

УДК 550.34.01

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСЕЛЕРОГРАММ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 13.11.1993 г.  
( $M_w = 7.0$ ,  $H = 54$  км) НА СЕЙСМОСТАНЦИЯХ «ПЕТРОПАВЛОВСК»,  
«ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ» И «НИКОЛЬСКАЯ»  
(г. ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ)**

© 2015 О.В. Павленко

*Институт физики Земли РАН, Москва, 123242; e-mail: olga@ifz.ru*

Для оценки параметров колебаний земной поверхности при возможных в будущем сильных землетрясениях изучаются характеристики излучения и распространения сейсмических волн в Камчатской сейсмогенной зоне. Методом стохастического моделирования построены акселерограммы (горизонтальные компоненты) землетрясения, происшедшего 13 ноября 1993 г. (моментная магнитуда  $M_w = 7.0$ , глубина очага  $h = 54$  км); смоделированы записи землетрясения на сейсмостанциях «Петропавловск», «Институт Вулканологии» и «Никольская» в г. Петропавловск-Камчатский. В расчетах использованы оценки частотно-зависимого затухания в виде  $Q(f) \sim 200f^{0.3}$  и геометрического расхождения  $1/r$ , полученные ранее для Камчатки. По скоростным профилям оценено усиление сейсмических волн в земной коре, подобраны параметры, определяющие формы очаговых спектров, волновые формы и длительность акселерограмм. На «грунтовой» станции INS смоделировано поведение грунта при землетрясении. Полученные оценки параметров излучения и распространения сейсмических волн планируется уточнить по записям других землетрясений Камчатской зоны.

*Ключевые слова: акселерограммы, Камчатка, излучение, распространение, сейсмические волны, поведение грунта.*

## ВВЕДЕНИЕ

Землетрясение с моментной магнитудой  $M_w = 7.0$  и глубиной очага  $\sim 54$  км, происшедшее у восточного побережья Камчатки 13 ноября 1993 г., приблизительно в 120 км от Петропавловска-Камчатского, по своим параметрам представляет собой типичное для региона сейсмическое событие — межплитовое субдукционное землетрясение тихоокеанской фокальной зоны. Такие события в среднем повторяются с периодом менее 10 лет (Гусев и др., 2005). Проведенный анализ сейсмической опасности для Петропавловска-Камчатского показал, что в этой фокальной зоне максимально возможным является землетрясение с моментной магнитудой  $M_w = 9.0$ , причем оценка параметров колебаний поверхности на относительно малых расстояниях от очага этого землетрясения, в пределах Петропавловска-Камчатского, представляет собой достаточно сложную проблему (Гусев и др., 2005). Оценить параметры колебаний земной поверхности в разных пунктах, на скальных и

осадочных породах, можно посредством моделирования акселерограмм этого сценарного землетрясения; для этого необходимо изучить закономерности излучения и распространения сейсмических волн в условиях Камчатки, а также особенности отклика грунтовых толщ, с учетом возможной нелинейности поведения грунта.

В настоящей работе выполнены исследования, позволяющие продвинуться в решении этой проблемы. Предварительные оценки характеристик излучения и распространения сейсмических волн для восточной Камчатки получены посредством моделирования акселерограмм землетрясения 13.11.1993 г.

Это землетрясение выбрано для первого этапа работы по изучению региональных характеристик излучения и распространения сейсмических волн в Камчатской сейсмогенной зоне как наиболее простой для моделирования случай: имеются записи землетрясения всего на трех станциях сети сильных движений Камчатки, расположенных в пределах Петропавловска-Камчатского: на сейсмостанциях

«Петропавловск» (PET), «Институт Вулканологии» (INS) и «Никольская» (NKS) (рис. 1).

Помимо общей информации о грунтовых условиях в пунктах установки станций, для двух станций PET и INS имеются результаты проведенных исследований структуры приповерхностных слоев (Аносов, Павленко, 2006), в которых методами сейсморазведки получена информация о сейсмических скоростях в первых десятках метров разрезов под станциями (~ 30 м на станции PET и ~ 60 м на станции INS).

## ДАННЫЕ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

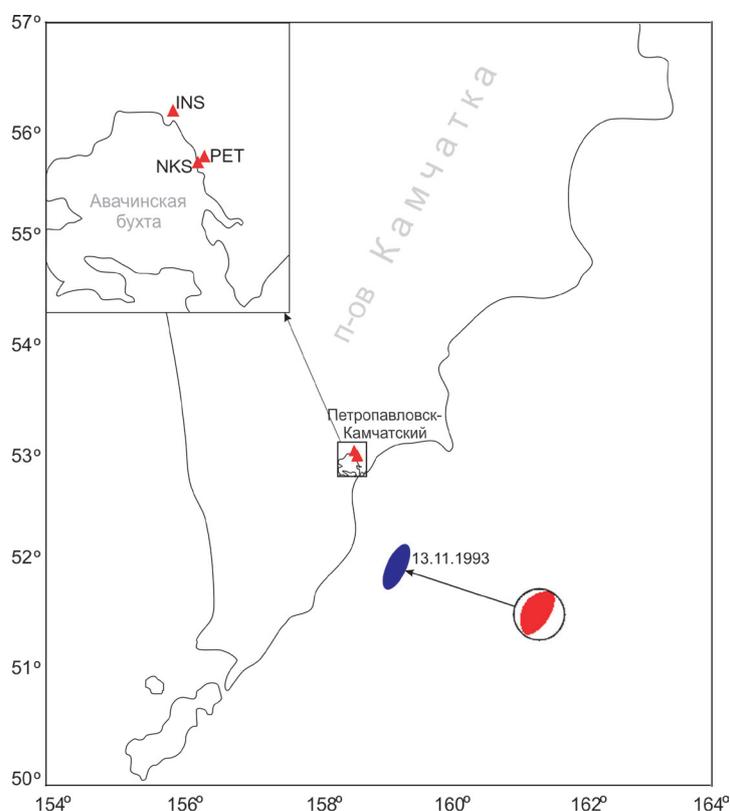
Пиковые скорости и ускорения, зарегистрированные на станции PET (рис. 2, табл. 1), в 1.5-2.5 раза ниже, чем на станциях INS и NKS (рис. 2; табл. 1): средние по горизонтальным компонентам пиковые ускорения на станции PET ~ 25 см/с<sup>2</sup>, на станции INS ~ 38 см/с<sup>2</sup>, а на станции NKS ~ 64 см/с<sup>2</sup>. По грунтовым условиям и по результатам, полученным при проведении сейсморазведочных работ (Аносов, Павленко, 2006; Делемень и др., 2007) станция PET является «скальной» станцией, и в настоящей работе записи этой станции моделировались как записи на поверхности скального фундамента.

Датчики приборов сильных движений на изучаемых сейсмостанциях представляют со-

бой акселерометры, и приведенные на рис. 2 велосиграммы рассчитывались из зарегистрированных акселерограмм их интегрированием. В ходе предварительной обработки аналоговые записи оцифровывались с частотой 50–100 Гц (не менее 6 отсчетов на период), с использованием оптического сканера, в полуавтоматическом режиме; затем корректировалась нулевая линия для исключения смещения и наклона путем подбора аппроксимирующей прямой (в некоторых случаях выделялся и исключался длиннопериодный дрейф нулевой линии). Затем записи подвергались полосовой фильтрации в полосе частот, где соотношение сигнал/шум больше 1; типичные значения частот среза  $fl = 0.1$  Hz,  $fh = 25$  Hz.

