

УДК 550.34

## СВОЙСТВА КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА ПРИ ОЛЮТОРСКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ 20.04.2006 г. И ЕГО АФТЕРШОКАХ ПО ДАННЫМ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ

© 2010 г. О. С. Чубарова<sup>1</sup>, А. А. Гусев<sup>1</sup>, В. Н. Чебров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

<sup>2</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 10.06.2008 г.

Изучены широкополосные цифровые записи сильного Олюторского землетрясения в Корякском автономном округе (20.04.2006 г.,  $M_W = 7.6$ ) и его афтершоков на близких и региональных расстояниях. Детально проанализированы данные о максимальных ускорениях и скоростях движения грунта для афтершоков по записям двух цифровых сейсмических станций Тилички (ТЛС) и Каменское (КАМ). На первом этапе анализа по данным спектров кода-волн определена стационарная поправка за грунт для ТЛС. С ее помощью данные приведены к эталонному скальному грунту (под станцией Каменское). На втором этапе проведена множественная линейная регрессия, по результатам которой построены средние зависимости максимальных амплитуд от локальной магнитуды  $M_L$  и расстояния  $R$  для условий Корякии. Разброс наблюдений относительно средних зависимостей сравнительно невелик (0.22–0.25 лог.ед). Амплитуды ускорений при  $M_L = 5$ ,  $R = 25$  км в 2–3 раза ниже, чем для условий Восточной Камчатки, запада США или Японии. Вероятная причина выявленной аномалии – в низких значениях сброшенного напряжения для афтершоков.

### ВВЕДЕНИЕ

Сильное ( $M_W = 7.6$ ) мелкофокусное Олюторское землетрясение 20(21) апреля 2006 года – сильнейшее известное землетрясение на территории Корякского автономного округа (КАО). Уровень сотрясений в эпицентральной зоне достигал 8–9 баллов. Записи колебаний грунта при Олюторском землетрясении представляют большой интерес. На территории КАО регистрация сильных движений грунта не велась вплоть до мая 2006 г. Однако, ограниченную информацию о колебаниях грунта при основном толчке все же удалось получить по записям ближайшей к эпицентру постоянной цифровой широкополосной сейсмической станции (ЦШПСС) КАМ в пос. Каменское, эксплуатируемой в рамках российско-японского научного сотрудничества. К сожалению, максимальные амплитуды используемых каналов ВН в Каменском были слишком велики для неискаженной регистрации основного толчка и даже сильнейших афтершоков.

Вскоре после землетрясения сотрудникам Камчатского филиала Геофизической службы РАН Е.П. Токареву, В.Н. Козлову и Т.В. Шевченко в сложной обстановке удалось установить цифровой акселерограф в пос. Тилички, в эпицентральной зоне, что позволило успешно и без искажений записать без искажений сотни афтершоков Олюторского землетрясения.

В работе выполнен анализ цифровых записей колебаний грунта при Олюторском землетрясении.

Помимо данных из эпицентральной зоны, привлечены также материалы других ЦШПСС на удалении до 1000 км.

### ЦИФРОВАЯ РЕГИСТРАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА НА КАМЧАТКЕ И В КОРЯКСКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ

Начиная с 1962 г., на Камчатке выполнен большой объем важных и интересных сейсмологических исследований, основным инструментом которых были на первом этапе сейсмографы с гальванометрической регистрацией и фотозаписью. В последние годы практически вся регистрация выполнялась сетью автономных радиотелеметрических станций с аналоговой ЧМ-ЧМ телеметрией и цифровым накоплением. Эта система наблюдений не обеспечивала регистрации сильных колебаний грунта. Для их регистрации имелось ограниченное число акселерографов с прямой оптической регистрацией и велосиграфов на базе 5-секундного маятника С5С. Наиболее развитыми наблюдения сильных движений были в 1985–1988 гг., когда функционировало 11 пунктов регистрации в районе г. Петропавловск-Камчатского и еще 18 вне него. Приборы работали в ждущем режиме, привязки к точному времени не имели, а степень надежности их работы, по ряду объективных и субъективных причин, была всегда ограниченной. Поясним, что одного-двух десятков чувствительных сейсмографов, размещенных на Камчатке, было достаточно, чтобы определять ги-

