ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 491, № 2, с. 96–102

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.347.097.33

МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ АНОМАЛЬНО ВЫСОКИХ УСКОРЕНИЙ >1*g* НА МЯГКИХ ГРУНТАХ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

© 2020 г. О. В. Павленко*

Представлено академиком РАН А.О. Глико 12.02.2020 г.
Поступило 13.02.2020 г.
После доработки 15.02.2020 г.
Принято к публикации 16.02.2020 г.

Рассмотрены физические механизмы, дающие вклад в генерацию аномально высоких ускорений (выше 1*g*) при землетрясениях на мягких приповерхностных грунтах, для которых типичным считалось нелинейное поведение при сильных движениях, снижающее ускорения. Построены модели поведения грунта (вертикальные распределения напряжений и деформаций в грунтовых слоях), которые показали, что нелинейность отклика грунта на станциях, зарегистрировавших ускорения >1*g*, как правило, была невысока, т.к. входные в грунтовые толщи сигналы имели невысокие ускорения: *PGA* ~ 120–270 см/с^2. Генерация аномально высоких ускорений на станциях с мягкими приповерхностными грунтами, очевидно, была связана с: (1) откликом приповерхностных грунтов, эффективно усиливавших сильные движения, благодаря формам зависимостей напряжение–деформация, (2) резонансным усилением колебаний в приповерхностных мягких слоях, (3) эффектами направленности излучения (при сильных землетрясениях с протяженными очагами), т.е. конструктивной интерференцией сейсмических волн в направлениях распространения трещин в очаге.

Ключевые слова: аномально высокие ускорения, упрочнение грунта, резонансные эффекты, эффекты направленности, зависимости напряжение–деформация жесткого типа

DOI: 10.31857/S2686739720040131

В последние десятилетия в мире развиваются сети сейсмических наблюдений, накапливаются записи сильных движений. После катастрофического землетрясения в Кобе 17.01.1995 г. в Японии развернуты плотные сети наблюдений K-NET (~1000 наземных акселерометров) и KiK-net (~800 вертикальных групп); сети сильных движений развиваются и в других странах: США, Италии, Новой Зеландии [1]. Число записей с зарегистрированными ускорениями, превышающими 1*g*, растет, и если раньше такие наблюдения интерпретировались как ошибки регистрации [2], теперь сейсмологи убеждаются в надежности наблюдений. Поскольку именно ускорения лучше, чем другие параметры коррелируют с разрушениями при землетрясениях, вероятность возникновения аномально высоких ускорений в том или ином месте важна при оценке сейсмической опасности.

В [3, 4] по записям станций KiK-net изучено поведение грунтов в приразломных зонах землетрясения Тохоку 2011 г. ($M_w = 9.0$), при котором 19 станций сильных движений зарегистрировали ускорения, превышающие 1*g*, максимальное ~3*g*. Построенные модели поведения грунта показали, что не наблюдалось широкого распространения нелинейности поведения мягких грунтов и падения модулей сдвига при сильных движениях. Наиболее существенные проявления нелинейности были вблизи очага, на побережье. На удаленных станциях (в регионе Канто), зарегистрировавших аномально высокие ускорения, модули сдвига в грунтовых слоях возрастали с началом сильных движений и достигали максимумов в моменты наибольшей интенсивности сильных движений, показывая упрочнение грунта, затем спадали; их снижение сопровождалось ступенчатым снижением преобладающих частот колебаний [3]. Как показано в [4], это можно объяснить проявлениями эффектов направленности излучения при распространении трещины в очаге в юго-западном направлении и их предельным случаем — генерацией ударной волны (волны Маха).

Аналогичные явления упрочения грунта и генерации высоких ускорений наблюдались (в меньшей степени) и в северном Хонсю (регионе Тохоку). Модули сдвига не падали при сильных движениях во многих пунктах, и поведение мягких и плотных грунтов было сходным. Для объяс-

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия
**E-mail: olga@ifz.ru*

Таблица 1. Станции KiK-net с мягкими грунтами, зарегистрировавшие ускорения >1*g* с 1996 по 2019 гг.