Записанные тремя станциями акселерограммы моделировались с помощью стохастического метода Д. Бура (Boore, 2003): сначала генерировался сейсмический сигнал на скальном основании, и затем, при наличии грунтовой толщи, этот сигнал пересчитывался в колебания на поверхности грунта.

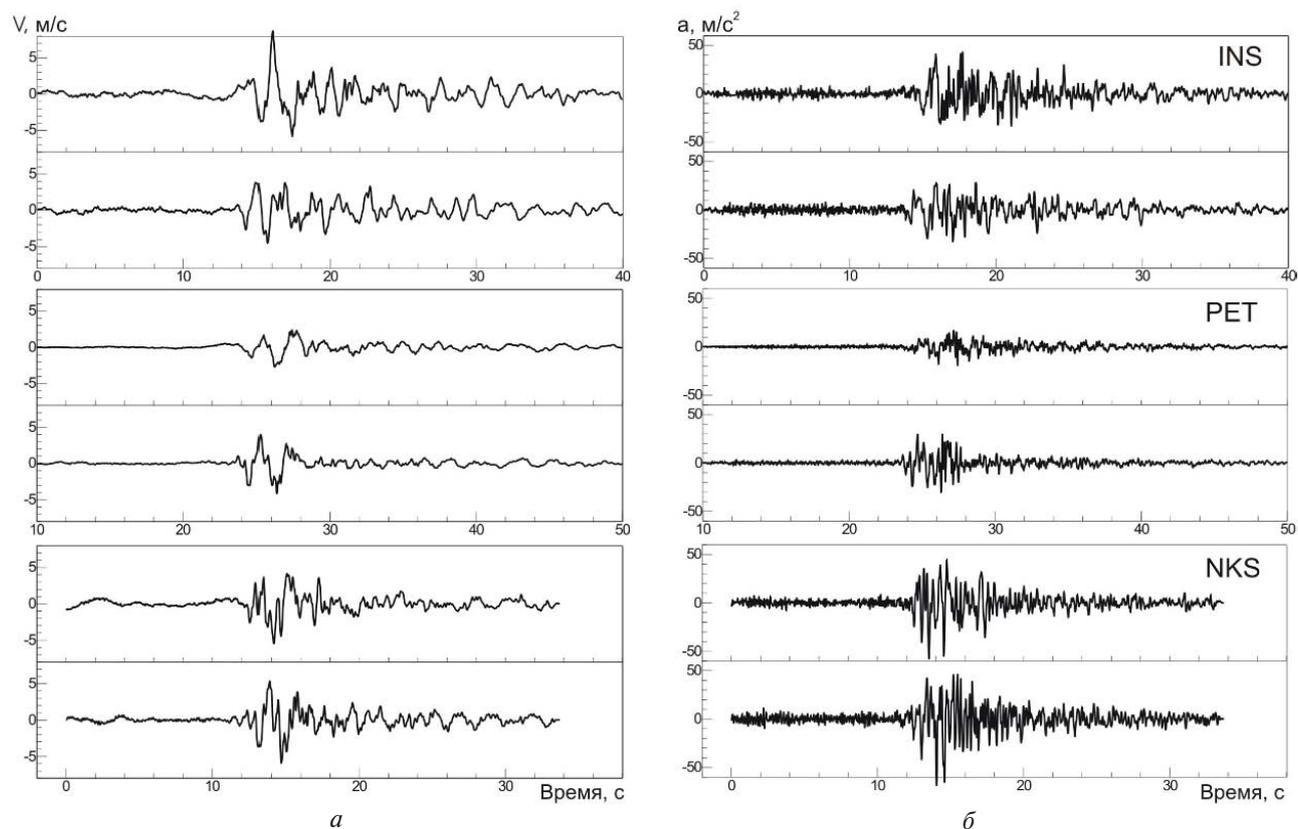
Стохастический метод расчета акселерограмм основан на представлениях, подтверждаемых наблюдениями, что акселерограммы в окнах вступлений S-волн представляют собой ограниченный по спектру Гауссовский белый шум. Частотные ограничения определяются



**Рис. 1.** Расположение сейсмостанций PET, INS и NKS сети сильных движений Камчатки, расположение и механизм очага землетрясения 13.11.1993 г. по данным Global CMT (площадка очага — на полого падающей в сторону Камчатки плоскости).

**Таблица 1.** Сейсмостанции, зарегистрировавшие землетрясение 13 ноября 1993 г. ( $M_w = 7.0$ , глубина очага  $h = 54$  км, координаты очага  $52.0^\circ$  с.ш.,  $159.3^\circ$  в.д.).

Станция	Координаты станции		Высота у.м., м	Грунтовые условия	Эпицентральное расстояние, км	Тип приборов	Диапазон частот, Гц
	°с.ш.	°в.д.					
INS	53.066	158.608	175	Средний, пирокластические отложения	122.6	GSR-24+CMG-5T	0-30
PET	53.024	158.653	90	Скальный, габбро-диабазы	117.2	IRIS-LG	0-32.6
NKS	53.018	158.643	95	Скальный	116.9	CCP3-M	0-15



**Рис. 2.** Велосигramмы (а) и акселерограммы (б) землетрясения 13.11.1993 г., зарегистрированные сейсмостанциями INS, PET и NKS; верхняя и нижняя записи — горизонтальные компоненты ВЗ (восток-запад) и СЮ (север-юг).

граничной частотой спектра  $f_0$  и частотой  $f_{max}$  — наивысшей частотой, определяемой регистрирующим прибором или затуханием в земной коре (Hanks, McGuire, 1981). В результате, как показывает практика, в смоделированных акселерограммах мы получаем адекватное представление высокочастотных составляющих колебаний ( $f > 0.1$  Гц), наиболее интересных для инженерной сейсмологии. Используя стохастический метод, можно с достаточно высокой точностью прогнозировать параметры сильных движений по записям более слабых.

Входными данными программ расчета акселерограмм являются параметры, описывающие особенности излучения (эффекты очагов) и распространения (эффекты пути распространения) сейсмических волн в данном регионе, а также параметры, описывающие локальные эффекты вблизи источников и приемников (поскольку основные факторы, определяющие параметры колебаний в данной точке — это очаг, путь распространения сейсмических волн и локальные эффекты; они вносят вклад в спектр колебаний в данной точке). Зависимости параметров из-

лучения и распространения сейсмических волн от магнитуды и расстояния представляются в виде простых функций, которые используются в расчетах. К наиболее важным для расчетов параметрам относятся: сброшенное в очаге напряжение (параметр излучения), параметры геометрического расхождения, частотно-зависимого неупругого поглощения, зависимость длительности сейсмического сигнала от эпицентрального расстояния (параметры распространения), локальное усиление в земной коре и ослабление сигнала на высоких частотах каппа, параметры, определяющие форму сигнала. Эти необходимые для расчетов параметры могут быть оценены по имеющимся записям землетрясений данного региона.

В расчетах использовалась программа Д. Бура (Boore, 2003), модифицированная автором для учета протяженности сейсмического очага и отклика грунта. Очаг землетрясения был представлен в виде совокупности субочагов, размеры, расположение, параметры излучения и способ суммирования излучения которых выбирались в соответствии с рекомендациями А.А. Гусева и В.М. Павлова (Gusev, Pavlov, 2006), как авторов алгоритма широкополосного моделирования излучения сейсмического очага конечных размеров, одного из наиболее точных на сегодняшний день: временные серии излучений субочагов были приняты некоррелированными; конечная подвижка и скорость распространения трещины определены как случайные функции, варьирующие вдоль осей  $x$  и  $y$  (в плоскости площадки очага); точечные источники были случайным образом смещены от узлов совершенной сетки на 0.3–0.6 величины размера ячейки. (Gusev, Pavlov, 2006).

