

УДК 550.347

## ОТКЛИК ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ СЛАБЫХ И СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© 2023 г. Е. В. Дещеревская<sup>1</sup>, \*, О. В. Павленко<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, г. Москва, Россия

\*E-mail: deelv1@gmail.com

\*\*E-mail: olga@ifz.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 09.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Анализируется отклик песчаных и глинистых приповерхностных грунтов (представляющих классы несвязных и связных грунтов) на сейсмические воздействия различной интенсивности по данным наблюдений *in situ* – по записям вертикальных групп японской сети сильных движений KiK-net. Из общего числа станций (~800) для анализа выбрано по 5 станций с приповерхностными песчаными и глинистыми грунтами, представленными в верхних слоях в наиболее чистом виде. Для “песчаных” и “глинистых” станций по методике [Pavlenko, Irikura, 2003] построены и проанализированы модели поведения грунта при сильных движениях, показывающие вертикальные распределения напряжений и деформаций, вызванных землетрясениями, в грунтовых слоях. Получены близкие оценки усиления сейсмических волн в песках и глинах при слабых движениях и близкие зависимости напряжение–деформация, характеризующие поведение приповерхностных грунтов при сейсмических движениях умеренной силы. Выполнен анализ разжижения песчаных грунтов при сильных движениях (землетрясение Тохоку 2011 г., с  $M_w \sim 9.0$ ). Исследовано влияние эффектов протяженных сейсмических очагов (направленность их излучения) на поведение песчаных и глинистых грунтов и усиление в них сейсмических волн. Различия в поведении песчаных и глинистых грунтов отмечены лишь при сильных движениях: в песчаных грунтах возможно разжижение при уровне грунтовых вод порядка нескольких метров от поверхности, а в глинистых грунтах разжижения нет.

**Ключевые слова:** типы грунтов, обводненность грунтов, усиление сейсмических волн в грунтах, нелинейность поведения грунта, эффекты направленности излучения, станции KiK-net.

**DOI:** 10.31857/S000233372304004X, **EDN:** TLDPWF

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема поведения грунтов при землетрясениях в России актуальна, как и во всем мире. Российская Федерация занимает большую по площади территорию, на которой представлены разнообразные приповерхностные грунты. Сотрудниками геологического факультета МГУ проведены исследования и составлена карта распространения приповерхностных грунтов [Инженерная геология..., 2011]. Выделено 11 типов наиболее представительных по площади развития грунтов: 1 – преимущественно скальные; 2 – глинистые; 3 – лессовые; 4 – песчаные; 5 – глинистые с обломочным материалом; 6 – глинистые с лессовым слоем в верхней части разреза (ВЧР); 7 – песчано-глинистые с преобладанием глинистых в ВЧР; 8 – песчано-глинистые с преобладанием песчаных в ВЧР; 9 – торфяные, подстилаемые грунтами разного состава; 10 – глинистые, подстилаемые скальными; 11 – песчаные, подстилаемые скальными.

Грунты представляют собой дисперсные гетерогенные системы, состоящие из твердых частиц, поровое пространство между которыми заполнено водой и воздухом. Другими словами, грунты – это многофазные системы, в общем случае состоящие из твердой, жидкой и газообразной фаз. Однако в сейсмологии (в условиях динамического нагружения) они рассматриваются как сплошные среды, поведение которых описывается зависимостями напряжение–деформация, отражающими содержание и свойства их компонентов [Мишель, Шульман, 1999].

Песчаные и глинистые приповерхностные грунты имеют близкие значения плотности и скорости распространения в них продольных и поперечных сейсмических волн, но относятся к разным группам грунтов [Мишель, Шульман, 1999]. Песчаные принадлежат к группе несвязных грунтов, в которых вода может свободно перемещаться (песчаные, гравелистые, щебнистые, дресвяные и т.п. грунты), глинистые – к группе связных грун-

тов, содержащих в заметных количествах глину, химически связывающую воду.

Наблюдения показывают, что грунтовые воды в значительной степени определяют отклик грунта при сейсмических воздействиях, как правило, повышая амплитуды колебаний на поверхности [Павленко, 2009], поэтому можно ожидать различное поведение глинистых и песчаных приповерхностных грунтов при землетрясениях, по крайней мере, при сильных воздействиях.

Начиная с 1920-х годов, сейсмологи развивают количественные методы оценки влияния локальных условий на параметры колебаний поверхности. Излучаемые очагом сейсмические волны распространяются сначала в кристаллических породах, где сигнал от землетрясения можно рассматривать как функцию магнитуды и расстояния от источника, затем в слоях, которые в инженерной сейсмологии трактуются как базовые (*basement*), и где сейсмические волны не испытывают влияния земной поверхности и залегающих выше грунтов. Затем волны входят в приповерхностные слои грунтов, в которых обычно распространяются практически вертикально вверх, поскольку скорости их распространения быстро уменьшаются при приближении к поверхности.

В результате проведенных исследований установлены три основных механизма преобразований сейсмических колебаний в приповерхностных грунтах:

- переход сейсмических волн в приповерхностные слои с меньшими значениями скоростей и плотностей приводит к возрастанию амплитуд сейсмических колебаний на поверхности, в соответствии с законом сохранения плотности потока сейсмической энергии;

- резонансные явления, захват сейсмических волн грунтовыми слоями с пониженными скоростями также приводят к возрастанию амплитуд сейсмических колебаний на поверхности;

- нелинейность связи напряжение–деформация обычно приводит к уменьшению амплитуд сейсмических колебаний на поверхности (однако в водонасыщенных приповерхностных грунтах может иметь место и увеличение амплитуд колебаний, начиная с некоторого уровня деформаций).

Свидетельства нелинейного поведения грунтов дают инструментальные наблюдения и сравнение записей слабых и сильных землетрясений. В работах [Caillot, Bard, 1990; Chang et al., 1991; Beresnev et al., 1995] сообщалось об уменьшении усиления сейсмических колебаний и некотором снижении резонансных частот в грунтах при колебаниях с пиковыми ускорениями на поверхности  $>0.2$  g ( $\sim 200$  Гал); такие выводы получены в частности по результатам обработки записей сейсмической группы SMART-1 в долине Лотунг на Тайване. Аналогичные эффекты снижения усиления наблюдались на мягких грунтах в районе

залива Сан-Франциско [Darragh, Shakal, 1991]. Яркие свидетельства проявлений нелинейности в поведении грунтов – записи землетрясения 1995 г. в Кобе – сделанные вертикальной сейсмической группой Порт Айленд (PI): наблюдалось практически полное исчезновение высокочастотных составляющих колебаний на поверхности и быстрое затухание горизонтальных компонент ускорения в приповерхностных разжиженных песчаных слоях [Aguirre, Irikura, 1997]. П.-И. Бард отмечает, что все описанные проявления нелинейности наблюдались преимущественно на песчаных грунтах [Bard, 1995].

В то же время сравнение локальных эффектов при слабых и сильных движениях, проведенное в работе [Borcherdt, 1970], показало, что коэффициенты усиления грунтовых толщ при слабых движениях (от подземных ядерных взрывов на полигоне Невада) в диапазоне 0.5–2.5 Гц хорошо коррелируют с вариациями интенсивности колебаний при сильных движениях – землетрясениях 1906 и 1957 гг. в Сан Франциско, что говорит о линейности отклика грунта при сильных движениях. Записи землетрясения 1989 г. в Лома Приета подтвердили применимость полученных коэффициентов усиления для прогноза сильных движений в этом районе [Borcherdt, 1990]. Аналогичное исследование проведено в осадочном бассейне Лос Аламос [Rogers et al., 1984; 1985]. Также получено, что коэффициент усиления слабых движений хорошо коррелирует с коэффициентом усиления при сильных движениях в диапазоне 0.1–5 Гц. Хорошее согласие коэффициентов усиления, определенных по слабым и сильным движениям, получено Тукером и Кингом [Tucker, King, 1984] в осадочном бассейне в Гарме. Не найдено значимых различий в спектральных отношениях в окраинных и срединных частях Гармской долины между слабыми ( $10^{-9}$ – $10^{-3}$  g) и сильными (0.04–0.2 g) движениями в частотном диапазоне 0–50 Гц, т.е. поведение грунта близко к линейному.

Яркий случай применимости линейно-упругой теории – Мичоаканское землетрясение 1985 г. в Мехико. По оценкам автора работы [Singh et al., 1988] колебания поверхности над ложем озера усилились в 8–50 раз по сравнению с областями на холмах при малой вероятности нелинейности поведения грунта вплоть до деформаций  $\sim 0.2\%$ . Линейность отклика грунта подтверждается приблизительным совпадением преобладающего периода колебаний при слабых и сильных движениях [Kobayashi, Midorikawa, 1986].