Дата	M_W	*h*, км	Станция	*r*, км	$PGA_{пов}$, Гал			$PGA_{глуб}$, Гал			*A*	d/V_s	УГВ, м
					EW	NS	UD	EW	NS	UD			
6.10.2000	6.7	11	TTRH02	7	753	927	776	575	357	318	1.9	11/210	11
19.03.2011	5.7	5	IBRH13	1	526	1026	733	117	265	128	4.2	16/269	16
5.07.2011	5.0	7	WKYH01	1	1064	754	386	317	137	97	4.4	10/204	2
14.04.2016	6.2	11	KMMH16	6	925	760	1399	178	237	127	4.2	15/194	15
16.04.2016	7.0	12	KMMH16	7	1157	653	873	243	159	196	4.4	15/194	15
6.09.2018	6.6	35	IBUH01	26	929	1316	1060	255	182	84	5.4	12/191	4

нения этих особенностей предлагаются 2 механизма, которые могли действовать совместно: 1) эффекты направленности излучения при распространении трещины в северо-западном направлении, 2) уплотнение грунтов как их отклик на длительные динамические воздействия (~3 мин сильных движений), подобно эффектам виброупрочнения. Очевидно можно ожидать аналогичных эффектов упрочения грунта и генерации аномально высоких ускорений и при будущих сильных землетрясениях.

Помимо землетрясения Тохоку, базы данных по сильным движениям KiK-net и K-NET содержат еще ~30 записей землетрясений с аномально высокими ускорениями. Больший интерес представляют записи групп KiK-net, поскольку они позволяют изучить поведение грунта, построив модели его поведения, т.е. оценив напряжения и деформации в грунтовых слоях в разные моменты времени в продолжение сильных движений. В табл. 1 приведены данные о землетрясениях, при которых зарегистрированы ускорения, превышающие 1*g* (моментная магнитуда M_W, глубина очага *h*), и о станциях KiK-net с мягкими грунтами, зарегистрировавших аномальные ускорения (эпицентральные расстояния *r*, пиковые ускорения *PGA* (peak ground accelerations) на поверхности $PGA_{пов}$ и на глубине установки нижнего датчика $PGA_{глуб}$). Коэффициенты усиления колебаний грунтовыми толщами *A* рассчитаны как отношения $PGA_{пов}$ к $PGA_{глуб}$, усредненные по двум горизонтальным компонентам. Грунтовые условия описываются параметром d/Vs: *d* – мощность поверхностного слоя мягкого грунта, *Vs* – скорость *S*-волн в слое. Средние скорости *S*-волн в верхних 30 м грунта Vs_{30} лежат в интервале 280–335 м/с; лишь для WKYH01 Vs_{30} выше: 463 м/с. В последней колонке приведены данные об уровне грунтовых вод (УГВ). За исключением IBUH01, все станции были расположены в приразломных зонах землетрясений с неглубокими очагами (*h* ~ 5–12 км), на эпицентральных расстояниях 1–7 км (табл. 1); это условия, при которых мягкие грунты вели себя существенно нелинейно при прошлых сильных землетрясениях, при этом нелинейное поглощение заметно снижало ускорения.

Построены модели поведения грунтов на изучаемых станциях и оценены изменения модулей сдвига. Метод построения моделей поведения грунта описан в работе [5]. Рассчитывается распространение падающих вертикально снизу поперечных волн (записей заглубленного датчика) в толще осадочных слоев; для описания поведения грунта в слоях генерируются серии параметрических нелинейных зависимостей напряжение–деформация и тестируются для нахождения зависимостей, дающих наилучшее соответствие расчетов и наблюдений на поверхности. Для прослеживания временных изменений в поведении грунта входной сигнал разбивается на малые временные интервалы, которые анализируются последовательно.