Акселерограммы излучений субочагов генерировались с помощью программы Д. Бура для точечного сейсмического источника как случайные процессы стохастическим методом, затем излучение от всех субочагов суммировалось с учетом случайных вариаций положений субочагов и скорости распространения трещины. Для субочагов принята модель излучения  $\omega^{-2}$ . Скорость распространения разрыва принята постоянной и равной  $\sim 0.8$  от средней скорости S-волн в земной коре  $V_R = 0.8V_S$ , со случайными ее флуктуациями  $\delta V_R \sim 0.3V_R$ ; по этой скорости рассчитывались временные задержки вступлений для субочагов. Каждый субисточник (субочаг) включается в момент прихода к нему фронта вспарывания; фронт вспарывания круговой, точка начала вспарывания — в центре площадки очага, распределение подвижек на разломной плоскости — однородное. Пространственная ориентация разломной плоскости, координаты и глубина гипоцентра взяты в соответствии с данными Global CMT.

Программа стохастического моделирования позволяет учесть возможное усиление сейсмических волн в приповерхностных слоях по отношению к колебаниям в окрестности источника — сейсмического очага — путем введения частотно-зависимых коэффициентов усиления  $A(f)$ . Методика оценки частотно-зависимых коэффициентов усиления по скоростным профилям в четвертьволновом приближении для S-волн разработана Д. Буром и У. Джойнером (Boore, Joyner, 1997). По этой методике на основе данных, полученных при проведении сейсморазведочных исследований, до глубин  $\sim 30$  м (для станции РЕТ) и до глубин  $\sim 60$  м (для станции INS) (Аносов, Павленко, 2006), с использованием результатов проведенных ранее в районе Петропавловска-Камчатского работ глубинного сейсмического зондирования и корреляционного метода преломленных волн (Балеста и др., 1988; Назарова, 2004), были оценены частотно-зависимые коэффициенты усиления на станциях РЕТ и INS (рис. 3). На станции NKS сейсморазведочные работы не проводились, нет данных о скоростях поперечных волн в приповерхностных слоях, и кривые частотно-зависимого усиления получены эмпирически — приведением спектральных амплитуд рассчитанных записей к зарегистрированным (рис. 4).

Смоделированные стохастическим методом акселерограммы представляют собой реализации случайного процесса — произвольно ориентированные горизонтальные компоненты колебаний поверхности. Генерируется набор акселерограмм (обычно не менее 25–50), по которым оцениваются параметры сейсмических воздействий: средние пиковые ускорения, скорости и смещения, усредненные спектры и спектры реакции, преобладающие периоды колебаний. При моделировании акселерограмм землетрясения 13.11.1993 г. рассчитывались серии из 250-ти акселерограмм.

Рассчитанные акселерограммы сравнивались с зарегистрированными при землетрясении на двух горизонтальных компонентах и калибровались, то есть подбирались значения входных параметров расчетной программы, характеризующие эффекты излучения и распространения сейсмических волн, позволяющие достичь наилучшего согласия расчетов и наблюдений. Оценка согласия строится на среднеквадратичных отклонениях спектров и средних интенсивностей смоделированных и зарегистрированных акселерограмм, но при этом подбираются входные параметры моделирования, позволяющие добиться также соответствия волновых форм (распределения интенсивностей по времени) и пиковых ускорений в расчетах и наблюдениях.

В расчетах колебаний на поверхности грунта на станции INS использован алгоритм

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСЕЛЕРОГРАММ

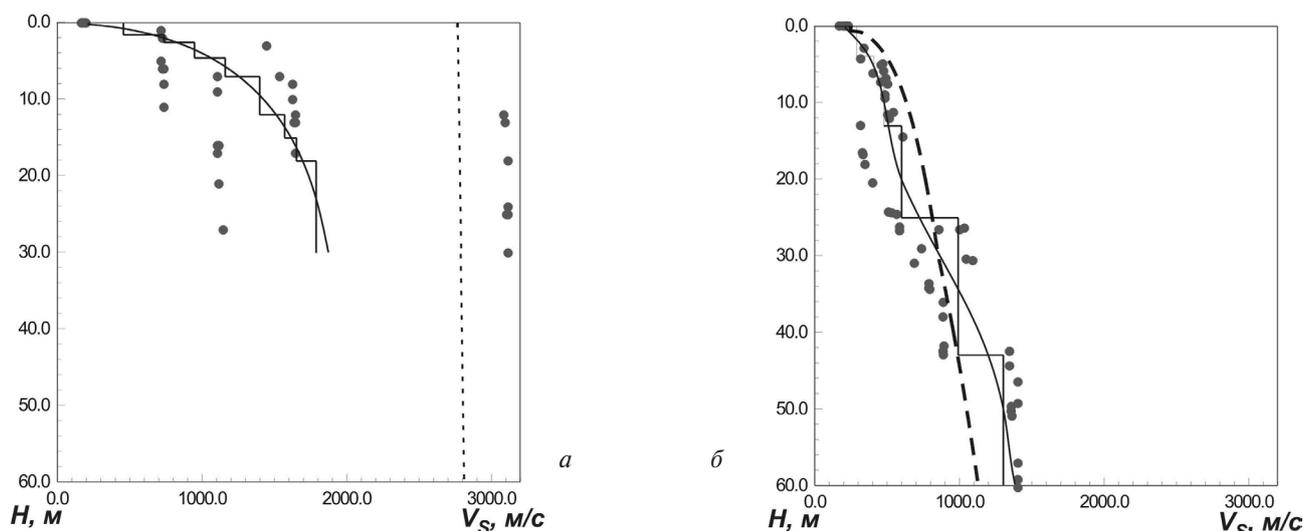


Рис. 3. Скорости поперечных волн  $V_s$  в зависимости от глубины по измерениям вдоль сейсморазведочных профилей, отработанных в районах сейсмостанций РЕТ (а) и «INS (б) по данным работы (Аносов, Павленко, 2006). Точки — значения, полученные для отдельных пикетов, разнесенных на 20 м; линии — осредняющие (плавной и кусочной кривыми) зависимости (для станции РЕТ при осреднении меньше веса были приписаны вызывавшим сомнения точкам, отскачившим за значения 3000 м/с). Для сравнения пунктиром показаны скоростные профили «очень твердой скалы» (hard rock site) (а) и «типичной скальной станции» (generic rock site) (б) из работы (Boore, Joyner, 1997).