Также наблюдали квазилинейное поведение плотных грунтов в диапазоне ускорений 0.006–0.43 g авторы работы [Darragh, Shakal, 1991]. Сравнивая отклики аллювиальных пород средней жесткости на слабые и сильные сейсмические воздействия (землетрясение в Лома Приета), авторы работы [Borcherdt, Wentworth, 1995] не нашли статистически значимых различий для боль-

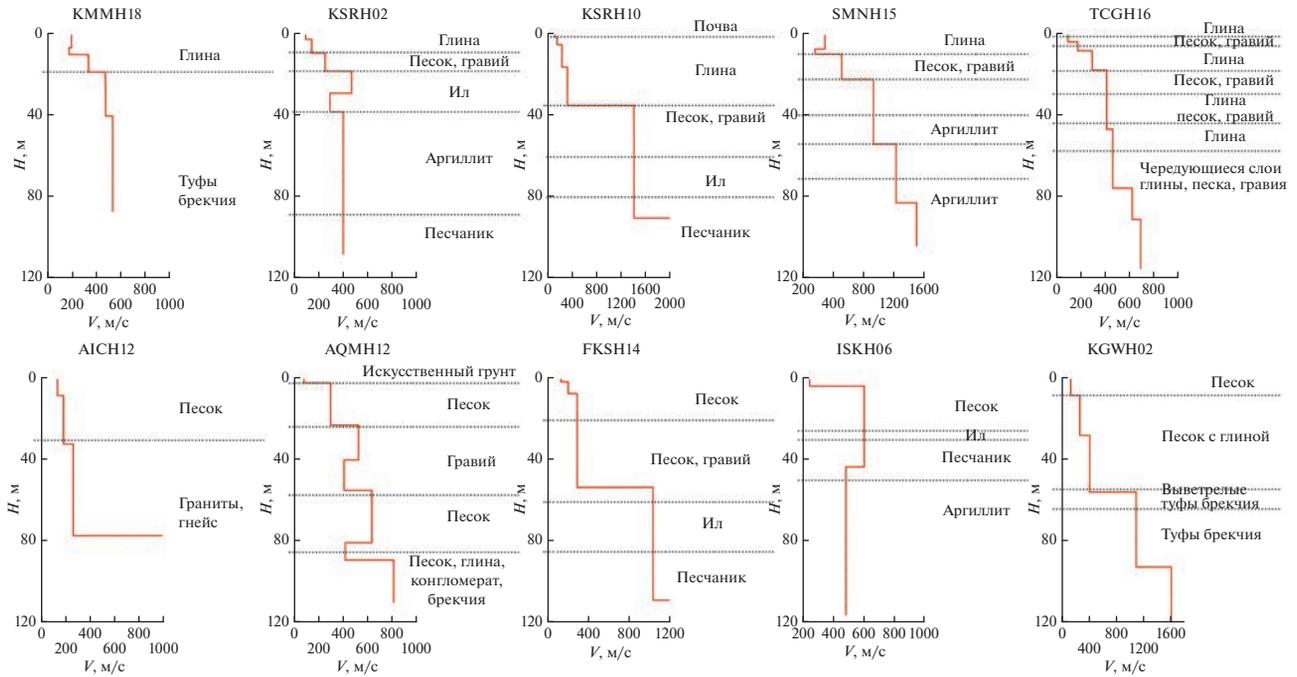


Рис. 1. Грунтовые профили на изучаемых глинистых (верхний ряд) и песчаных (нижний ряд) станциях. Показан состав слоев и скорости поперечных волн  $V_s$  в слоях.

шинства пунктов наблюдения в окрестностях Сан-Франциско и Лос-Анжелеса.

Интересно отметить, что такие, более слабые проявления нелинейности наблюдались в основном на глинистых грунтах [Bard, 1995]. Однако эти заключения должны быть пересмотрены детально, отмечает автор работы [Bard, 1995], поскольку они были сделаны на основе немногочисленных и, возможно, непредставительных наблюдений.

Эта проблема актуальна и для территории России, где широко распространены и глинистые и песчаные грунты, которые часто служат грунтами основания различных сооружений. Подойти к ее решению позволяют появившиеся в последние годы записи сильных движений вертикальными группами сейсмоприемников – станциями KiK-net в Японии.

В настоящей работе на основе накопленных к настоящему времени записей землетрясений, сделанных вертикальными группами KiK-net, изучается отклик песчаных и глинистых грунтов при слабых и сильных движениях.

## ДАННЫЕ

Вертикальная группа KiK-net представляет собой два трехкомпонентных акселерометра, один из которых установлен на поверхности земли, а второй в скважине на глубине ~100 м (иногда ~200 м или больше). Одновременные записи землетрясений, сделанные такой парой приборов,

позволяют изучить поведение грунтовых слоев при сильных движениях от поверхности до глубины установки нижнего прибора.

Для анализа выбраны станции KiK-net с преобладанием вблизи поверхности (в верхних 10–30 м) песчаных и глинистых грунтов в наиболее чистом виде, согласно описаниям грунтовых условий на станциях KiK-net. Нашлось 5 “глинистых” станций – KMMN18, KSRN02, KSRN10, SMNH15 и TCGN16 и 5 “песчаных” станций – AICH12, AQMN12, FKSН14, ISKN06 и KGWN02.

Грунтовые профили для всех изучаемых станций до глубины ~120 м показаны на рис. 1.

Отклик песчаных и глинистых грунтов сравнивается по коэффициентам усиления сейсмических волн в грунтовых толщах, от глубины установки нижнего прибора вертикальной группы до поверхности, и по вертикальным распределениям напряжений и деформаций, возбуждаемых сейсмическими волнами в грунтовых слоях и характеризующих отклик грунта при слабых и сильных движениях.

## МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Сравнение отклика песчаных и глинистых грунтов при слабых движениях ( $PGA_1 \leq 10$ Гал)

В Приложении 1 приведены каталоги землетрясений, зарегистрированных на изучаемых станциях как слабые движения, при которых пиковые ускорения на поверхности на горизонтальных компонентах не превышают ~10 Гал. Отклик

Таблица 1

Станции	Координаты станции: с.ш., в.д.	Кол-во землетрясений	$A_{cp}$	$dA$	$V_{S30}$ , м/с
Станции KiK-net с глинистыми приповерхностными грунтами					
KMMH18	33.003 131.007	31	3.58	0.74	278.5
KSRH02	43.114 144.123	32	4.01	0.64	219.1
KSRH10	43.208 145.117	31	5.48	1.75	212.9
SMNH15	35.523 133.02	24	6.46	1.73	386.1
TCGH16	36.548 140.075	45	5.65	2.60	213.2
Станции KiK-net с песчаными приповерхностными грунтами					
AICH12	34.788 137.106	36	5.84	2.23	163.3
AOMH12	40.585 141.155	43	6.17	1.46	281.0
FKSH14	37.026 140.970	49	5.81	1.35	236.6
ISKH06	37.053 136.821	35	2.51	0.58	500.0
KGWH02	34.198	133.708	32	7.00	1.59

грунта в таких случаях предполагается линейным. Приведены магнитуды землетрясений, координаты и глубины эпицентров, пиковые ускорения, зарегистрированные на глубине ( $PGA_1$ ) и на поверхности ( $PGA_2$ ), а также рассчитанные по ним коэффициенты усиления. Коэффициенты усиления получены как усредненные по 2-м горизонтальным компонентам отношения пиковых ускорений на поверхности и на глубине установки нижнего датчика вертикальной группы.

Коэффициенты усиления грунтовых толщ вообще говоря являются частотно-зависимыми [Kawase, 2003]. Однако можно оценивать и средние по частоте коэффициенты усиления [Anderson, 2003]. Способы оценки зависят от задач исследования. В настоящей работе мы оцениваем усиление сейсмических волн грунтовыми толщами по пиковым ускорениям, зарегистрированным поверхностным и скважинным датчиками вертикальных групп. Как показывает опыт наших исследований, такие оценки близки к оценкам средних по частоте коэффициентов усиления, но при этом их оценка несколько проще. С другой стороны, мы исследуем отклик грунта и при сильных движениях (землетрясениях с  $M_w \sim 8.3$  и  $9.0$ ) с эффектами направленности сейсмического излучения, где сейсмологов интересуют именно пиковые ускорения.

Оценивая таким образом коэффициенты усиления, нужно иметь в виду, что сейсмические колебания, зарегистрированные в скважине, будут “загрязнены” нисходящей волной от вышележащих грунтовых слоев [Kokusho, Sato, 2008] (записи нижних приборов вертикальной группы – “*imposed motion*”). Но и записи прибора на поверхности также содержат отражения (часто многократные) от нижележащих слоев. С этим приходится мириться, т.к. отфильтровать записи от отраженных волн практически невозможно.

В табл. 1 для каждой станции показаны рассчитанные средние по всем землетрясениям, описанным в Приложении 1, стационарные коэффициенты усиления и их стандартные отклонения; также приводятся средние скорости в верхнем 30 метровом слое грунта.

Сейсмические скорости в грунтовых слоях и порядок залегания грунтовых слоев в профиле определяют усиление сейсмических волн в грунтовых толщах. Как видно из табл. 1, оценки коэффициентов усиления и скорости  $V_{S30}$  на песчаных и глинистых станциях близки. Минимальное усиление 2.51 наблюдается на станции ISKH06, очевидно, из-за расположенных близко к поверхности слоев с достаточно высокими скоростями поперечных волн: в верхних 4 м скорости  $V_s \sim 240$  м/с, а ниже (в слое мощностью 40 м) –  $V_s \sim 600$  м/с (рис. 1).

На других песчаных и глинистых станциях, напротив, высокие коэффициенты усиления определяются низкими скоростями поперечных волн  $V_s$  вблизи поверхности: амплитуды сейсмических колебаний возрастают в верхних слоях вследствие снижения скорости и плотности при приближении к поверхности вследствие закона сохранения плотности потока сейсмической энергии.

Очевидно, на станциях с максимальным усилением SMNH15 (~6.5) и KGWH02 (~7.0) резонансные эффекты также дают заметный вклад в усиление – на этих станциях выделяются более мягкие поверхностные слои: 10-метровый слой со скоростями  $V_s \sim 150-280$  м/с (SMNH15) подстилается слоем с  $V_s \sim 500$  м/с и мощностью 8 метров с  $V_s \sim 107$  м/с (KGWH02), который в свою очередь подстилается слоем с  $V_s \sim 250$  м/с.

Отметим также, что на 8-ми из 10-ти выбранных станций уровень грунтовых вод (УГВ) подходит близко к поверхности – 0–4 м, и только на станции KMMH18 (глины) грунтовые воды находятся на глубине ~24 м, на станции AOMH12

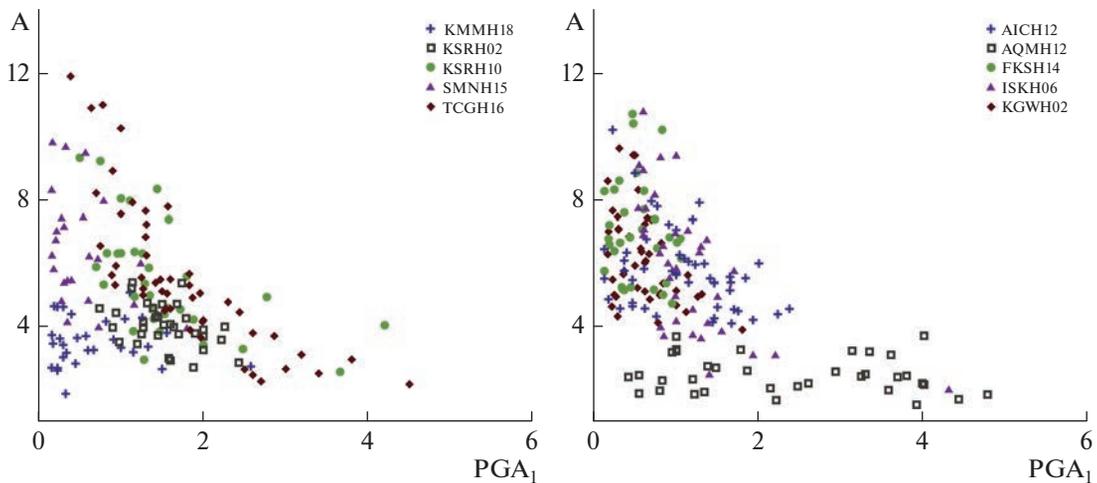


Рис. 2. Коэффициенты усиления сейсмических волн грунтовыми толщами в зависимости от пиковых ускорений в основании грунтовых толщ для глинистых (слева) и песчаных (справа) грунтов.