Построенные модели поведения грунта показали, что нелинейность отклика грунта во всех случаях, за исключением станции TTRH02, была невысока, т.к. входные в грунтовые толщи сигналы были несильны: *PGA* ~ 120–270 см/с^2, и коэффициенты их усиления грунтовыми толщами были достаточно высоки: 4.2–5.4 на горизонтальных компонентах (табл. 1). Рассмотрим случаи регистрации высоких ускорений.

1. Поведение грунтов в приразломных зонах *землетрясения в Тоттори* 2000 г. (M_W ~ 6.7; *h* ~ 11 км) изучалось в работе [7]; на рис. 1 представлены модели поведения грунта на станции TTRH02. Видно резонансное усиление колебаний в верхних ~10 м мягких песчаных грунтах; дополнительное усиление связано с жестким характером зависимостей напряжение–деформация (типичным для водонасыщенных несвязных грунтов), при котором напряжения быстро возрастают после достижения определенного уровня деформаций. Это приводит к возрастанию ускорений – волновым формам–спайкам в акселерограммах на поверхности. Импульсный характер входного в грунтовую толщу сигнала (в большей степени на EW)

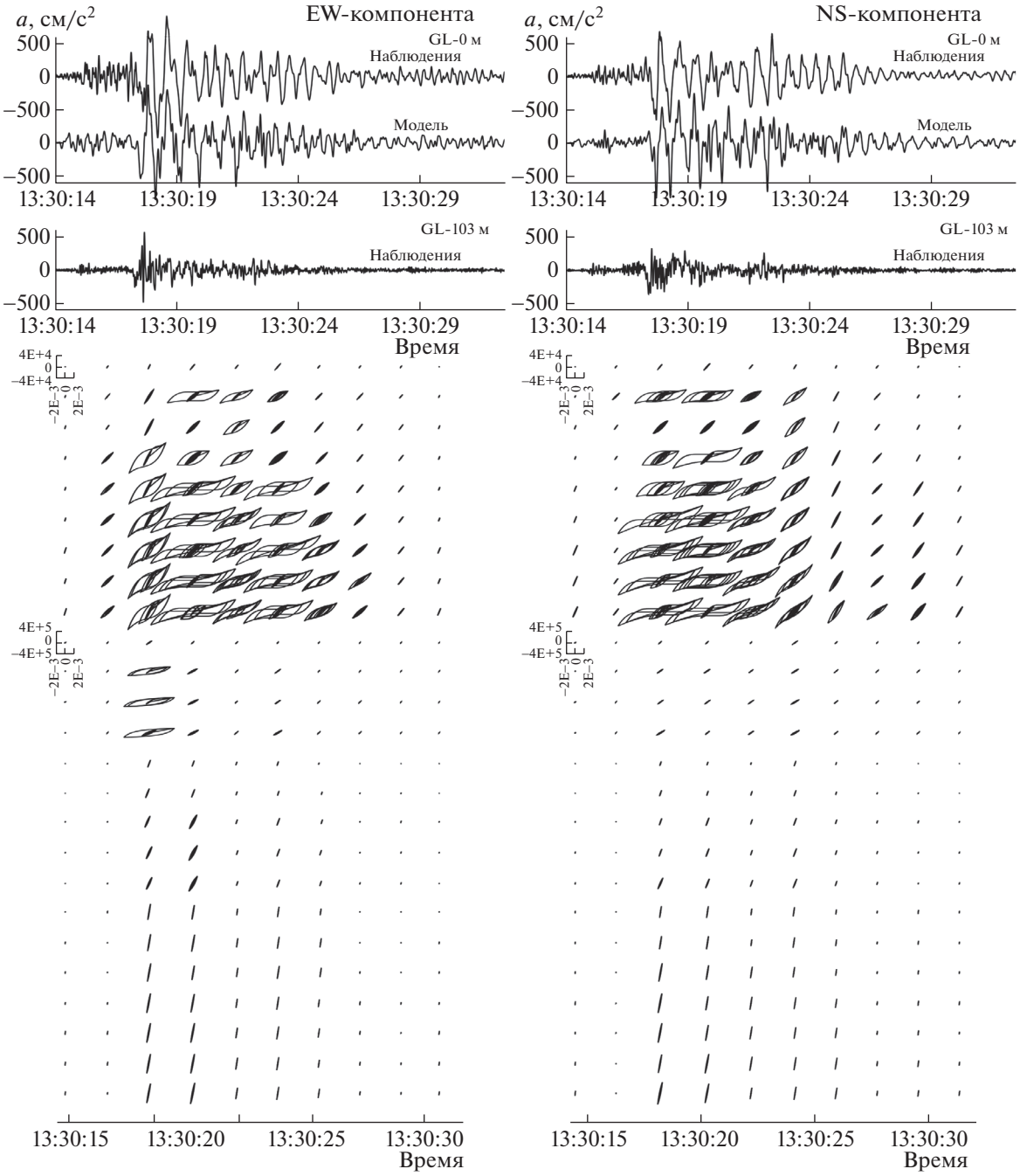

Рис. 1. Модель поведения грунта на станции TTRH02 при землетрясении в Тоттори 6 октября 2000 г. Сдвиговые напряжения – в Па, деформации – в отн. ед.; длительность анализируемых временных интервалов 1.5 с.

мог дать дополнительное сжатие грунтов и усиление (рис. 1).

Несмотря на существенную нелинейность отклика грунта (следствие высоких ускорений в основании грунтовой толщи ~358–574 см/с^2), проявляющуюся в нелинейных зависимостях напряжение–деформация, падении модулей сдвига, низком коэффициенте усиления колебаний грунтовой толщей (~1.9) и ослабляющую колебания из-за нелинейного поглощения, механизмы усиления колебаний все же привели к высоким ускорениям на поверхности, полный вектор которых выше 1g: ~1142.4 см/с^2.