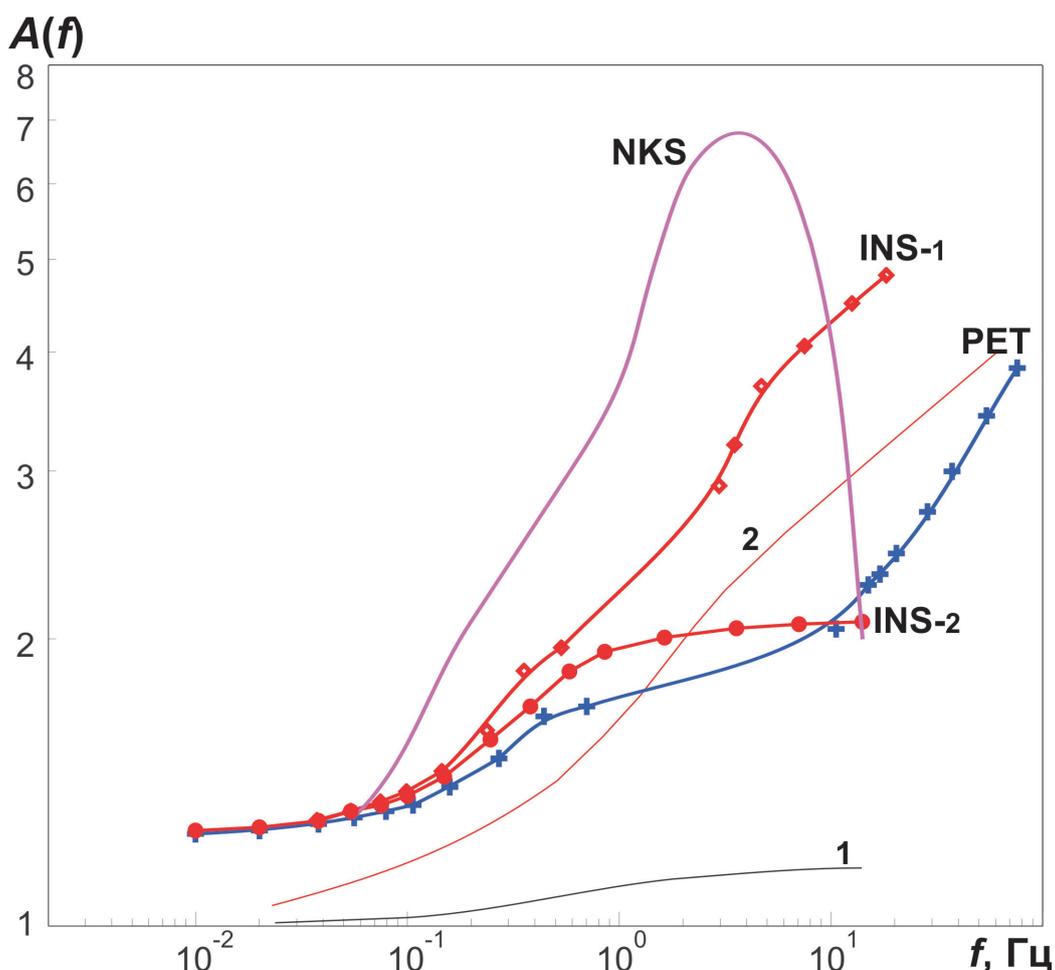


Рис. 4. Частотно-зависимое усиление сейсмических волн в приповерхностных слоях на станциях РЕТ, INS (значками показаны значения  $A(f)$ , рассчитанные по скоростным профилям) и NKS. INS-1 — усиление на поверхности грунта на станции INS; INS-2 — усиление на глубине 160 м, в основании грунтовой толщи. Для сравнения приведены кривые усиления из работы (Boore, Joyner, 1997): 1 — усиление на «очень твердой скале», 2 — усиление на «типичной скальной станции» (generic rock site) ( $V_{s-30} = 620$  м/с).

У. Джойнера и Т. Чена (Joyner, Chen, 1975). Рассчитывалась классическая задача инженерной сейсмологии: распространение падающей вертикально снизу поперечной сейсмической волны в горизонтально-слоистой толще осадочных пород с заданными упруго-прочностными характеристиками. Поведение грунта описывалось зависимостями напряжение–деформация, полученными в лабораторных экспериментах Б. Хардина и В. Дрневича (Hardin, Drnevich, 1972), которые нормированы способом, предложенным Хардином и Дрневичем: напряжения нормированы умножением на  $1/\tau_{max}$ , где  $\tau_{max}$  — предельное сдвиговое напряжение, а деформации — умножением на  $G_{max}/\tau_{max}$ , где  $G_{max}$  — модуль сдвига в области малых деформаций. Зависимость напряжение–деформация, нормированная таким образом, имеет предел 1.0 по напряжениям при больших деформациях и наклон 1.0 в окрестности нуля. Поведение всех грунтовых слоев описывалось одной нормированной нелинейной гистерезисной зависимостью напряжение–деформация; различия в поведении грунтовых слоев, различающихся по своему составу и глубине залегания, определяются различиями величин  $\tau_{max}$  и  $G_{max}$  в слоях.

Для уточнения параметров «грунтового» профиля на станции INS использовался генетический алгоритм (Evolutionary ..., 1998). Генетический алгоритм как метод многомерной оптимизации широко применяется в геофизике для поиска минимумов многомерных функций. Суть метода заключается в том, что параметры системы, минимизирующие некоторую функцию, задаются в виде набора векторов, которые мы можем видоизменять методами, аналогичными биологическим преобразованиям: путем их скрещивания, размножения и мутаций. В результате производится естественный отбор параметров, минимизирующих целевую функцию (Гладков и др., 2006; Evolutionary ..., 1998).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