(пески) уровень грунтовых вод на  $\sim 10$  м. Как показывают наблюдения, эти различия в уровне грунтовых вод могут повлиять на отклик грунта при сильных движениях.

На рис. 2 приведены зависимости полученных коэффициентов усиления сейсмических волн грунтовыми толщами от пиковых ускорений в основании грунтовых толщ.

Хотя записи землетрясений отбирались как слабые движения, при которых мягкие грунты должны вести себя практически линейно, рис. 2 ясно показывает снижение коэффициентов усиления сейсмических волн в грунтах с ростом пиковых ускорений в основании грунтовых толщ, свидетельствуя о нелинейности поведения глинистых и песчаных приповерхностных грунтов даже при таких слабых воздействиях. Более четко эта зависимость проявляется для станций с наиболее мягкими грунтами (с низкими скоростями поперечных волн в приповерхностных слоях): для глинистых станций KSRH10 и TCGH16 и песчаной станции AICH12. Для этих станций коэффициенты усиления определены в широком диапазоне пиковых ускорений.

Коэффициенты усиления могут быть также связаны с вариациями частотного состава колебаний зарегистрированных землетрясений (в зависимости от их силы и эпицентрального расстояния) и с резонансными явлениями в грунтовых слоях. Такую связь можно предположить для станций SMNH15, KGWH02 и AQMH12, для которых оценка коэффициентов усиления изменяется от  $\sim 4$  до  $\sim 10$  в узком диапазоне пиковых ускорений  $PGA_1 \sim 1-2$  см/с<sup>2</sup>. На станции ISKH06 напротив, во всем диапазоне  $PGA_1 \sim 0.5-5$  см/с<sup>2</sup> коэффициенты усиления низки, что, вероятно, связано со строением грунтового профиля: уже с глубины 2 м залегают плотные грунты с  $V_s \sim 300$  м/с.

Таким образом, при слабых движениях не найдено значимых различий отклика песчаных и глинистых грунтов.

#### Сравнение отклика песчаных и глинистых грунтов при умеренно сильных движениях ( $PGA_1 \sim 50-100$ Гал)

Сравним отклик песчаных и глинистых грунтов при более сильных движениях, при которых пиковые ускорения в основаниях грунтовых толщ составляли 50–100 Гал. Отклик мягкого грунта при этом очевидно в значительной степени должен быть нелинейным. В базе данных KiK-net лишь для четырех из изучаемых станций удалось найти записи землетрясений, по которым можно провести сравнение. Данные об этих станциях и землетрясениях приведены в табл. 2. Пиковые ускорения  $PGA_1$  и  $PGA_2$  даны в Галах. На всех этих станциях уровень грунтовых вод (УГВ) подходит близко к поверхности ( $\sim 0-4$  м).

Записи землетрясений моделировались методом, предложенным авторами работы [Pavlenko, Irikura, 2003]: рассчитывалось распространение падающих вертикально снизу сейсмических волн (“входных” в грунтовую толщу сигналов — записей нижних датчиков вертикальной группы) в вышележащей толще осадочных слоев, и рассчитанные движения на поверхности сравнивались с зарегистрированными. Для расчетов использован алгоритм нелинейного анализа из статьи [Jouner, Chen, 1975], а поведение грунтовых слоев описывалось нормированными зависимостями напряжения–деформация (способ нормировки предложен авторами работы [Hardin, Drnevich, 1972b]). Различия в поведении слоев определялись особенностями механических характеристик слоев.

Таблица 2

Дата	Координаты очага		Глуб. очага, км	$M_w$	$R$ , км	$EW$		$NS$		$A$	№ зав.	
						$PGA_1$	$PGA_2$	$PGA_1$	$PGA_2$		$EW$	$NS$
Землетрясения, зарегистрированные станцией FKSH14 (песчаный грунт) – умеренно сильные движения												
20.09.2013	37.05	140.70	17	5.9	25	51.13	197.96	80.36	272.80	3.63	86	117
22.11.2016	37.35	141.60	25	7.4	67	60.74	182.38	61.18	250.71	3.55	125	69
13.02.2021	37.73	141.70	55	7.3	101	78.68	236.9	72.99	153.34	2.56	122	120
Землетрясения, зарегистрированные станцией KSRH02 (глинистый грунт) – умеренно сильные движения												
29.11.2004	42.95	145.27	48	7.1	96	96.19	265.88	91.72	234.09	2.66	110	83
2.02.2013	42.70	143.11	102	6.5	86	84.61	207.65	78.95	262.08	2.89	85	108
Землетрясения, зарегистрированные станцией KSRH10 (глинистый грунт) – умеренно сильные движения												
29.11.2004	42.95	145.27	48	7.1	32	93.12	274.01	68.06	364.09	4.15	34	87
29.11.2004	42.88	145.23	46	6.0	37	54.43	194.19	72.69	203.92	3.19	71	74
6.12.2004	42.85	145.34	46	6.9	44	74.05	437.25	64.28	334.70	5.56	84	89
Землетрясения, зарегистрированные станцией TCGH16 (глинистый грунт) – умеренно сильные движения												
11.03.2011	36.11	141.27	43	7.7	117	55.01	344.65	72.98	283.29	5.07	151	158
11.04.2011	36.95	140.67	6	7.0	69	48.53	257.61	44.68	230.02	5.23	158	151

Сгенерировано 250 зависимостей напряже-ние–деформация, имеющих несколько различные наклоны к оси деформаций и несколько различные формы. Наклоны к оси деформаций определяют модули сдвига в области малых деформаций, и они увеличивались с увеличением номера зависимости (от 1 до 250), так что зависимости с меньшими номерами описывают более “мягкое” поведение грунта, с меньшим усилением, а зависимости с большими номерами описывают более жесткое поведение грунта и большие усиления.

Методом перебора выбирались зависимости, дающие наилучшее соответствие расчетов и наблюдений на поверхности. Для выбора “наилучших” зависимостей строились взвешенные оценки отклонений расчетов от наблюдений, с учетом различий пиковых ускорений, интенсивности движений, спектрального состава и поточечных отклонений зарегистрированных записей от смоделированных.

В результате получены смоделированные акселерограммы колебаний на поверхности и соответствующие им распределения напряжений и деформаций в грунтовых слоях (от поверхности до глубины установки нижнего акселерометра), дающие нам представление о поведении грунтовых толщ при землетрясении. Метод детально описан в работе [Pavlenko, Irikura, 2003].

Временные изменения в поведении грунтовых слоев не учитывались, поскольку моделировались умеренно сильные сейсмические движения (либо от землетрясений малых магнитуд, либо на больших расстояниях от очага – табл. 2), и длительность сильных движений не превышала 30–

40 с (рис. 3), так что вся запись моделировалась одной нормированной зависимостью напряже-ние–деформация во все моменты времени.

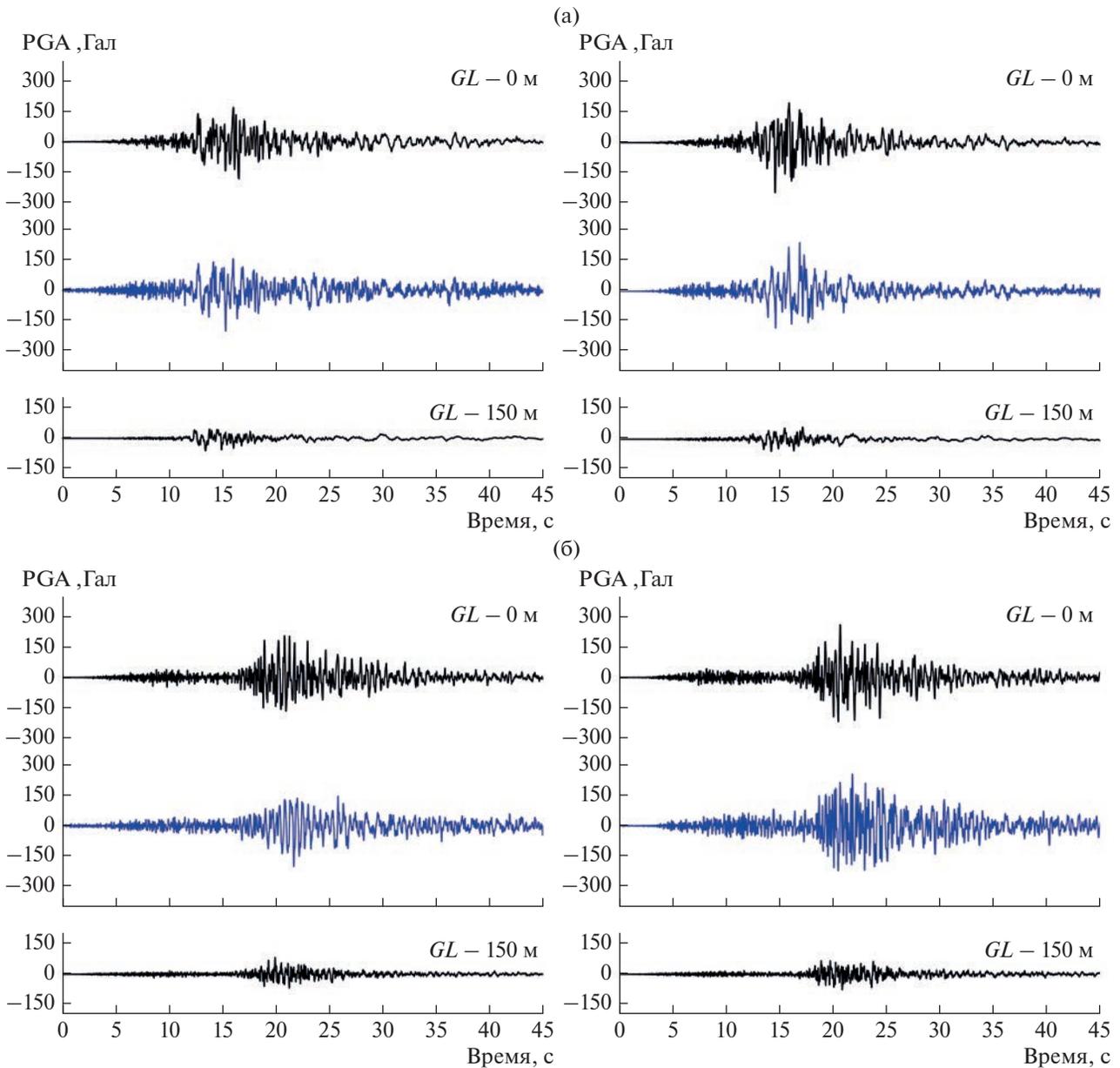
Примеры зарегистрированных и смоделированных записей представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, получено достаточно хорошее согласие зарегистрированных и смоделированных записей.