2. Станции IBRH13 и WKYH01 зарегистрировали аномально высокие ускорения, превышающие 1g, при *афтершоке землетрясения Тохоку 19.03.2011 г.* (M_W ~ 5.7; h ~ 5 км) – *станция*

IBRH13, полный вектор ускорений ~1084.4 см/с^2 *и при землетрясении в Вакаяма 05.07.2011 г.* (M_w ~ ~ 5.0; h ~ 7 км) – *станция WKYH01, полный вектор* ~1084.1 см/с^2.

Обе станции оказались в очаговых зонах (r ~ ~ 1 км). Очевидно, причиной аномально высоких ускорений был отклик приповерхностных грунтов, эффективно усиливших сильные движения (в начальные моменты), благодаря формам зависимостей напряжение–деформация, практически линейным и близким к вертикали.

Отклик грунта на станции IBRH13 (рис. 2) с низким уровнем грунтовых вод (~16 м) описывается зависимостями напряжение–деформация мягкого типа в верхних 16 м песчаных грунтов (Vs ~ 170–280 м/с) выше УГВ. Аналогичными зависимостями, практически линейными и близкими к вертикали, описывается поведение грунтов на станции WKYH01, где УГВ ~2 м, но верхние ~10 м сложены глинистыми (связными) грунтами, поведение которых не жестко. На обеих станциях уровень входных в грунтовые толщи сигналов достаточно низок: PGA ~ 117–265 см/с^2 и ~137–317 см/с^2, и отклик грунта близок к линейному, а коэффициенты усиления колебаний грунтовыми толщами велики: 4.2 и 4.4. Расположение станций над разломной плоскостью обусловило импульсный характер воздействий и близкие к вертикали зависимости напряжение–деформация в начальные моменты (рис. 2). Оценки модулей сдвига показывают, что в моменты максимальной интенсивности сильных движений модули сдвига были также максимальны, что внесло существенный вклад в генерацию аномально высоких ускорений.