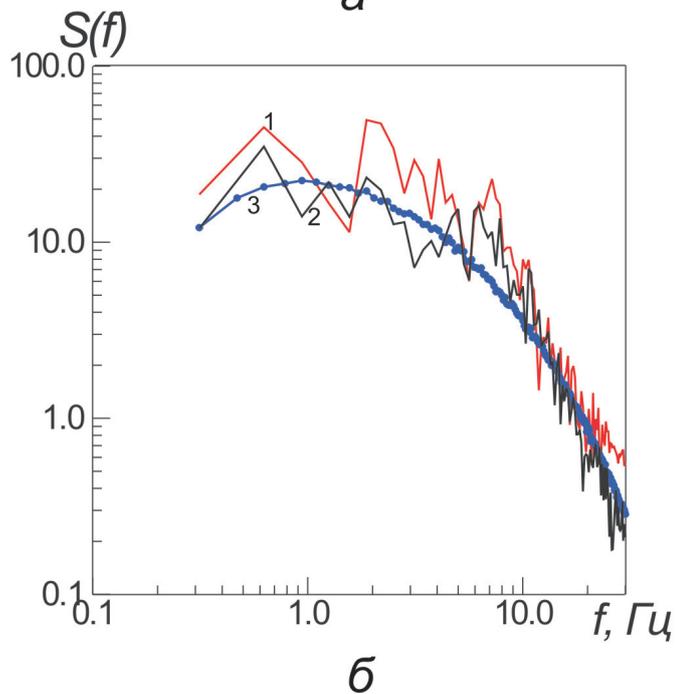
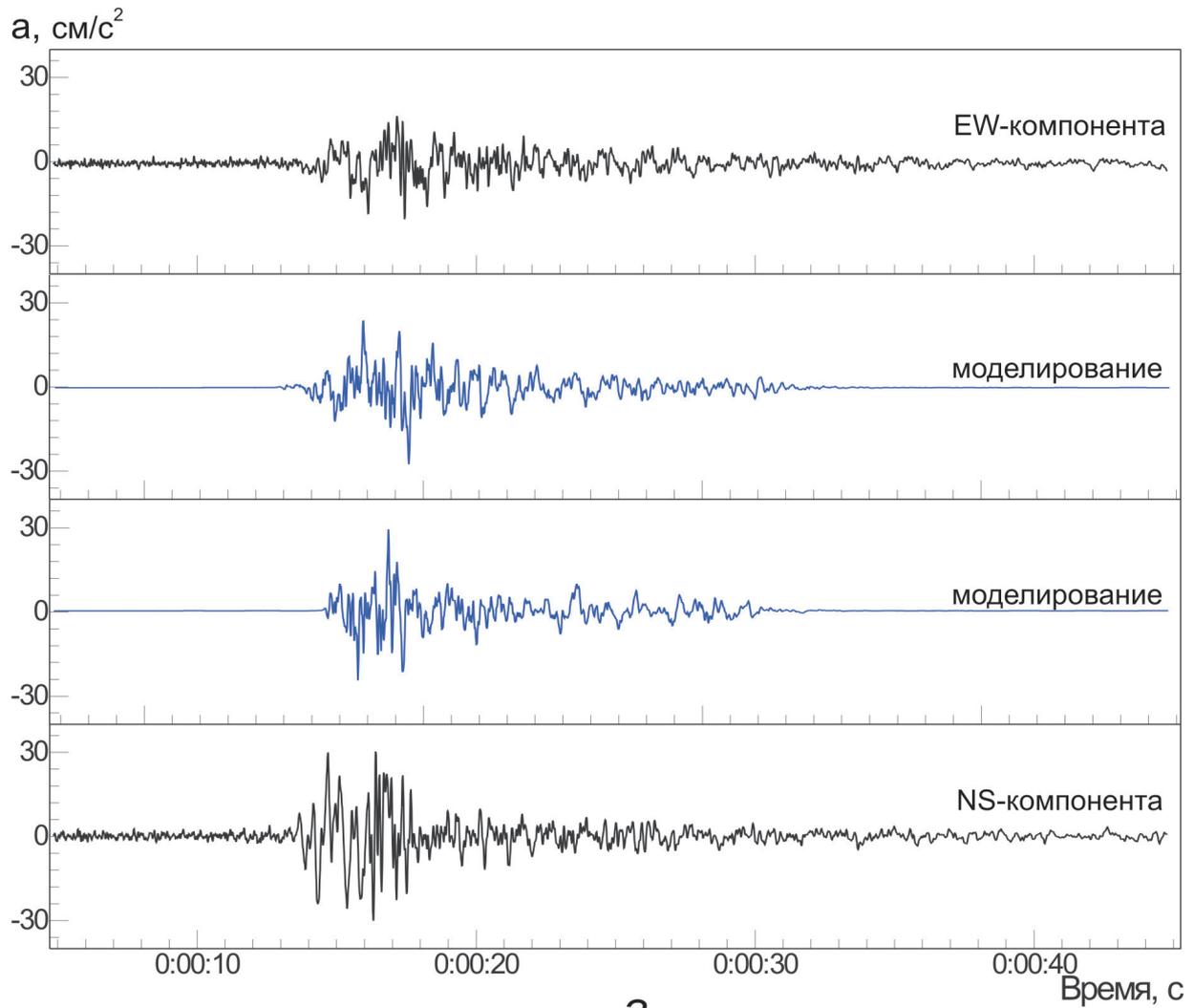
*Моделирование акселерограмм землетрясения на станции РЕТ.* При моделировании акселерограмм (рис. 5, табл. 2) очаг представлялся в виде протяженного сейсмического источника,  $90 \times 30$  км — совокупности 27 субочагов с размерами  $10 \times 10$  км и моментными магнитудами 6.1. Интенсивность излучения предполагалась одинаковой для всех субочагов (скалярный сейсмический момент землетрясения  $M_0$  равномерно распределен между субочагами). Координаты и глубина центра и ориентация разломной плоскости взяты из данных Центра Global CMT. Сброшенное напряжение (в субочаге)  $\Delta\sigma \sim 100$  бар выбрано из условия соответствия

уровня спектральных амплитуд зарегистрированных и смоделированных записей в диапазоне 0.5–3 Гц. Параметры геометрического расхождения сейсмических волн в условиях Камчатки оценены А.А. Гусевым и Л.С. Шумиловой (1999): до расстояний  $\sim 150$  км амплитуды волн обратно пропорциональны расстоянию  $\sim 1/r$ , что очевидно связано со строением среды в этом регионе — зоной субдукции. Скорость поперечных волн и средняя плотность пород в окрестности очага выбраны типичными для пород мантии на глубинах очага  $\sim 54$  км (Буллен, 1978).

Частотно-зависимое затухание сейсмических волн  $Q(f)$  оценено для Камчатки в разных диапазонах частот (Abubakirov, Gusev, 1990). Полученные оценки можно описать зависимостью с показателем степени  $f$  близким к 1:  $Q(f) = 180 \cdot f^{0.7}$ . При этом параметр  $\kappa$ , характеризующий ослабление сейсмических волн на высоких частотах  $D(f) = \exp(-\rho\kappa f)$ , подбирается настройкой спектров синтезированных акселерограмм в высокочастотной области. Для  $Q(f) = 180 \cdot f^{0.7}$  получено значение  $\kappa \sim 0.06$  с, что близко к полученному ранее значению  $\kappa \sim 0.07$  с для Тайваня (Pavlenko, Wen, 2008; Roumelioti, Beresnev, 2003) и показывает довольно сильное ослабление сейсмических волн на высоких частотах. В условиях Тайваня это очевидно связано с повышенной трещиноватостью горных пород, обусловленной высокой влажностью и перепадами температур. На Камчатке повышенная трещиноватость горных пород также может быть связана с воздействием местных климатических условий: частых циклонов, сильных ветров, осадков.

Поскольку оба параметра,  $Q(f)$  и  $\kappa$ , характеризуют частотно-зависимое затухание сейсмических волн, они очевидно дают избыточное описание затухания, и было бы логично их объединить. При условии  $\kappa \sim 0.0$  с  $Q(f)$  можно описать зависимостью  $Q(f) = 200 \cdot f^{0.3}$ , что получено в работе Абубакирова (2005) и согласуется с ранее сделанными оценками (Abubakirov, Gusev, 1990), где детально изучены характеристики затухания поперечных волн в литосфере Камчатки в разных частотных интервалах.

Сравнение зарегистрированных и рассчитанных акселерограмм и их спектров дает представление о точности моделирования. В целом достигнуто хорошее согласие расчетов и наблюдений (рис. 5), однако можно отметить некоторый недостаток низкочастотных компонент в смоделированных акселерограммах: на частотах ниже  $\sim 0.7$  Гц смоделированные спектры по уровню несколько ниже наблюдаемых. Возможно, это связано с ограничениями примененной методологии: в силу того, что акселерограммы рассчитываются как суммированное



**Рис. 5.** Акселерограммы землетрясения 13.11.1993 г. (а), зарегистрированные сейсмостанцией РЕТ и смоделированные; амплитудные спектры Фурье акселерограмм (б): спектры компонент ВЗ (1) и СЮ (2) и средний спектр (3), рассчитанный по серии 250-ти смоделированных акселерограмм.

Таблица 2. Параметры, использованные при моделировании акселерограмм землетрясения 13 ноября 1993 г.

Координаты эпицентра по данным Global CMT	52.0° с.ш., 159.27° в.д.
Глубина эпицентра по данным Global CMT	54.2 км
Размеры площадки очага	90 × 30 км
Размер субочага	10 к × 10 км
Ориентация разломной плоскости	азимут 206°, падение 31°
Сброшенное напряжение $\Delta\sigma$	100 бар
$Q(f)$	$200 \cdot f^{0.3}$
Геометрическое расхождение	$1/r$
Параметр затухания на высоких частотах $\kappa$ , (с)	0.0
Скорость S-волн в окрестности очага	4.3 км/с
Средняя плотность пород в окрестности очага	3.3 г/см <sup>3</sup>

излучение субисточников меньшей магнитуды, чем моделируемое сильное событие, мы имеем заниженные низкочастотные компоненты. Чтобы этого избежать, при моделировании размеры субисточников выбирались по возможности большими. Другая возможная причина некоторого несогласия спектров в низкочастотной области — в сложном характере спектров Камчатских землетрясений. В работе (Гусев, 1993) отмечалась выраженная двугорбость спектров начиная с магнитуд  $M_w \sim 6.5-7.0$ .