В последних колонках табл. 2 даны номера зависимостей напряже-ние–деформация для 2-х горизонтальных компонент, наиболее близко описывающих поведение грунтовых толщ при землетрясениях.

Зависимости с номерами 76–125 по своей форме и по наклонам к оси деформаций близки к зависимостям, полученным в лабораторных экспериментах с динамическим нагружением связных и несвязных грунтов авторами работы [Hardin, Drnevich, 1972a] и применяемым в “традиционных” программах оценки отклика грунта (например, NONL13 [Joyner, Chen, 1975]). Зависимости с меньшими номерами соответствуют более мягкому и более нелинейному поведению грунта, а зависимости с большими номерами – более жесткому и более линейному поведению грунта.

Как видно из табл. 2, сходное “традиционное” поведение показывают грунтовые толщи песчаной станции FKSH14 и глинистой станции KSRH02, тогда как станция KSRH10 показывает несколько более мягкое и нелинейное поведение грунта, а станция TCGH16 – более жесткое и более линейное поведение грунта.

Пониманию этих особенностей поведения грунта помогают грунтовые профили (рис. 2) и вертикальные распределения максимальных на-



**Рис. 3.** Примеры моделирования акселерограмм землетрясений: (а) – 22.11.2016 г. на станции FKSH14; (б) – 29.11.2004 г. на станции KSRH02; (в) – 29.11.2004 г. на станции KSRH10; (г) – 11.04.2011 г. на станции TCGH16. Сверху вниз: зарегистрированная акселерограмма на поверхности, смоделированная акселерограмма на поверхности, зарегистрированная акселерограмма на глубине, нижним прибором вертикальной группы. Слева – *EW*-, справа – *NS*-компоненты.

пряжений и деформаций, возбужденных в грунтовых слоях при землетрясениях (рис. 4). Напряжения в грунтовых слоях, вызванные землетрясением, как правило, возрастают с глубиной, с ростом литостатического давления. Более интересны распределения деформаций, возникающих в грунтовых слоях: они выше в приповерхностных слоях и показывают резонансное усиление сейсмических колебаний в более мягких слоях вблизи поверхности.

Как видно из рис. 4, на станциях KSRH02 и TCGH16 наибольшие деформации возникают в

мягких слоях вблизи поверхности: в верхних ~18 м на станции KSRH02 и в верхних ~8 м на станции TCGH16. На станции TCGH16 резонансное усиление возникает в достаточно тонком слое 8 м, что и генерирует высокочастотные колебания и более жесткое и близкое к линейному поведение грунта.

Поскольку поведение грунта определяется и резонансными, и нелинейными эффектами, следует сравнить станции с близкими значениями мощностей приповерхностных мягких слоев; в нашем случае, песчаную станцию FKSH14 и гли-

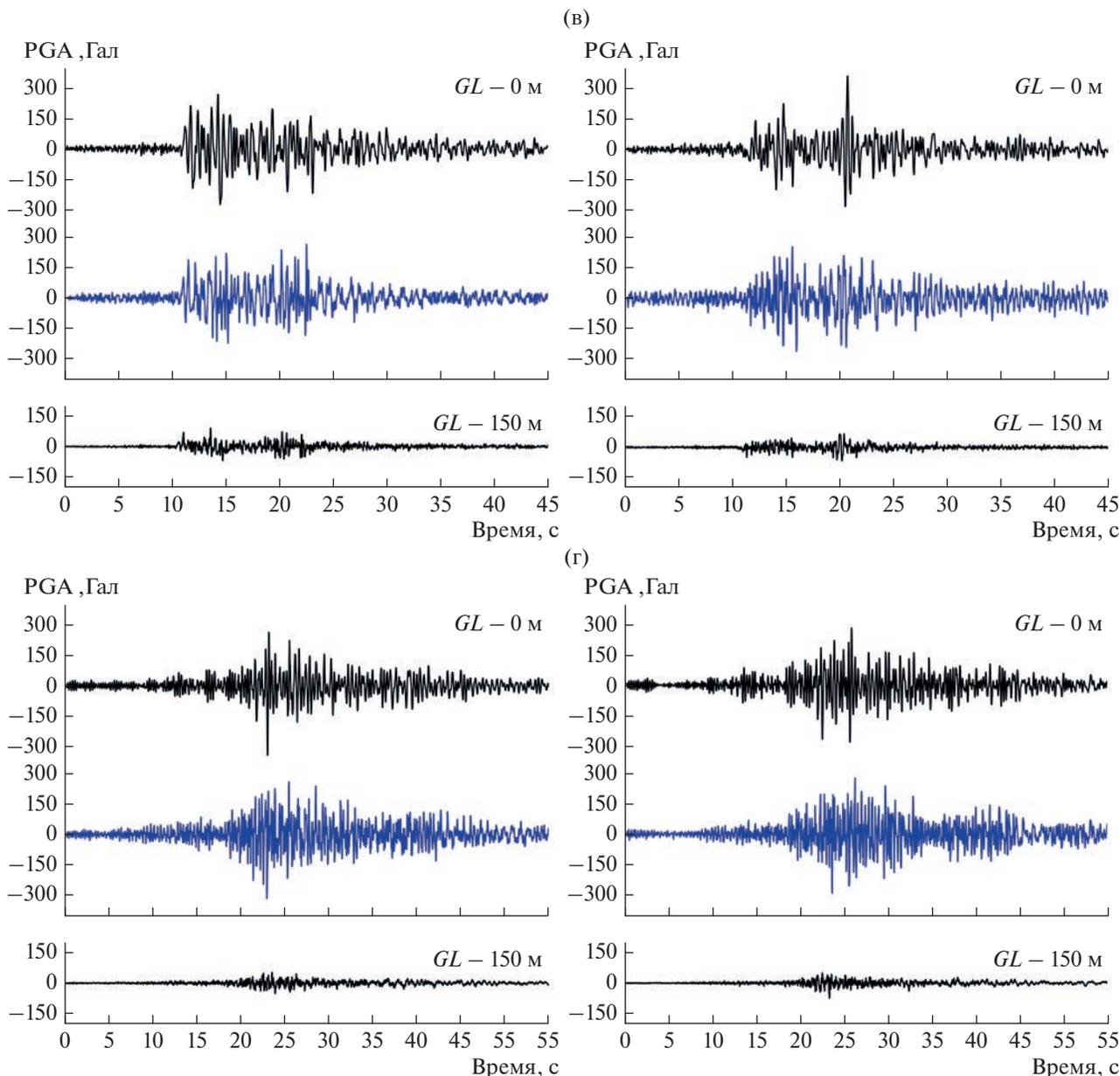


Рис. 3. Окончание

нистую станцию KSRH10, где вблизи поверхности залегают песчаные и глинистые слои достаточно большой мощности: ~50 м на FKSH14 и ~35 м на KSRH10.