3. *Землетрясения в Кумамото: форшок 14.04.2016 г.* (M_w ~ 6.2; h ~ 11 км) *и основной толчок 16.04.2016 г.* (M_w ~ 7.0; h ~ 12 км) *и землетрясение в восточном Ибури 06.09.2018 г.* (M_w ~ 6.6; h ~ 37 км) – примеры землетрясений, при которых генерация аномально высоких ускорений в значительной степени обусловлена эффектами направленности излучения, т.е. конструктивной интерференцией сейсмических волн в направлении распространения трещины в очаге.

Особенность землетрясений Кумамото – большая длительность сильных движений. В движениях участвовали протяженные сегменты разломов: Хинагу (81 км), Футагава (64 км), Бэппу-Ханэяма; 27-километровый участок сдвинулся на 3.5 м (рис. 3а) [8].

Эффекты направленности излучения определяются сравнением волновых форм записей на станциях, расположенных в разных азимутах относительно очага. Короткие интенсивные колебания на KMMH16 и KMMH02 и растянутые во времени более слабые движения на KMMH14 показывают, что трещина разрыва распространялась в северо-восточном направлении (рис. 3а). Похожие волновые формы наблюдались и при форшоке землетрясения. Аномально высокие ускорения зарегистрированные станцией KMMH16 при форшоке и основном толчке (полный вектор ~1579.7 см/с^2 и ~1362.1 см/с^2) очевидно связаны с эффектами направленности излучения, т.е. с конструктивной интерференцией сейсмических волн в направлении распространения трещины.

Модели поведения грунта на станции KMMH16 (УГВ ~15 м; верхние 15 м – песчаные грунты, Vs ~ 110–240 м/с, ниже – вулканогенные породы, Vs ~ 400–500 м/с) сходны с моделями поведения грунта на станции IBRH13: поведение мягких песчаных слоев ~15 м выше УГВ моделируется зависимостями напряжение–деформация, близкими к линейным. Нелинейность отклика грунта невелика, т.к. уровень входного в грунтовую толщу сигнала достаточно низок: PGA ~ 159–243 см/с^2, и усиление высоко: ~4.2–4.4. Слабая нелинейность поведения грунта на станциях IBRH13 и KMMH16 очевидно также связана с низким уровнем грунтовых вод: поведение сухих песчаных грунтов “более линейно”, чем водонасыщенных. Очевидно, на станции KMMH16 и отклик грунтов, эффективно усиливших колебания (при форшоке в большей степени, т.к. модули сдвига снизились при форшоке и не восстановились к основному толчку), и резонансные эффекты в верхних слоях дали вклад в генерацию высоких ускорений, но также и эффекты направленности в значительной степени привели к усилению колебаний и аномально высоким ускорениям.

Землетрясение в восточном Ибури отличается большой глубиной очага, h ~ 35 км (табл. 1). Разломная плоскость ~30 км с наклоном к горизонту ~70°; разрыв в очаге распространялся вверх, с большой составляющей в направлении станции IBUH01 [9] (рис. 3б). Станция IBUH01 (r ~ 26 км) зарегистрировала ускорения, превышающие 1g: ~1504.8 см/с^2 (полный вектор), хотя не была ближайшей к эпицентру. Станции HDKH01 (r ~ 18 км), HDKH04 (r ~ 20 км) и IBUH02 (r ~ 22 км), зарегистрировали меньшие ускорения ~668.8, ~426.1 и ~715.7 см/с^2. Очевидно, здесь также существенны эффекты направленности излучения. Аномально высокие ускорения на станции IBUH01 – в большой степени результат конструктивной интерференции сейсмических волн, т.е. эффектов направленности излучения. Верхние ~12 м на IBUH01 – мягкие песчано-глинистые породы (Vs ~ 130–250 м/с), ниже – вулканогенные породы; скорости S-волн нарастают с глубиной от 450 (на 12 м) до 890 м/с (на 100 м), УГВ ~ 4 м. Модули сдвига в верхних 12 м снижались с началом сильных движений и восстановились по окончании