**Таблица 1.** Характеристики цифровых сейсмических станций

Пункт	Код с/ст.	$\varphi^\circ$ , с.ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.	$h$ , м	Грунт	Тип датчика	Регистратор	Частота опроса, $f_{\text{ц}}$ , с <sup>-1</sup>	Режим	$\Delta$ , км
Тиличики	TLC	60.4302	166.0563	52	Гравий вечномерзлый	CMG-5T(A)	GSR-24	100	Жд.	95
Каменское	КАМ	62.4560	166.2100	64	Скала	STS-1 (V)	Quanterra	20	Непр.	175
Никольское	ВКИ	55.1939	165.9835	10	Песчаник слабоцементированный	CMG-5T(A)	GSR-24	100	Жд.	650
Крутоберегово	КВГ	56.2584	162.7127	18	Пирокластика	CMG-5T(A)	GSR-24	100	Непр.	590
Петропавловск	РЕТ	53.0233	158.6501	102	Скала	STS-IV GS13 (V)	Quanterra	20, 80	Непр.	1030

Примечание.  $\varphi$  – широта;  $\lambda$  – долгота;  $h$  – высота;  $\Delta$  – эпицентрального расстояние (от инструментального эпицентра основного толчка). Пометка А или V – род канала: акселерограф или велосиграф. CMG-5T – форсбалансный акселерометр, GSR-24 – цифровой сейсмический регистратор; Quanterra – цифровая сейсмическая станция, реализует каналы ВН на датчиках STS-I и STS-IV и каналы ЕН на датчике GS13.

поцентры и энергию 1–2 тыс. слабых землетрясений региона ежегодно, что позволило детально изучать здесь географию сейсмичности, строение среды и др. В то же время, приборы сильных движений характеризуют движения грунта только в точке установки, и обобщать результаты их наблюдений на большие территории затруднительно. Редкая сеть приборов сильных движений на Камчатке за 1962–2000 гг. смогла накопить чрезвычайно ценные, но, в сущности, лишь весьма отрывочные материалы о сильных колебаниях грунта [2]. Поэтому большой интерес представляет изучение афтершоков, которые могут давать массовый, хотя и не всегда представительный материал по сильным движениям. При этом весьма желательно переходить к цифровой регистрации колебаний, что поставит систему наблюдений на более современный уровень как в плане удобства и автоматизации обработки, так и в плане расширения спектра регистрируемых колебаний в сторону низких частот.

Положение стало меняться в 1993 г. с началом работы на сейсмостанции Петропавловск ЦШПСС РЕТ в рамках консорциума “IRIS”. Для регистрации сильных толчков станция имела в комплекте канал низкой чувствительности на базе акселерометра с обратной связью (FBA). Записи этой станции позволили начать исследование колебаний грунта на Камчатке на основе прямой цифровой записи в весьма широкой полосе частот. Но лишь после 2002 г. начала развлекаться собственно сеть цифровых приборов, формирование которой еще не завершено. Олюторское землетрясение послужило определенной проверкой работоспособности этой сети.

В статье использованы записи нескольких сейсмических станций и приборов, их краткая характеристика дана в табл. 1. Отметим, что большой динамический диапазон современных цифровых сейсмических станций позволяет в ряде случаев вести

запись и сильных движений грунта и слабых землетрясений одной и той же аппаратурой.

Поскольку Олюторское землетрясение возникло на заметном расстоянии от Камчатской сети, в настоящей работе, помимо станций КАМ и TLC, расположенных в КАО, изучались записи только ближайших к эпицентру станций Камчатской сети – ВКИ и КВГ, а также опорной станции РЕТ (рис. 1). На использованных станциях (кроме КАМ) провели контроль калибровки путем сравнения, для отдельных землетрясений, записей выбранных каналов регистрации и альтернативных цифровых каналов. В качестве альтернативных использовали каналы мобильной станции “MARS” (Lennartz) для TLC (данные по слабым толчкам), каналы C5C-OC с обратной связью разработки КФ ГС РАН (Ю.В. Шевченко) для ВКИ и КВГ и каналы региональной телеметрии (РТСС) для РЕТ. Использование станций “MARS” для изучения сильных движений оказалось практически невозможным из-за их недостаточного динамического диапазона.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, ПРОЦЕДУРЫ ОБРАБОТКИ

В работе изучались записи основного толчка Олюторского землетрясения и его афтершоков (рис. 1, табл. 2). Очаговые параметры в табл. 2 приводятся по каталогу КФ ГС РАН. Цифровые записи землетрясений отбирались из основного цифрового архива КФ ГС РАН. Для основного толчка и афтершоков были рассмотрены записи в целом, их спектры Фурье и максимальные амплитуды движения грунта. Материалы по максимальным амплитудам на ближайших к эпицентральной зоне сейсмостанций Тиличики (TLC) и Каменское (КАМ) (49 трехкомпонентных записей) были затем использованы для определения средних зависимостей амплитуд от магнитуды и расстояния.