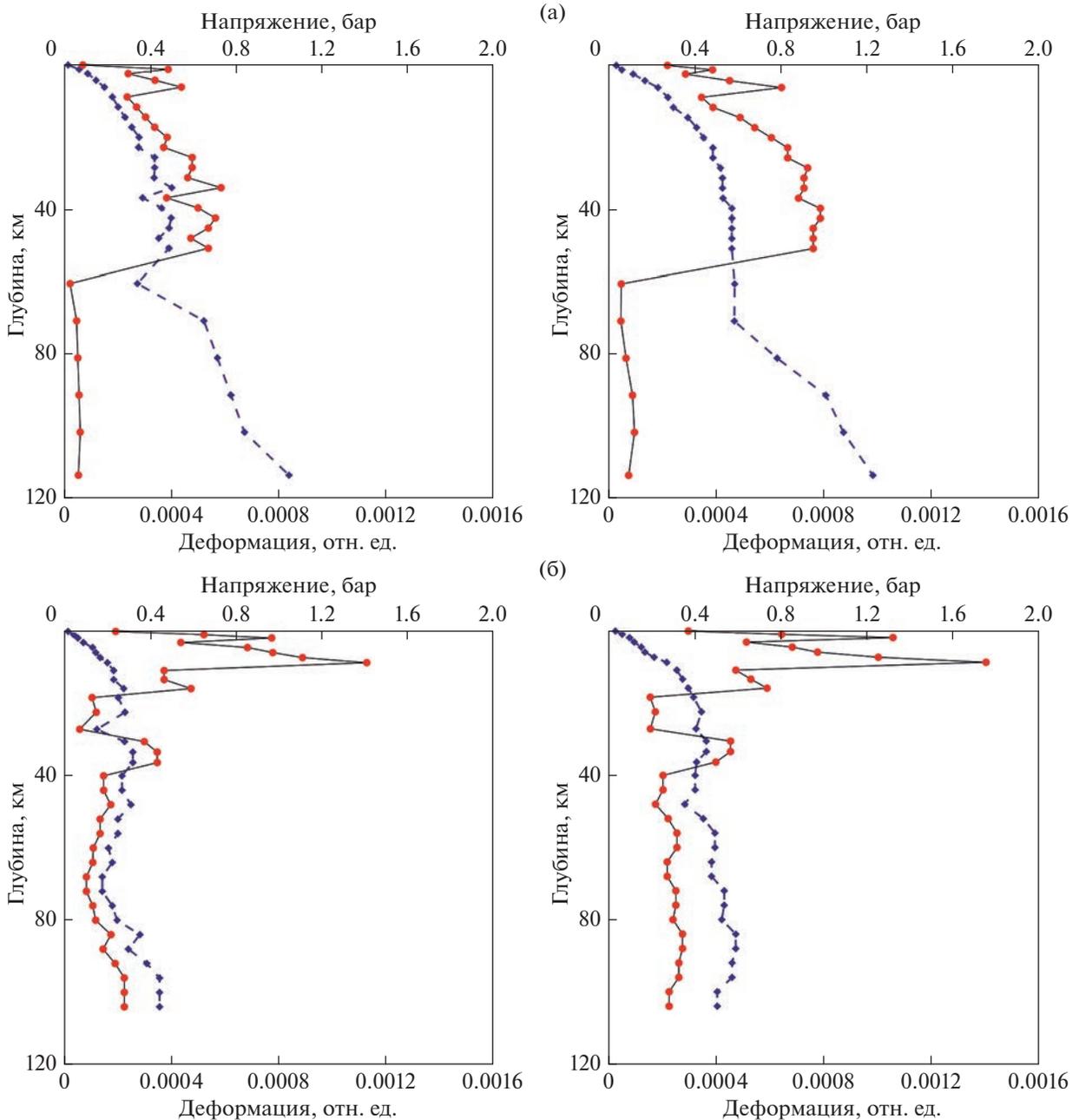
Как отмечалось выше, грунтовые толщи песчаной станции FKSH14 показывают “традиционное” поведение, а глинистые слои станции KSRH10 показывают несколько более мягкое и нелинейное поведение грунта.

На глинистой станции KSRH02 также отмечается “традиционное” поведение, т.е. более жесткое, чем на глинистой станции KSRH10, но это может быть связано с меньшей толщиной мягкого приповерхностного слоя, как на станции TCGH16.

Следовательно эти, хотя и немногочисленные данные, позволяют предположить, что поведение глинистых грунтов описывается несколько более мягкими и более нелинейными зависимостями напряжение–деформация (табл. 2), а поведение песчаных грунтов – несколько более жесткими зависимостями (что может быть связано с высоким уровнем грунтовых вод), хотя данных для обоснованного заключения, очевидно, недостаточно.

**Сравнение отклика песчаных и глинистых грунтов при сильных движениях (PGA<sub>1</sub> ~ 100–180 Гал)**

Сравним отклик песчаных и глинистых грунтов при более сильных движениях – с пиковыми



**Рис. 4.** Вертикальные распределения максимальных напряжений и деформаций, возбужденных в грунтовых слоях при землетрясениях, показанных на рис. 3: (а) – на станции FKSH14; (б) – на станции KSRH02; (в) – на станции KSRH10; (г) – на станции TCGH16. Слева – *EW*-, справа – *NS*-компоненты; сплошные линии – деформации, пунктирные – напряжения.

ускорениями в основаниях грунтовых толщ 100–180 Гал. Для четырех станций, FKSH14, KSRH02, KSRH10 и TCGH16 в базе данных KiK-net нашлись записи землетрясений, по которым можно провести такое сравнение. Данные об этих землетрясениях приведены в табл. 3.

На станциях FKSH14 и TCGH16 получены записи катастрофического землетрясения Тохоку 2011 г. ( $M_w \sim 9.0$ ), а на станциях KSRH02 и

KSRH10 получены записи другого крупного субдукционного землетрясения, которое известно как землетрясение Токачи-оки 2003 г. ( $M_w \sim 8.3$ ).

Описанным выше методом, предложенным авторами работы [Pavlenko, Irikura, 2003], построены модели поведения песчаных и глинистых грунтов при этих землетрясениях; они представлены на рис. 5 – вертикальные распределения напряжений и деформаций в грунтовых слоях.

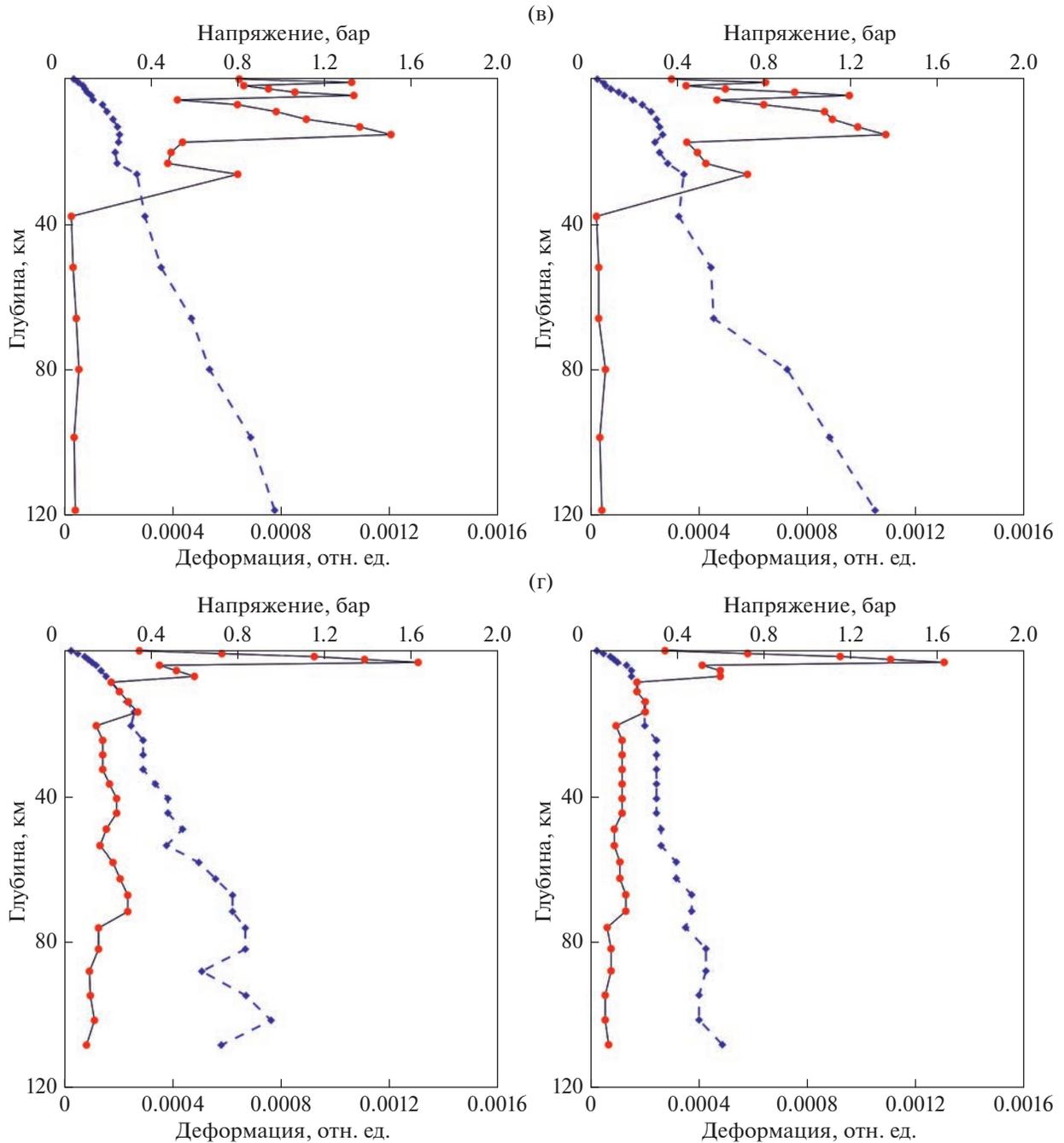


Рис. 4. Окончание

Поскольку это были крупные землетрясения, и сильные движения имели большую продолжительность, поведение грунтовых толщ моделировалось в малых временных интервалах: 5 с при землетрясении 2011 г. Тохоку и 1.5 с при землетрясении 2003 г. Токачи-оки и, как видно из рисунков, в продолжение сильных движений грунты изменяли свои реологические свойства (т.е. их поведение описывалось разными зависимостями напряжение–деформация в разные моменты времени).

При обоих крупных землетрясениях отмечены хорошо известные в сейсмологии эффекты направленности сейсмического излучения: на сейсмические станции, расположенные в направлении распространения трещины (*forward propagation*) в протяженном очаге землетрясения, сейсмические волны, излученные концом трещины в последовательные промежутки времени, приходят практически одновременно, накладываясь друг на друга, за счет чего происходит усиление сейсмических колебаний; регистрируются

Таблица 3

Дата	Координаты очага	Глуб. очага, км	$M_w$	$R$ , км	$EW$		$NS$		$A$	
					$PGA_1$	$PGA_2$	$PGA_1$	$PGA_2$		
Землетрясения, зарегистрированные станцией FKSH14 (песчаный грунт) – сильные движения										
11.03.2011	38.103	142.860	24	9.0	205	122.715	387.68	118.98	355.92	3.08
Землетрясения, зарегистрированные станцией KSRH02 (глинистый грунт) – сильные движения										
26.09.2003	41.781	144.074	42	8.3	148	162.489	404.614	143.527	373.116	2.54
Землетрясения, зарегистрированные станцией KSRH10 (глинистый грунт) – сильные движения										
26.09.2003	41.781	144.074	42	8.3	180	125.17	580.44	93.94	534.58	5.16
Землетрясения, зарегистрированные станцией TCGH16 (глинистый грунт) – сильные движения										
11.03.2011	38.103	142.860	24	9.0	301	172.79	1196.7	176.95	798.63	5.72

сигналы интенсивные, но короткие. Такой эффект наблюдается на удаленных станциях (так показывают расчеты – из-за взаимного расположения плоскости очага и станций, с учетом слоистой структуры среды). В то же время, на станциях, близкие к очагу, сейсмические волны приходят последовательно, в порядке их излучения концом трещины, и регистрируются длительные по времени сигналы с относительно небольшой амплитудой [Pavlenko, 2017]. Для более крупного землетрясения Тохоку 2011 г. ( $M_w \sim 9.0$ ) эффекты направленности выражены более четко, чем для землетрясения 2003 г. Токачи-оки ( $M_w \sim 8.3$ ).