*Моделирование акселерограмм землетрясения на станции INS.* Модельная акселерограмма землетрясения на «грунтовой» станции INS представляет собой реализацию случайного процесса — произвольно ориентированную горизонтальную компоненту (рис. 6). Станция INS не является «скальной», и рассчитанный сигнал на скальном фундаменте (параметры очага и пути распространения описаны выше) пересчитывался в отклик на поверхности грунта.

Поскольку изучаемый сейсмический очаг расположен достаточно далеко от сейсмостанций, и зарегистрированные ускорения невысоки, нелинейность отклика грунта очевидно слаба.

Однако, при расчетах отклика грунтовой толщи с параметрами грунтового профиля, полученными сейсморазведкой, спектры рассчитанных и зарегистрированных акселерограмм существенно различаются (рис. 6б). Реально наблюдаемые резонансные частоты отклика грунта лежат в диапазоне 0.3–1 Гц, тогда как расчеты дают резонансные пики на 1–5 Гц. Существенный разброс значений сейсмических скоростей, полученных сейсморазведкой для отдельных пикетов, позволяет предположить в среднем более низкие скорости S-волн под станцией INS (рис. 3б), однако и расчеты с более низкими скоростями S-волн в слоях также не дают согласия с наблюдениями.

Если представить станцию INS как скальную и рассчитывать сейсмический сигнал на поверхности с учетом усиления в приповерх-

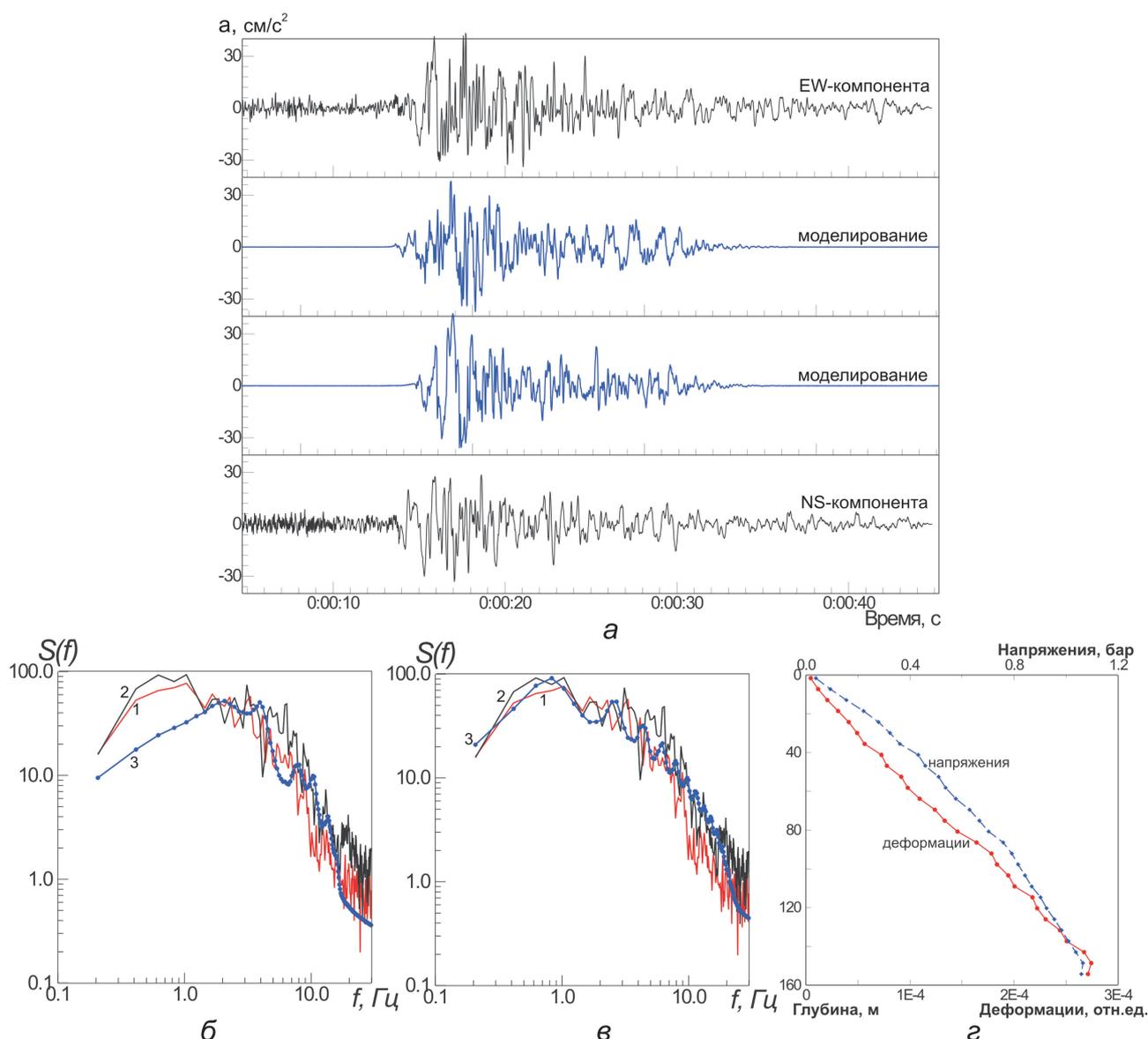
ностных грунтах  $INS_{-1}$  (рис. 4), мы также не получаем согласия расчетов и наблюдений.

В результате пришлось отказаться от полученных сейсморазведкой профильных параметров: скоростей поперечных волн и плотностей в грунтовых слоях (Аносов, Павленко, 2006) и использовать методы поиска оптимальных параметров грунтового профиля с применением генетического алгоритма. Поскольку различные тестируемые варианты грунтовых разрезов с возрастающей с глубиной скоростью S-волн не давали согласия с наблюдениями, в качестве первого приближения был выбран простейший вариант — однородный грунтовой слой мощностью  $\sim 100$  м со скоростью поперечных волн  $\sim 600$  м/с (в соответствии с оценками скоростей приповерхностных слоев в этом районе (Штейнберг, Федотов 1974)). Подбирались предельные сдвиговые напряжения  $\tau_{max}$  и коэффициенты затухания в грунтовых слоях (имеется в виду «линейная» часть затухания, зависящая от пройденного волной расстояния и описываемая экспоненциальной функцией), дающие наилучшее согласие с наблюдениями.

Интересно, что таким образом и был достигнут результат, то есть получены параметры грунтовой толщи, дающие хорошее согласие расчетов и наблюдений (рис. 6 а, в, г). Найденные предельные сдвиговые напряжения ( $\sim 2.5$  бар вблизи поверхности и  $\sim 3.3$  бар в основании грунтовой толщи) реалистичны и возрастают с глубиной в соответствии с ростом гидростатического давления. При найденных параметрах грунтовой толщи акселерограммы колебаний на поверхности хорошо согласуются с наблюдениями как по форме, так и по спектральному составу (рис. 6а, 6в). При сильных движениях в грунтовой толще возбуждались колебания с частотой основного тона 0.4–1 Гц (рис. 6в); напряжения и деформации в слоях при этом монотонно возрастали с глубиной (рис. 6г).