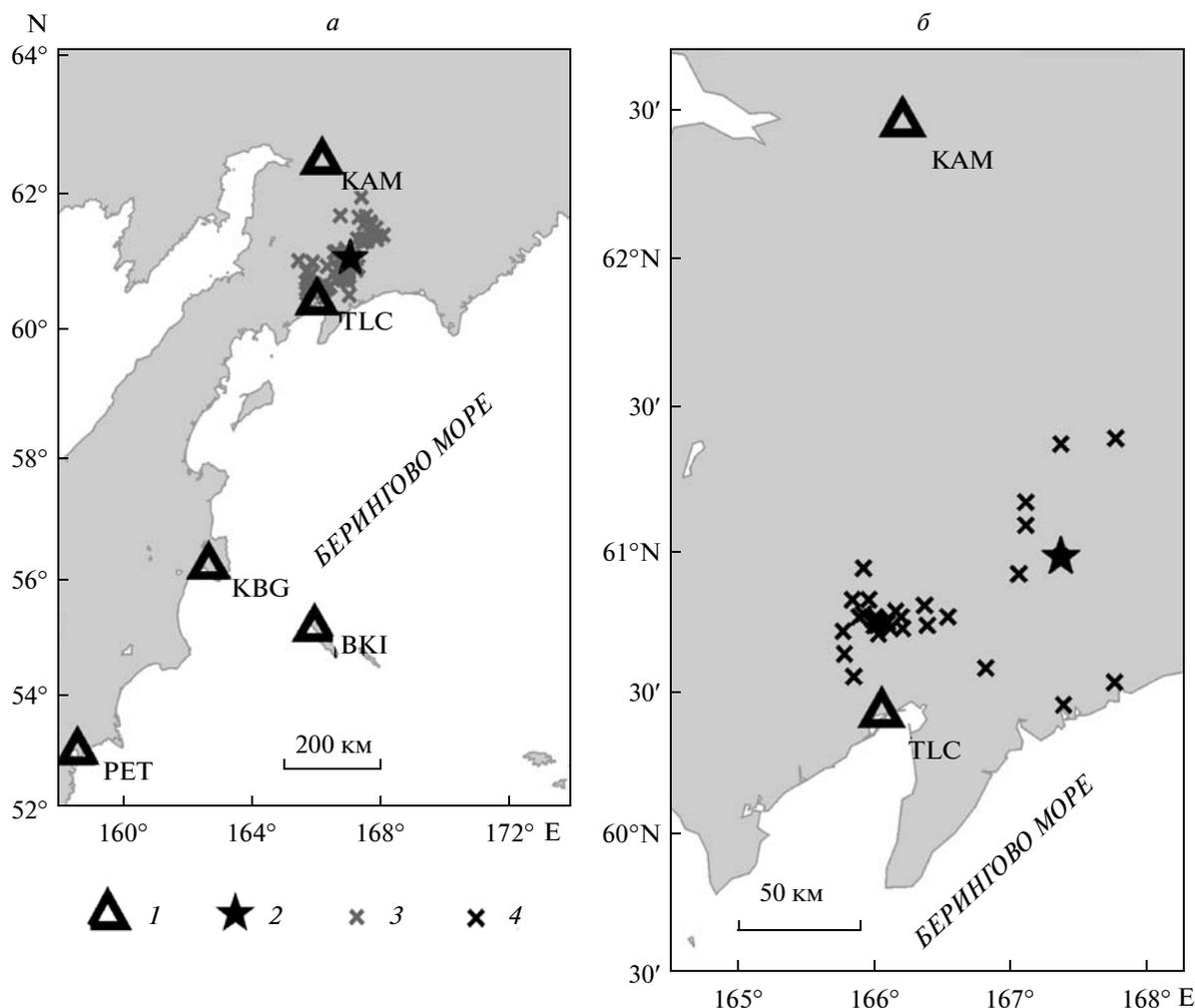


Рис. 1. Схема расположения станций и эпицентров землетрясений: *a* – очаговая зона, очерченная эпицентрами афтершоков за первые трие суток; *б* – эпицентры афтершоков, цифровые записи которых обработаны. 1 – цифровые сейсмические станции; 2 – эпицентр основного толчка; 3, 4 – эпицентры афтершоков.