Станции FKSH14 и KSRH02 были расположены вблизи очагов, а станции KSRH10 и TCGH16 – на достаточно больших удалениях от очагов, и на акселерограммах (рис. 5) хорошо видны различия волновых форм: на близких станциях сильные движения продолжительны по времени, но с меньшими пиковыми ускорениями ( $\sim 388$  Гал и  $\sim 405$  Гал), тогда как на удаленных станциях сильные движения непродолжительны, но интенсивны – пиковые ускорения высоки:  $\sim 580$  и  $\sim 1197$  Гал, несмотря на затухание сейсмических волн с удалением от очага.

На близкой к очагу станции FKSH14 наблюдается разжижение мягких ( $V_s \sim 120\text{--}190$  м/с) песчаных водонасыщенных приповерхностных грунтов в верхних  $\sim 8$  м.

Как известно, осадочные отложения, подверженные разжижению, занимают относительно узкий диапазон геологических сред [Youd, 1991]. Водонасыщенные речные, коллювиальные и эоловые отложения подвержены разжижению, причем восприимчивость к разжижению уменьшается с увеличением глубины залегания грунтовых вод; последствия разжижения наблюдались на участках, где грунтовые воды находятся в нескольких метрах от поверхности земли [Kramer, 1996]. Для разжижения требуется создание избыточного порового давления, поэтому на восприимчивость к разжижению влияют характеристики

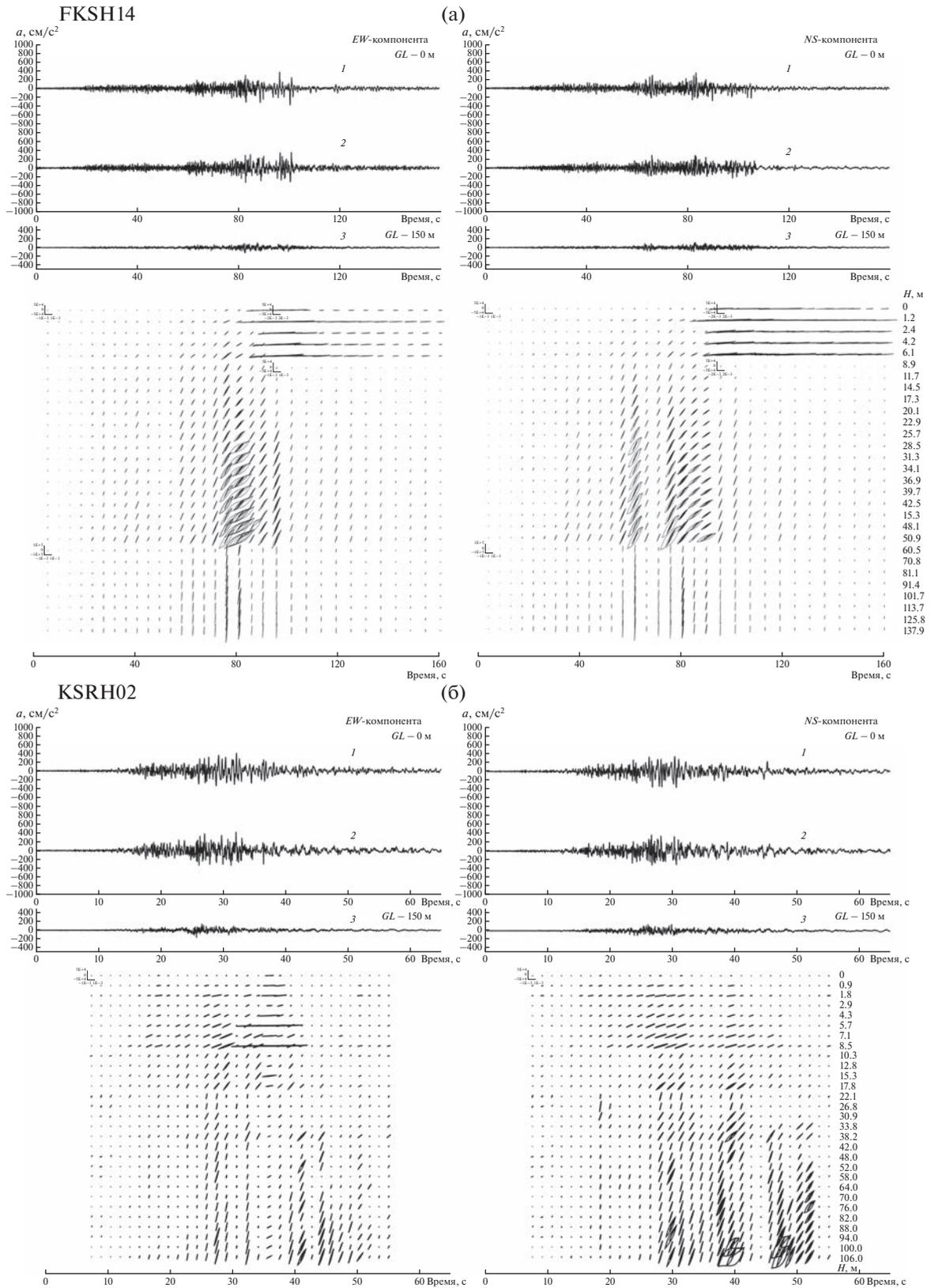
грунта, определяющие его поведение при изменении объема: размеры частиц, их форма и градиация.

В течение многих лет считалось, что явления, связанные с разжижением, ограничиваются песками. Более мелкозернистые почвы считались неспособными генерировать высокие поровые давления, приводящие к разжижению, а более крупнозернистые грунты считались слишком проницаемыми, чтобы выдерживать любое создаваемое поровое давление достаточно долго для развития разжижения.

Однако в последние годы критерии восприимчивости грунтов к разжижению расширились: разжижение непластичных илов наблюдалось в лаборатории и в полевых условиях [Ishihara, 1984; 1985]; грубые илы с объемными частицами, не пластичными и не имевшими когезии, оказались полностью подвержены разжижению [Ishihara, 1993]. Но более мелкие илы с чешуйчатыми или пластинчатыми частицами обычно обладают достаточной когезией, чтобы препятствовать разжижению.

Глины невосприимчивы к разжижению, хотя чувствительные глины могут проявлять свойства размягчения при деформациях, аналогичные свойствам разжиженного грунта [Kramer, 1996].

Развитие высоких поровых давлений приводит к тому, что жесткость (и прочность) даже тонкого слоя грунта снижаются настолько, что высокочастотные компоненты движений коренных пород не смогут передаваться на поверхность. Пример такого эффекта мы видим на станции FKSH14 (рис. 5а). Нетрудно определить момент, в который произошло вызванное разжижением уменьшение жесткости приповерхностного грунта – спектральный состав акселерограмм на обеих горизонтальных компонентах изменился примерно на 95-й секунде после начала сильных движений (что хорошо видно на акселерограммах), и спустя еще 5–8 с амплитуды движений на поверхности резко снизились.



**Рис. 5.** Зарегистрированные (1, 3) и смоделированные (2) акселерограммы сильных землетрясений и вертикальные распределения напряжений и деформаций в грунтовых слоях: (а) – на станции FKSH14 при землетрясении Тохоку 2011 г.; (б) – на станции KSRH02 при землетрясении Токачи-оки 2003 г.; (в) – на станции KSRH10 при землетрясении Токачи-оки 2003 г.; (г) – на станции TCGH16 при землетрясении Тохоку 2011 г., *EW*- и *NS*-компоненты. Сдвиговые напряжения – в Па, сдвиговые деформации – в относительных единицах (стрейнах).