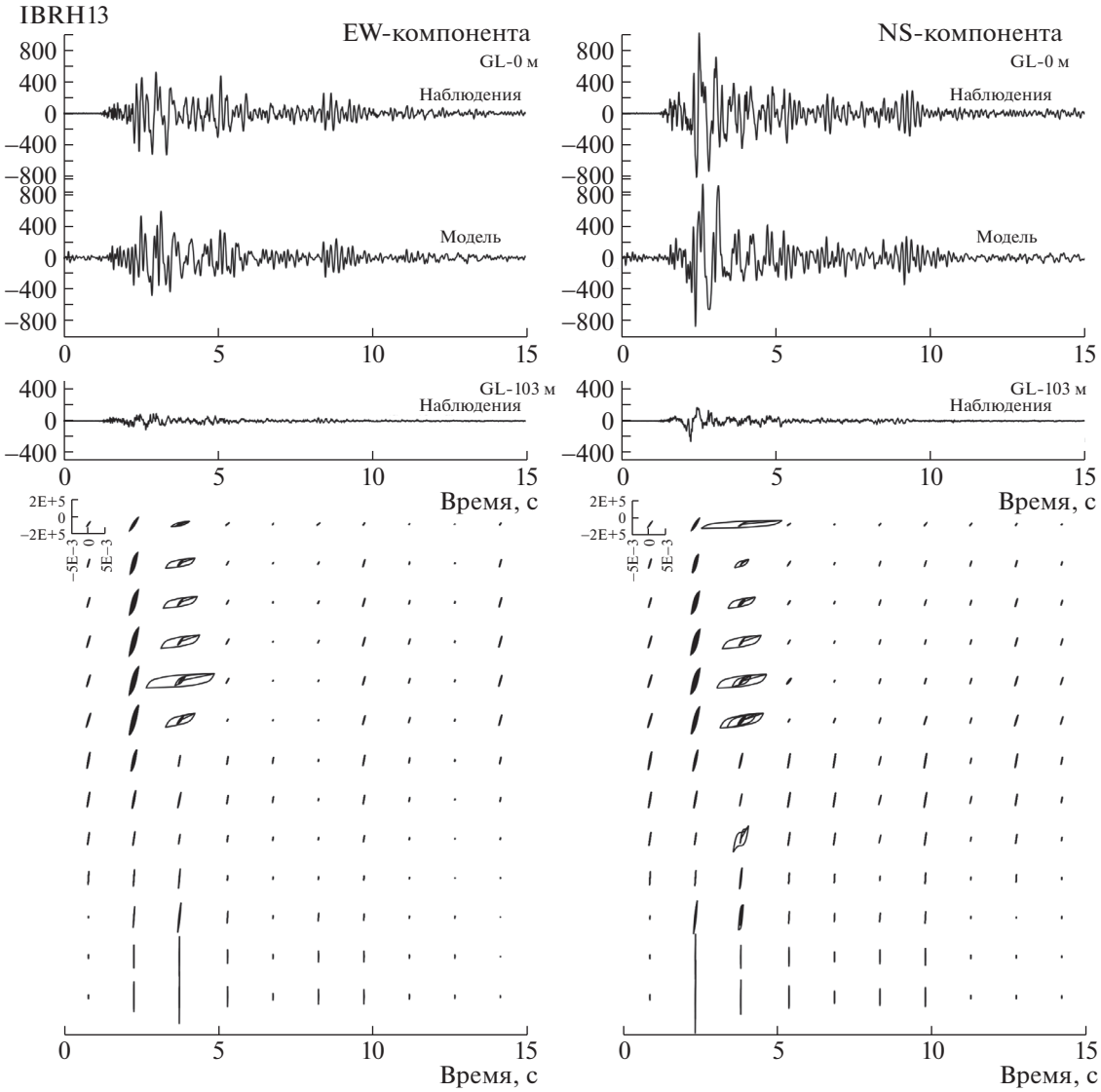

Рис. 2. Модель поведения грунта на станции IBRH13 при землетрясении 19 марта 2011 г. Сдвиговые напряжения – в Па, деформации – в отн. ед.; длительность анализируемых временных интервалов 1.5 с.