Для обработки записей был применен новый программный пакет, развивающий ранее отработанную методику [3]. В пакете частично использован модуль деконволюции, любезно предоставленный В.М. Павловым. В плане собственно обработки алгоритм обработки реализует следующую последовательность операций:

- выбор сегмента обработки (в диалоге);
- коррекция за передаточную функцию прибора в максимально широкой полосе частот путем деконволюции в частотной области “вслепую”;
- интерактивный выбор рабочей полосы частот (минимальная частота  $f_1$ , максимальная –  $f_2$ ) для надежного восстановления амплитуд сигнала;
- повторная деконволюция в частотной области в пределах выбранной полосы, расчет восстановленных сигналов ускорения, скорости и смещения;
- снятие максимальных амплитуд ускорения, скорости и смещения;

– расчет оценки сглаженного амплитудного спектра Фурье в пределах выбранной полосы с предварительным выбеливанием сигнала;

– расчет спектра реакции.

Важным и существенным новым элементом программного пакета является использование при оценке сглаженного амплитудного спектра Фурье процедуры предварительного выбеливания сигнала (prewhitening). Этот метод был первоначально разработан для расчета оценок спектров мощности стационарных сигналов [1]. Впервые он применен к оценке сглаженного спектра Фурье сейсмической записи. Метод позволяет существенно подавить искажения оценок спектра при наличии в нем участков крутого спада или нарастания. Известно, что простое сглаживание приводит в подобных случаях к заметному искажению оценок за счет просачивания мощности от “более тяжелой” к “более легкой” стороне сглаживающего окна. Данная проблема яв-

Таблица 2. Список обработанных землетрясений

Дата, дд/мм/гггг	Время, ч:мин:с	$\varphi^\circ$ , с.ш.	$\lambda^\circ$ , в.д.	$H$ , км	$K_S$	$M_L$	$m_b$	Обработаны записи сейсмостанций
20/04/2006	23:24:57	60.98	167.37	1	15.7*	7.1	6.8	КАМ КВГ ВКИ РЕТ
21/04/2006	00:51:08	61.09	167.11	1	12.2	5.4	5.3	КАМ
21/04/2006	04:32:45	60.56	165.85	22	12.7	5.6	6.3	ВКИ КАМ
21/04/2006	11:14:12	61.39	167.77	0	13.5	6.0	5.8	ВКИ КАМ
21/04/2006	20:50:01	60.92	167.06	0	11.9	5.2	5.3	ВКИ КАМ
22/04/2006	07:21:58	61.17	167.11	14	12.6	5.6	5.8	ВКИ КАМ
22/04/2006	09:20:47	60.64	165.78	17	9.5	4.0	4.5	КАМ
29/04/2006	12:57:54	60.94	165.92	4	12.0	5.3	5.1	КАМ
29/04/2006	16:58:05	60.54	167.76	0	14.4	6.5	6.4	ВКИ КАМ
07/05/2006	00:54:54	60.46	167.39	0	10.0	4.3	4.6	TLC КАМ
09/05/2006	03:31:38	60.83	165.84	9	10.2	4.4	4.5	TLC КАМ
09/05/2006	11:02:20	60.74	166.02	5	13.0	5.8	5.6	TLC КАМ ВКИ
11/05/2006	12:50:09	60.83	165.96	6	9.6	4.1	4.6	TLC КАМ
11/05/2006	13:41:56	60.76	166.03	1	9.7	4.1	4.6	TLC КАМ
14/05/2006	05:16:47	60.74	166.00	10	10.7	4.6	4.7	TLC КАМ
18/05/2006	19:30:23	60.75	166.05	2	10.9	4.7	5.1	TLC КАМ
22/05/2006	11:11:56	60.75	166.10	3	14.2	6.4	6.0	TLC КВГ ВКИ РЕТ КАМ
22/05/2006	11:29:52	60.73	166.21	5	11.1	4.8	4.8	TLC КАМ
22/05/2006	11:43:51	60.81	166.37	10	10.5	4.5	4.6	TLC КАМ
22/05/2006	11:50:30	60.76	166.01	9	11.8	5.2	4.9	TLC КАМ
22/05/2006	12:04:49	60.77	166.20	5	11.6	5.1	4.9	TLC КАМ
22/05/2006	12:30:11	60.77	166.01	14	11.2	4.9	5.0	TLC КАМ
22/05/2006	13:03:08	60.73	166.12	12	12.6	5.6	5.3	TLC КАМ
22/05/2006	15:16:27	60.79	166.16	7	10.5	4.5	4.5	TLC КАМ
22/05/2006	22:40:42	60.74	166.39	6	10.3	4.4	4.5	TLC КАМ
24/05/2006	15:44:49	60.78	165.92	8	11.8	5.2	5.1	TLC КАМ
24/05/2006	20:48:44	60.71	166.03	15	10.7	4.6	5.1	TLC КАМ
27/05/2006	04:09:01	60.77	165.89	7	10.8	4.7	4.8	TLC КАМ
27/05/2006	23:57:52	60.76	165.99	17	10.8	4.7	4.5	TLC КАМ
29/05/2006	19:39:35	60.72	165.77	10	10.2	4.4	4.6	TLC КАМ
09/06/2006	07:25:17	60.59	166.82	32	10.0	4.3	4.6	TLC
07/07/2006	11:56:04	60.77	166.54	29	10.0	4.3	4.3	TLC
11/08/2006	06:45:42	61.37	167.37	6	10.2	4.4	4.7	TLC