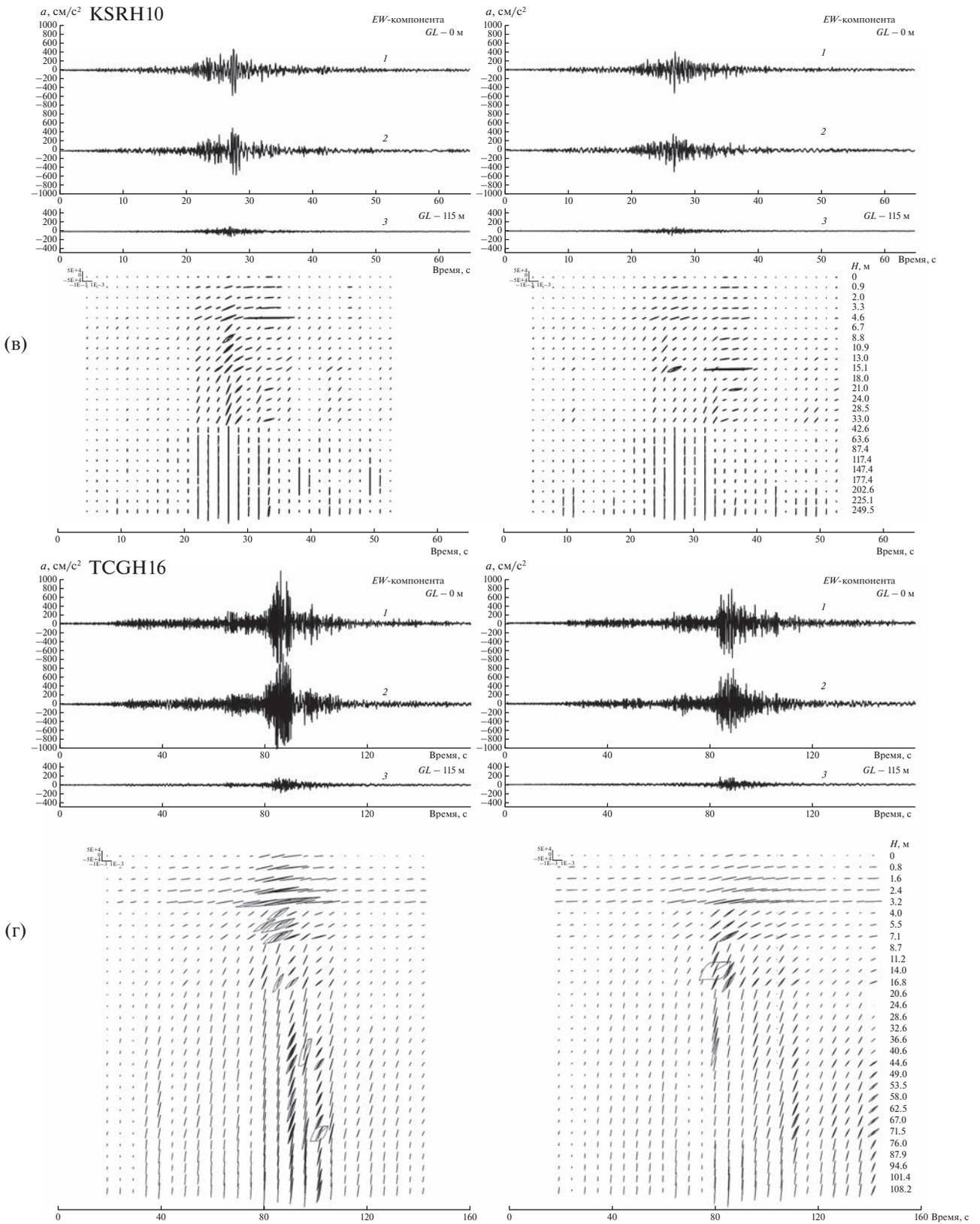
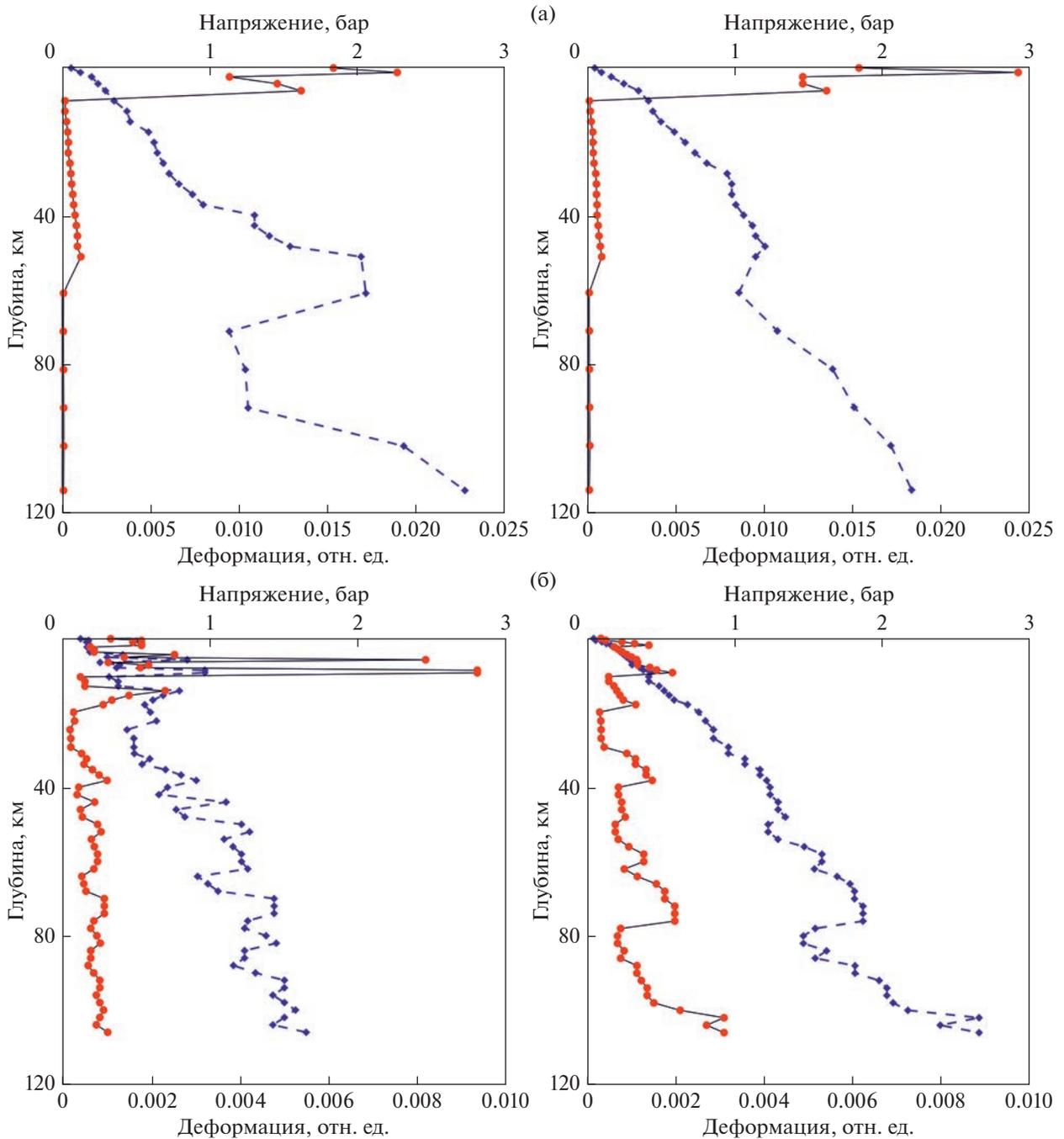


Рис. 5. Окончание

**Таблица 4.** Усиление сейсмических колебаний в грунтовых толщах при слабых, умеренно сильных и сильных движениях

Станция	$PGA_1 \leq 10$ Гал	$PGA_1 \sim 50-100$ Гал	$PGA_1 \sim 100-180$ Гал
FKSH14	5.81	3.25	3.08
KSRH02	4.01	2.78	2.54
KSRH10	5.48	4.30	5.16
TCGH16	5.65	5.15	5.72



**Рис. 6.** Вертикальные распределения максимальных напряжений и деформаций, возбужденных в грунтовых слоях сильных землетрясениях: (а) – на станции FKSH14 при землетрясении Тохоку 2011 г.; (б) – на станции KSRH02 при землетрясении Токачи-оки 2003 г.; (в) – на станции KSRH10 при землетрясении Токачи-оки 2003 г.; (г) – на станции TCGH16 при землетрясении Тохоку 2011 г. Слева – *EW*-, справа – *NS*-компоненты; сплошные линии – деформации, пунктирные – напряжения.

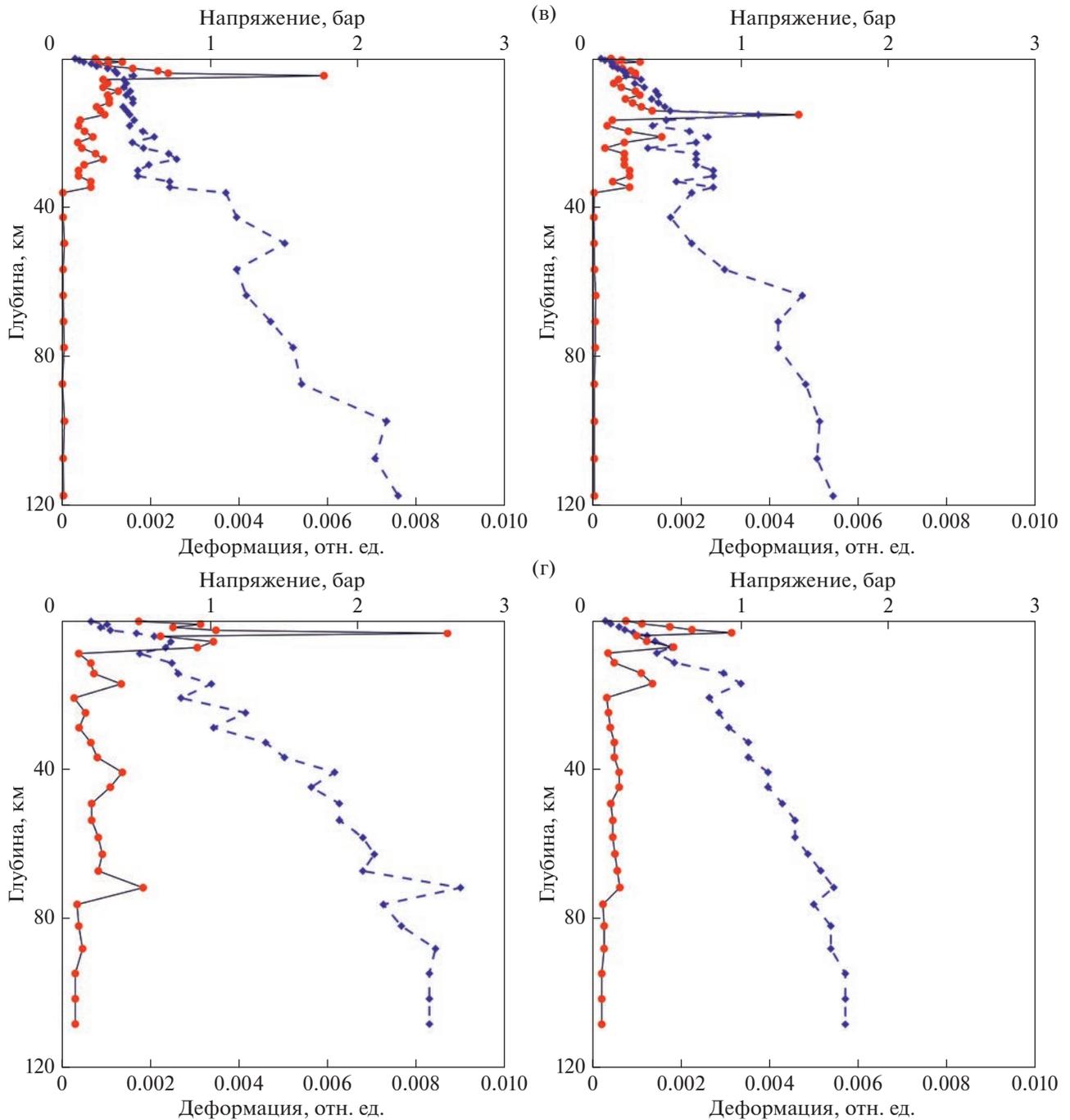


Рис. 6. Окончание

То, что амплитуды ускорений на поверхности уменьшаются, когда поровое давление становится достаточно большим, не означает, что потенциал повреждений обязательно снижается, поскольку низкие амплитуды ускорений на низких частотах могут приводить к большим смещениям (они видны в зависимостях напряжение–деформация на рис. 5а), и эти смещения представляют большую проблему для заглубленных сооруже-

ний, инженерных коммуникаций и сооружений, опирающихся на свайные фундаменты, проходящие через разжиженные грунты [Kramer, 1996].

