоторых станций Kik-Net. Модули сдвига оценивали как средние по группам верхних слоев и по колебаниям в пределах каждого временного интервала наклоны зависимостей напряжение–деформация. Максимальное уменьшение модулей сдвига на станциях TTRH02 и SMNH01 составило ~60%, на станции HRSH06 – ~15%, а на станциях SMNH03 и HRSH05 изменений модуля сдвига практически не заметно.

Отметим существенное усиление низкочастотных компонент в поверхностных акселерограммах станции TTRH02, связанное с проявлениями нелинейности в отклике грунта. Как известно [6, 7], в результате взаимодействий отдельных спектральных компонент распространяющихся сейсмических сигналов в нелинейной среде (приповерхностных грунтах) происходит перераспределение энергии между этими компонентами таким образом, что спектр сигналов на поверхности стремится принять формулу $E \sim f^{-n}$. При этом низкочастотные спектральные компоненты усиливаются, острые спектральные пики, если они присутствовали во “входном” сигнале, сглаживаются отсутствовавшие во “входном” сигнале компоненты появляются, в целом спектр выравнивается и стремится принять форму $E \sim f^{-n}$. Тенденции таких спектральных преобразований проявляются на записях станций TTRH02 и SMNH01 (рис. 2). На других станциях вследствие малой толщины мягкого осадочного слоя часто преобладают резонансные эффекты и преобразования спектров, вызванные нелинейностью отклика грунта, практически не заметны.

Наиболее важным результатом данной работы является заключение, что зависимости напряжение–деформация, подобные представленным на рис. 2, и характерные для водонасыщенных (полностью или частично) приповерхностных грунтов, описывают поведение грунтов при сильных воздействиях *in situ* во многих реальных ситуациях и, возможно, являются наиболее распространенным типом зависимостей для приповерхностных грунтов. Очевидно, что грунты, поведение которых описывается такими зависимостями, усиливают сейсмические сигналы, интенсивность которых превышает некоторый уровень.

Между тем, по мнению некоторых сейсмологов (см. [8, 9] и др.), нелинейность отклика верхних слоев грунта при сильных землетрясениях однозначно связывается с ослаблением усиления сейсмических сигналов. Снижение усиления сигналов в приповерхностных грунтах при сильных землетрясениях по сравнению со слабыми даже

используется как метод диагностики нелинейности отклика грунта [8, 9]. Широко используемая в мировой практике сейсмического микрорайонирования программа SHAKE построена на зависимости напряжение–деформация, характерной для сухих грунтов (зависимости “мягкого” типа [10]) и также однозначно подразумевает снижение усиления сейсмических сигналов при увеличении амплитуды сигналов.

Однако наши результаты, полученные по материалам двух землетрясений, в Кобе и Тоттори, показывают необоснованность такой точки зрения. Очевидно, что использование программы SHAKE может привести к недооценке сейсмического эффекта землетрясений в районах с мягкими приповерхностными грунтами, где уровень грунтовых вод подходит близко к поверхности, и при сильных землетрясениях будет происходить усиление, а не ослабление сейсмических сигналов в приповерхностных грунтах вследствие нелинейности. В таких случаях нужно использовать программу, построенную с учетом зависимости напряжение–деформация, характерной для водонасыщенных грунтов.

Автор благодарит вебсайт сети Kik–Net <http://www.kik.bosai.go.jp> за акселерограммы земле-

трясения Тоттори, профильные данные и характеристики регистрирующих приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavlenko O.V., Irikura K. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 19. P. 36–1–36–4.
2. Павленко О.В. // ДАН. 2003. Т. 289. № 2. С. 247–251.
3. Pavlenko O.V., Irikura K. // Pure and Appl. Geophys. 2003. V. 160. P. 2365–2379.
4. Hardin B.O., Drnevich V.P. // Proc. Amer. Soc. Civil Eng., J. Soil Mech. Found. Div. 1972. V. 98. P. 667–692.
5. Joyner W.B., Chen T.F. // Bull. Seism. Soc. Amer. 1975. V. 65. P. 1315–1336.
6. Кадомцев В.В., Карпман В.И. // УФН. 1971. Т. 103. № 2. С. 27–48.
7. Pavlenko O.V. // Bull. Seism. Soc. Amer. 2001. V. 91. P. 381–396.
8. Beresnev I.A., Wn K.-L., Yeh Y.T. // Bull. Seism. Soc. Amer. 1995. V. 85. P. 496–515.
9. Field E.H., Johnson P.A., Beresnev I.A., Zeng Y. // Nature. 1997. V. 390. № 6660. P. 599–602.
10. Зволинский Н.В. // Вопр. инж. сейсмологии. 1982. Т. 23. С. 4–19.