Мощность однородного грунтового слоя на станции INS была уточнена в последую-

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКСЕЛЕРОГРАММ

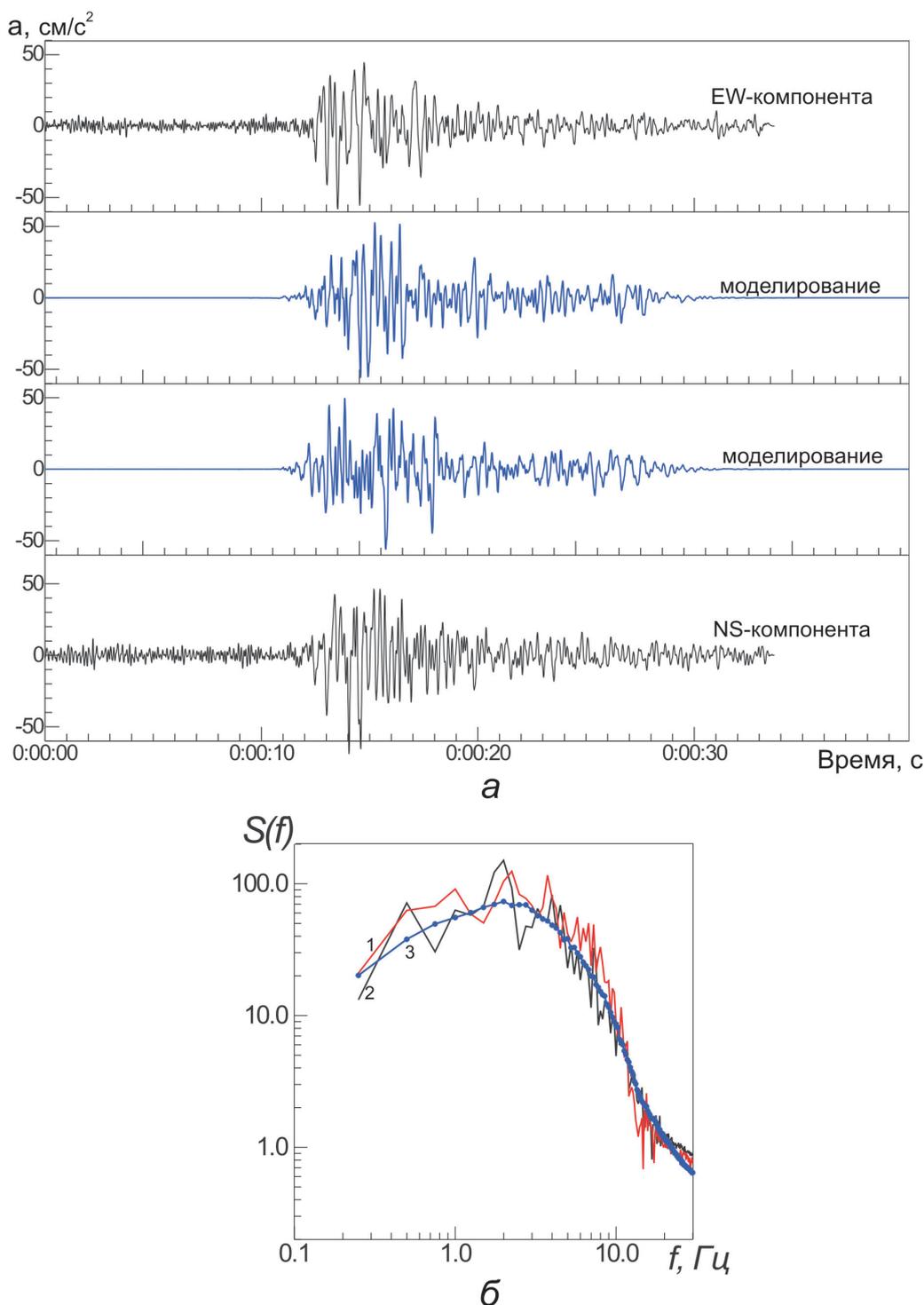


**Рис. 6.** Акселерограммы землетрясения 13.11.1993 г. (а), зарегистрированные сейсмостанцией INS и смоделированные; амплитудные спектры Фурье акселерограмм (б, в): б — рассчитанные с параметрами грунтового разреза, полученными методами сейсморазведки, в — рассчитанные для однородного грунтового слоя мощностью ~ 160 м; з — вертикальные распределения напряжений и деформаций, возбужденных в 160-метровом грунтовом слое при землетрясении. Условные обозначения представлены на рис. 5.

щих расчетах; наилучшее согласие расчетов и наблюдений получено при мощности грунтовой толщи ~ 160–180 м. Однородность грунтовой толщи в районе Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН подтверждается описанием разреза скважины, пробуренной на территории института: «Скважина НИС-1 (глубина 350 м) расположена в пределах Петропавловского горста в районе погребенной депрессии, перекрытой толщей позднеплейстоценовых вулканогенно-осадочных отложений. В интервале 0–180 м вскрыта глыбово-щебнисто-песчаная толща ( $Q_3$ ); в интервале 180–350 м — морские валунно-галечниковые отложения ( $Q_{2-3}$ ). Уровень воды находится на глубине ~ 50 м ниже устья скважины» (Копылова, 2009, с. 58).

Оценки мощности грунтовой толщи на станции INS ~ 160–180 м косвенно подтверждаются тем, что высота станции над уровнем моря ~ 175 м (табл. 1), и в обнажениях пород на берегу Авачинской бухты (рис. 1) вблизи станции INS видны ~ 15 м более древних отложений, перекрытых сверху щебнисто-песчаной толщей, мощность которой в предположении горизонтально-слоистого залегания пород и будет составлять ~ 160 м.

Глыбово-щебнисто-песчаная толща вулканогенно-осадочных отложений мощностью в десятки-сотни метров покрыла значительную часть территории современного Петропавловска-Камчатского при двух катастрофических мощных взрывах Пра-Авачинского вулкана 30–45 тысяч лет назад (Мелекесцев и др., 1991).



**Рис. 7.** Акселерограммы землетрясения 13.11.1993 г. (а), зарегистрированные сейсмостанцией NKS и смоделированные; амплитудные спектры Фурье акселерограмм (б). Условные обозначения представлены на рис. 5.

Осадочные толщи отложились на большой территории в течение короткого промежутка времени, чем очевидно и объясняется их однородность. И, вероятно, неточности в интерпретации сейморазведочных данных, полученных в окрестностях Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, можно объяснить необычным в практике сейморазведки постоянством скоростей сейсмических волн до глубин порядка двух сотен метров.

Нужно отметить, что такая грунтовая толща мощностью ~ 160 м очень существенно изменяет как интенсивность, так и спектральный состав колебаний на поверхности. Отмеченный на станции РЕТ некоторый дефицит низкочастотных колебаний (на частотах ниже ~ 0.5 Гц), если он и имел место на станции INS (в основании грунтовой толщи), уже не виден в модельных записях на поверхности грунта.

*Моделирование акселерограмм землетрясения на станции NKS.* На станции NKS акселерограммы рассчитывались с использованием предварительно оцененных характеристик частотно-зависимого усиления сейсмических волн в приповерхностных слоях (рис. 4) (выбор параметров очага и пути распространения описан выше). Результаты моделирования акселерограмм землетрясения 13 ноября 1993 г. и их амплитудные спектры Фурье на NKS показывают согласие расчетов и наблюдений (рис. 7). Станция NKS располагалась на вершине Никольской сопки — небольшой протяженной в направлении север-юг возвышенности, вытянутой вдоль берега Авачинской бухты (на рис. 1 положение Никольской сопки совпадает с положением станции NKS). Сопка имеет довольно крутые (до ~ 35-50°) склоны в перпендикулярном к берегу направлении, и естественно предположить, что наблюдаемая частотная зависимость усиления сейсмических волн на NKS связана с топографическими эффектами — они должны быть существенны в таких случаях. Это предположение подтверждается заметным усилением колебаний на NKS по сравнению со станцией РЕТ, расположенной в средней части склона соседней сопки, а также различием спектров колебаний на горизонтальных и вертикальных компонентах на NKS.