Таким образом, при сильных движениях мы видим значимые различия в поведении песчаных и глинистых грунтов: разжижение – типичная реакция песчаных грунтов, но не наблюдается на глинистых грунтах.

Вертикальные распределения максимальных напряжений и деформаций, возбужденных в грунтовых слоях при сильных движениях (рис. 6), показывают наибольшие деформации на песчаной станции FKSH14 в верхних ~8 м, где наблюдалось разжижение водонасыщенных песков (УГВ ~2 м).

По сравнению с более слабыми движениями (рис. 4), на всех станциях возбуждаются те же приповерхностные слои мягких грунтов, но на этом фоне наиболее сильные деформации возбуждаются не во всей толще (например, ~50 м на станции FKSH14) мягких грунтов, а в более тонких слоях (мощностью ~4–6 м).

В заключение, сравним коэффициенты усиления на станциях при слабых и сильных движениях (табл. 4).

Коэффициенты усиления сейсмических волн грунтовыми толщами закономерно снижаются с увеличением амплитуд входных в грунтовые толщи сигналов ( $PGA_1$ ), однако при сильных движениях ( $PGA_1 \sim 100\text{--}180$  Гал) на станциях KSRH10 и TCGH16 усиление сравнимо с усилением при слабых движениях из-за эффектов направленности, описанных выше, и даже может превышать его. Эти эффекты протяженных очагов, очевидно, следует учитывать при оценке сейсмической опасности в регионах, где возможны сильные землетрясения с магнитудами выше 8.0.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Рассмотрен отклик песчаных и глинистых (несвязных и связных) приповерхностных грунтов на сейсмические воздействия различной интенсивности по данным наблюдений японской сети вертикальных групп KiK-net.

Оценки усиления сейсмических волн, рассчитанные как отношения пиковых ускорений на поверхности и в скважине, в песках и глинах при слабых движениях оказались близки; также получены близкие зависимости напряжение–деформация, описывающие поведение песков и глин при сейсмических движениях умеренной силы.

Анализ уникальных записи станций KiK-net в приразломных зонах сильных землетрясений 2003 г. Токачи-оки ( $M_w \sim 8.3$ ) и 2011 г. Тохоку ( $M_w \sim 9.0$ ) обнаружил влияние эффектов направленности протяженных сейсмических очагов на поведение песчаных и глинистых грунтов и усиление в них сейсмических волн. Различия в поведении песчаных и глинистых грунтов отмечены при сильных движениях: в песчаных грунтах возможно разжижение, а в глинистых нет.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят японских коллег за записи вертикальных групп KiK-net, использованные в настоящей работе. Авторы также благодарят анонимных ре-

цензентов за ценные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Инженерная геология России. Т. 1. Грунты России / Трофимов В.Т., Вознесенский Е.А., Королев В.А. (ред.). М.: КДУ. 2011. 672 с.
- Мишель А.Г., Шульман С.Г. Динамика многофазных грунтовых сред. С.-Пб.: ОАО ВНИИГ им. Веденеева. 1999. 396 с.
- Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. М.: Научный мир. 2009. 284 с.
- Aguirre J., Irikura K. Nonlinearity, Liquefaction, and Velocity variation of Soft Soil Layers in PI, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. 1997. V. 87. P. 1244–1258.
- Anderson J.G. Strong-Motion Seismology. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Part B. 2003. P. 937–965.
- Bard P.-Y. Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues. Proceedings of the 10<sup>th</sup> ECEE. Duma. Rotterdam: Balkema. 1995. P. 305–324.
- Beresnev I.A., Wen K.-L., Yeh Y.T. Nonlinear soil amplification: Its corroboration in Taiwan // Bulletin of the Seismological Society of America. 1995. V. 85. P. 496–515.
- Borcherdt R.D. Effects of local geology on ground motion near San-Francisco Bay // Bulletin of the Seismological Society of America. 1970. V. 60. P. 29–61.
- Borcherdt R.D. Influence of local geology in the San Francisco Bay region, California, on ground motion generated by the Loma Prieta earthquake of October 17, 1989. Proceedings of the Int'l Symposium on Safety and Urban Life and Facilities, Tokyo Inst. Tech. Tokyo. Japan. 1990.
- Borcherdt R.D., Wentworth C.M. Strong ground motion generated by the Northridge earthquake of January 17, 1994: implications for seismic design coefficients and seismic zonation. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference On Seismic Zonation. Oct. 17–19 1995. Nice, France. P. 964–972.
- Caillot V., Bard P.-Y. Characterizing site effects for earthquake regulations in the French seismicity context: A statistical analysis. Proceedings of the 9<sup>th</sup> European conference on Earthquake Engineering. Moscow. 1990. P. 27–36.
- Chang C.-Y., Mok C.M., Power M.S., Tang Y.K., Tang H.T., Stepp J.C. Development of shear modulus reduction curves based on Lotung downhole ground motion data. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 1991. P. 111–118.
- Darragh R.B., Shakal A.F. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion // Bulletin of the Seismological Society of America. 1991. V. 81. P. 1885–1899.
- Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects. Proceedings of the American Society of Civil Engineers // J. Soil Mechanics and Foundation Division. 1972. V. 98. P. 603–624.
- Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. Proceedings of the

- American Society of Civil Engineers // J. Soil Mechanics and Foundation Division. 1972. V. 98. P. 667–692.
- Ishihara K.* Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit. Proceedings of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. Univ. of Missouri. St. Louis. 1984. V. 3. P. 1129–1143.
- Ishihara K.* Stability of natural deposits during earthquakes. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1985. V. 1. P. 321–376.
- Ishihara K.* Liquefaction and flow failure during earthquakes // *Geotechnique*. 1993. V. 43. № 3. P. 351–415.
- Joyner W.B., Chen T.F.* Calculation of nonlinear ground response in earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1975. V. 65. № 5. P. 1315–1336.
- Kawase H.* Site Effects on Strong Ground Motions. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Part B. 2003. P. 1013–1030.
- Kobayashi H., Midorikawa S.* Study of site effects in Mexico City using microtremors // Proceedings of Japanese Symposium on earthquake Engineering. 1986. V. 7. P. 355–360.
- Kokusho T., Sato K.* Surface-to-base amplification evaluated from KiK-net vertical array strong motion records // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2008. V. 28. P. 707–716.
- Kramer S.L.* Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, New Jersey. 1996. 653 p.
- Pavlenko O.V., Irikura K.* Estimation of nonlinear time-dependent soil behavior in strong ground motion based on vertical array data // *Pure and Applied Geophysics*. 2003. V. 160. P. 2365–2379.
- Pavlenko O.V.* Possible Mechanisms for Generation of Anomalously High PGA During the 2011 Tohoku Earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 2017. V. 174. № 8. P. 2909–2924.
- Rogers A.M., Borcherdt R.D., Covington P.A., Perkins D.M.* A comparative ground response study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 San Fernando earthquake // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1984. V. 74. P. 1925–1949.
- Rogers A.M., Tinsley J.C., Borcherdt R.D.* Predicting relative ground response, in Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region—an earth-science perspective. U.S. Geological Survey Professional Paper 1360. 1985. P. 221–247.
- Silva W.J.* Global characteristics and site geometry. Chapter 6. Proceedings: NSF/EPRI Workshop on Dynamic Soil Properties and Site Characterization. Palo Alto. Calif. Electric Power Research Institute. 1991. P. 7337.
- Singh S.K., Mena E., Castro R.* Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1988. V. 78. P. 451–477.
- Tucker B.E., King J.L.* Dependence of sediment-filled valley response on the input amplitude and the valley properties // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1984. V. 74. P. 153–165.
- Youd T.L.* Mapping of earthquake-induced liquefaction for seismic zonation. Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation. Earthquake Engineering Research Institute. Stanford University. 1991. V. I. P. 111–147.

## Response of Sandy and Clayey Soils to Weak And Strong Seismic Loading

E. V. Deshcherevskaya<sup>a,\*</sup> and O. V. Pavlenko<sup>a,\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

\**e-mail: deelv@gmail.com*

\*\**e-mail: olga@ifz.ru*

The response of sandy and clayey near-surface soils representing the classes of noncohesive and cohesive soils to seismic loading of various intensities is analyzed from the in situ data —from the records by vertical groups of the Japanese nationwide KiK-net strong motion seismograph network. For the analysis, out of a total of ~800 stations, we selected five stations with near-surface sandy soils and five stations with near-surface clayey soils, most purely represented in the upper layers. Using the method (Pavlenko and Irikura, 2003), we have constructed and analyzed the models of strong ground motion behavior for “sandy” and “clayey” stations, showing the distributions of earthquake-induced stresses and strains in the soil layers. Close estimates of the amplification of seismic waves in sands and clays at weak seismic ground motion and close stress-strain relationships characterizing the behavior of the near-surface soils at moderate seismic ground motion are obtained. The liquefaction of sandy soils under strong shaking (the 2011 Tohoku earthquake with  $M_w \sim 9.0$ ) is analyzed. The effects of the extended seismic sources (directivity of their radiation pattern) on the behavior of sandy and clayey soils and the amplification of seismic waves in these soils is studied. Differences in the behavior of sandy and clayey soils are noted only at strong seismic motions: liquefaction in sandy soils is possible if the groundwater level is on the order of a few meters from the surface, while in clayey soils there is no liquefaction.

*Keywords:* soil types, water saturation of soils, amplification of seismic waves in soils, nonlinearity of soil behavior, radiation directivity effects, KiK-net stations