сильных движений. В нижележащих слоях, испытавших разжижение (как показывают модели поведения грунта), модули сдвига спадают после достижения максимальной интенсивности сильных движений.

Эффекты направленности, очевидно, усилили колебания в основаниях грунтовых толщ на KMMH16 и IBRH01, но и уплотнили сами грунты: усиление колебаний на этих станциях выше, чем на близлежащих станциях с мягкими грунтами (A_{KMMH16} ~4.2, A_{KMMH14} ~ 3.1, A_{KMMH02} ~ 2.7; A_{IBUH01} ~ ~ 5.4, A_{IBUH02} ~4.9, A_{HDKH04} ~ 2.8). Сходные эффекты наблюдались при землетрясении Тохоку [3, 4].

Таким образом, генерация аномально высоких ускорений на мягких грунтах, очевидно, представляет собой результат действия нескольких механизмов – отклика грунта, эффективно усиливающего колебания (практически линейного, с близкими к вертикали зависимостями напряжение–деформация), резонансных эффектов в приповерхностных слоях и эффектов направленности излучения, т.е. конструктивной интерференции сейсмических волн в направлениях распространения трещины в очаге (в случаях сильных землетрясений с протяженными очагами). Вероятно, имеет место также дополнительное сжатие приповерхностных грунтов вследствие импульсного характера сейсмического воздействия (вблизи очага), либо вследствие эффектов направленности, так что сжатые грунты ведут себя более жестко и более эффективно усиливают сейсмические колебания.