## ВЫВОДЫ

Смоделированы акселерограммы землетрясения, происшедшего 13 ноября 1993 г., с моментной магнитудой 7.0, очаг которого располагался на глубине ~ 54 км и на удалении ~ 120 км от Петропавловска-Камчатского. По записям «скальной» станции «Петропавловск» оценены параметры, характеризующие излучение и распространение сейсмических волн в окрестностях Петропавловска-Камчатского (таб. 2). Очаг размером 90 × 30 км представлен в виде совокупности 27 субочагов с размерами 10 × 10 км, с моментными магнитудами 6.1 и величинами сброшенного напряжения  $\Delta\sigma = 100$  бар; параметры пути распространения описываются частотно-зависимым неупругим поглощением  $Q(f) = 200 \cdot f^{0.3}$  и геометрическим расхождением  $1/r$ .

По записям «грунтовой» станции INS оценены параметры грунтовой толщи на станции INS: мощность 160 м, скорость S-волн ~ 600 м/с,  $\tau_{max}$  от 2.5 бар на поверхности до 3.3 бар на глубине 160 м, коэффициенты линейного затухания ~ 0.4 и построена модель поведения грунта на станции при сильном землетрясении (вертикальные распределения напряжений и деформаций в грунтовой толще; зависимости напряжение-деформация аналогичные зависимостям

Б. Хардина и В. Дрневича (Hardin, Drnevich, 1972)). Записи станции NKS показывают значительные локальные эффекты усиления сейсмических колебаний, вероятно связанные с топографическими эффектами.

Найденные параметры и модели поведения грунта предполагается проверить (и возможно уточнить) моделированием записей других сильных землетрясений Камчатской сейсмогенной зоны на станциях Камчатской сети сильных движений.

Автор благодарит Александра Александровича Гусева, Виктора Михайловича Павлова (Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский) и анонимного рецензента за ценные консультации и замечания по всем аспектам моделирования.

## Список литературы

- Абубакиров И.Р.* Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдения цифровых широкополосной станции «Петропавловск» // Физика Земли. 2005. № 10. С. 46–58.
- Аносов Г.И., Павленко О.В.* Расчет отклика грунта и построение синтетических акселерограмм в пунктах «Институт Вулканологии» и «Станция Петропавловск» в Петропавловске-Камчатском // Сб. трудов VI Всеукраинской научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Строительство в сейсмических районах Украины». 25–30 сентября 2006 г. Ялта, 2006. С. 20–22.
- Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А. и др.* Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ — ГСЗ) // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 43–55.
- Буллен К.Е.* Плотность Земли. М.: Мир, 1978. 437 с.
- Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. М: Физматлит, 2006. С. 320.
- Гусев А.А.* Свойства и природа короткопериодного излучения очага землетрясения. Автореферат дисс. докт. физ.-мат. наук. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. Москва, 1993. 44 с.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 29–40.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С., Акатова К.Н.* Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Электрон. науч.-информ. журнал «Вестник ОГГГН РАН». 2005. № 1 (23). С. 1–22.

- <http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/stgusev/gusevao2005scenario%5B1%5D.pdf>.
- Делемень И.Ф., Аносов Г.И., Константинова Т.Г.* Сейсмогеологические исследования при проведении сейсмического микрорайонирования, изысканиях под строительство и сейсмическом усилении зданий и сооружений в условиях Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Первая региональная научно-техническая конференция, Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 86.
- Копылова Г.Н.* Оценка информативности уровнемерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56–68.
- Мелекесцев И.В., Литасова С.И., Сулержицкий Л.Д.* О возрасте и масштабе катастрофических извержений типа направленного взрыва вулкана Авачинский (Камчатка) в позднем плейстоцене // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 3–11.
- Назарова З.А.* Одномерные скоростные модели литосферы Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. № 3. С. 91–97.
- Штейнберг В.В., Федотов С.А.* Оценка параметров колебаний почвы в г. Петропавловске-Камчатском при возможном сильном землетрясении // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / Отв. ред. Федотов С.А. Новосибирск: Наука, 1974. С. 90–100.
- Abubakirov I.R., Gusev A.A.* Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake // Physics of the Earth and Planetary Interior, 1990. V. 64. № 1. P. 52–67.
- Boore D.M.* Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // Pure and Applied Geophysics 2003. V. 160. № 3–4. P. 635–676.
- Boore D.M., Joyner W.B.* Site amplifications for Generic Rock Sites // Bulletin of the Seismological Society of America. 1997. V. 87. № 2. P. 327–341.
- Evolutionary Computation: The Fossil Record / Ed. D.B. Fogel. IEEE Press, New York, 1998. 656 p.
- Gusev A.A., Pavlov V.M.* Wideband simulation of earthquake ground motion by a spectrum-matching, multiple-pulse technique // Preprint (IC/2006/023). Trieste. 2006. 26 p.
- Hanks T.C., McGuire R.K.* The Character of High-frequency Strong Ground Motion // Bulletin of the Seismological Society of America 1981. V. 71. № 6. P. 2071–2095.
- Hardin B.O., Drnevich V.P.* Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves // Journal of Soil Mechanics and Foundation Division 1972. V. 98. № 7. P. 667–692.
- 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.
- Pavlenko O.V., Wen K.-L.* Estimation of Nonlinear Soil Behavior during the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake Based on Stochastic Finite-Fault Simulations // Pure and Applied Geophysics. 2008. V. 165. № 2. P. 373–407.
- Roumelioti Z., Beresnev I.A.* Stochastic Finite-Fault Modeling of Ground Motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake: Application to Rock and Soil Sites with Implications for Nonlinear Site Response // Bulletin of the Seismological Society of America. 2003. V. 93. № 4. P. 1691–1702.

**SIMULATION OF ACCELOGRAMS OF THE NOVEMBER 13, 1993 EARTHQUAKE ( $M_w = 7.0$ ,  $H = 54$  KM) AT SEISMIC STATIONS «PETROPAVLOVSK», «INSTITUT VOLCANOLOGII» AND «NIKOL'SKAYA» (PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY)****O.V. Pavlenko***Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, 123242*

In order to estimate parameters of ground motion for future strong earthquakes, the author studies characteristics of radiation and propagation of seismic waves in Kamchatka region. Acceleration time histories of the earthquake ( $M_w = 7.0$ , depth 54 km) occurred near the eastern coast of Kamchatka on November, 13, 1993 were stochastically simulated (at horizontal components) at seismic stations «Petropavlovsk», «Institut Vulkanologii», and «Nicol'skaya» in Petropavlovsk-Kamchatsky. For these calculations the author used estimations of frequency-dependent attenuation  $Q(f) \sim 200f^{0.3}$  and geometrical spreading  $1/r$  obtained earlier for Kamchatka. The local seismic-wave amplification was estimated based on shallow geophysical site investigations and deep crustal seismic explorations; the parameters defining the shapes of the waveforms, the duration, etc. were also selected. At soil station INS, models of soil behavior in the strong motion were simulated. The estimated parameters of radiation and propagation of seismic waves should be verified by other strong motion records in Kamchatka region.

*Keywords: accelerograms, Kamchatka, radiation and propagation of seismic waves, soil behavior.*