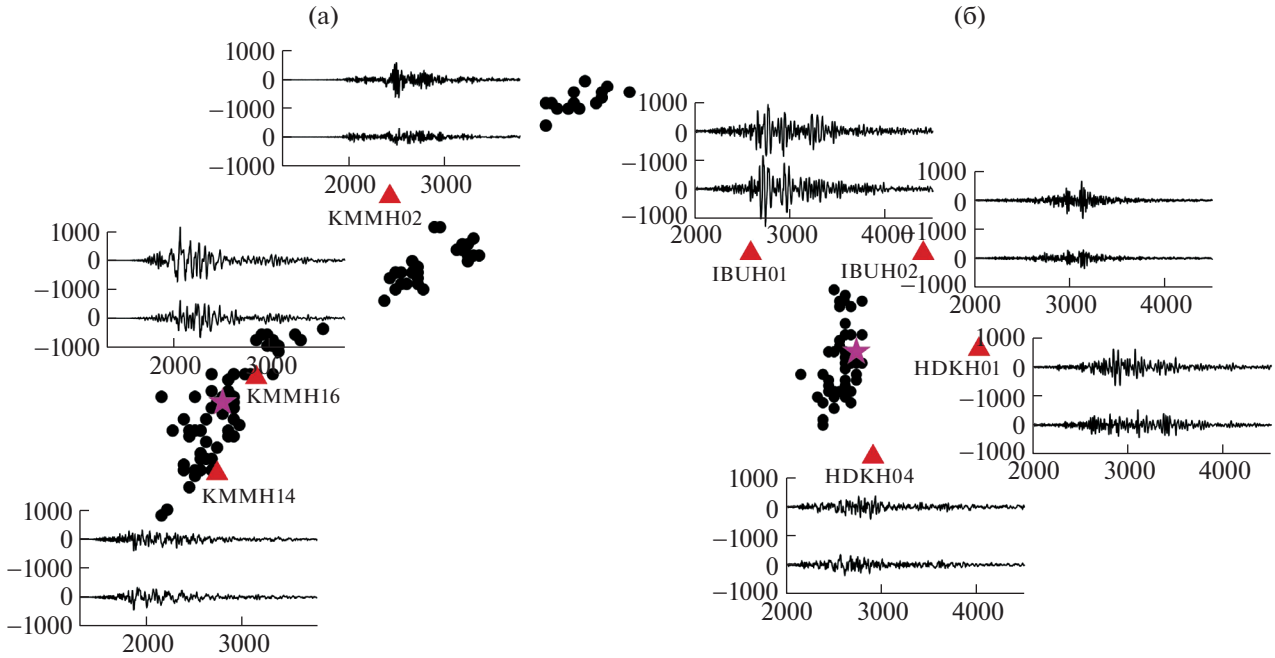

Рис. 3. Акселерограммы (компоненты EW и NS) записей землетрясений в Кумамото (а) и в восточном Ибури (б). Черные точки – афтершоки, происшедшие в первые 24 часа после основного толчка – показывают проекции разломных плоскостей землетрясений на земную поверхность; звездочки – положения эпицентров.

Записи землетрясений и параметры грунтовых профилей предоставлены сайтом сетей сильных движений Японии www.k-net.bosai.go.jp.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17–05–01143.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Suzuki A., Iervolino I.* // Annals of Geophysics. 2017. V. 60. № 5. S0551. https://doi.org/10.4401/ag-7391
2. *Wen K.-L., Peng H.-Y., Tsai Y.-B., Chen K.-C.* // Bull. Seism. Soc. Am. 2001. V. 91. P. 1255–1266.
3. *Pavlenko O.V.* // Journal of Seismology. 2016. V. 20. № 3. P. 803–826.
4. *Pavlenko O.V.* // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174. № 8. P. 2909–2924.
5. *Pavlenko, O.V., Irikura K.* // Pure and Applied Geophysics. 2003. V. 160. P. 2365–2379.
6. *Joyner W.B., Chen T.F.* // Bull. Seism. Soc. Am. 1975. V. 65. P. 1315–1336.
7. *Pavlenko O.V., Irikura K.* // Bull. Seism. Soc. Am. 2006. V. 96. P. 2131–2145.
8. *Yoshida K., Miyakoshi K., Somei K., et al.* // Earth Planets Space. 2017. V. 69. P. 64. https://doi.org/10.1186/s40623-017-0649-8
9. *Katsumata K., Ichiyanagi M., Ohzono M.,et al.* // Earth Planets Space. 2019. V. 71. P. 53. https://doi.org/10.1186/s40623-019-1032-8

MECHANISMS OF GENERATION OF ABNORMALLY HIGH ACCELERATIONS >1*g* ON SOFT SOILS DURING EARTHQUAKES

O. V. Pavlenko[#]

Shmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]*E-mail: olga@ifz.ru*

Presented by Academician of the RAS A.O. Gliko February 12, 2020

Physical mechanisms are discussed that contribute to the generation of abnormally high accelerations >1*g* in earthquakes at soft soil sites, where nonlinear behavior reducing accelerations was considered typical. Models of soil behavior (vertical distributions of stresses and strains in soil layers) were constructed, which showed that the nonlinearity of soil response at sites recorded accelerations exceeding 1g was usually low, because the

imposed motion to soil layers was rather low: PGA ~ 120–270 cm/s^2. The generation of abnormally high accelerations at sites with soft subsurface soils was obviously related to: (1) the response of subsurface soils that effectively amplified strong motions due to the shapes of the stress-strain relations, (2) resonant phenomena in soft subsurface layers, (3) the effects of directivity (during strong earthquakes with extended sources), i.e. constructive interference of seismic waves in directions of crack propagation along the fault planes.

Keywords: abnormally high accelerations, soil hardening, resonant effects, directivity effects, hard-type stress-strain relations