Примечание.  $\varphi$  – широта;  $\lambda$  – долгота;  $H$  – глубина;  $K_S$  – энергетический класс по  $S$ -волнам, \* – энергетический класс  $K_c$  по кода-волнам;  $M_L = K_S/2 - 0.75$  – локальная магнитуда,  $m_b$  – магнитуда по объемным волнам.

ляется вполне реальной. В частности, крутой (по экспоненте  $e^{-Kf}$ ) спад спектров Фурье в области высоких частот за счет поглощения сейсмических волн в Земле – неперенное свойство наблюдаемого сигнала. Часто достаточно крутым является также спад спектра ускорений объемных волн в области низких частот (ниже корнер-частоты). В обоих случаях при сглаживании обычным путем спектры заведомо искажаются. Использование предвари-

тельного выбеливания сигнала позволяет почти полностью подавить искажения.

Процедура деконволюции и восстановления сигнала использует параметры полосы частот восстановления ( $f_1, f_2$ ). Значение  $f_2$  выбирали как 0.6–0.7 частоты Найквиста  $f_H = 0.5/\Delta t$ , где  $\Delta t$  – шаг цифровки, а значение  $f_1$  – исходя из необходимости ограничить паразитный низкочастотный сигнал [3]. Выбор этих параметров частично влияет на резуль-

тат восстановления. В частности, по записям велосиграфов КАМ с  $\Delta t = 0.05$  с невозможно восстановить участок спектра ускорения от 6–7 до 15 Гц. Аналогично, по записям акселерографов не удастся восстановить участок спектра смещения в диапазоне 0.01–0.1 Гц. Поэтому для велосиграфов (каналы ВН) использовали:  $f_1 = 0.02–0.03$  Гц,  $f_2 = 6–7$  Гц, а для акселерографов:  $f_1 = 0.07–0.1$  Гц,  $f_2 = 40$  Гц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ

В разделе описаны материалы обработки и первичного анализа изученных записей. Представлен графический материал по основному толчку и нескольким сильнейшим афтершокам. Приводятся восстановленные сигналы движения грунта – ускорения, скорости и смещения – для всех трех компонент, а также сглаженные амплитудные спектры Фурье для сигналов ускорения. Сглаживание спектров Фурье всегда проводилось с логарифмически постоянной шириной окна, составляющей 0.1 декады (1/3 октавы). Более обширные графические материалы, включая примеры спектров реакции и таблицы максимальных амплитуд движения грунта, приведены в [6].

На рис. 2 показаны восстановленные движения грунта для основного толчка на четырех станциях. Искорженная необработанная запись велосиграфа на сейсмостанции КАМ на эпицентральной расстоянии 175 км (рис. 2д) иллюстрирует работу цифрового канала в условиях перегрузки. Участок  $P$ -волн длительностью около 15 с все же записан без искажений и был analyzed далее, см. рис. 2а–г. Приводятся трассы ускорения (б), скорости (в), смещения (г) и сглаженные спектры Фурье ускорения (а) для трех компонент. Видно, что спектр занимает обычную при подобных землетрясениях полосу частот, примерно от 0.4 до 7 Гц, однако верхняя частота спектра может быть занижена за счет полосового фильтра. Отметим, что вырезание участка обработки с помощью окна в данном случае, когда размах колебаний нарастает, приводит к неизбежным искажениям в низкочастотной части сигнала. Поэтому в реальности сигнал  $P$ -волны заведомо имел более высокие спектральные амплитуды на частотах ниже 0.2–0.3 Гц и, соответственно, более высокие амплитуды скорости и смещения. Однако можно полагать, что сигнал ускорения в полосе до 6–7 Гц восстановлен относительно надежно.

Другие приводимые записи получены на региональных расстояниях. Для качественной записи на сейсмостанции КВГ приводятся ускорения, скорости и смещения грунта (рис. 2е–з). Видно, что на записи скорости вклад волн  $P$ ,  $S$  и поверхностных сопоставим, в то время как на записи смещений вклад  $P$ -волн мал, присутствуют выраженные поверхностные и длиннопериодные  $S$ -волны. Записи сме-

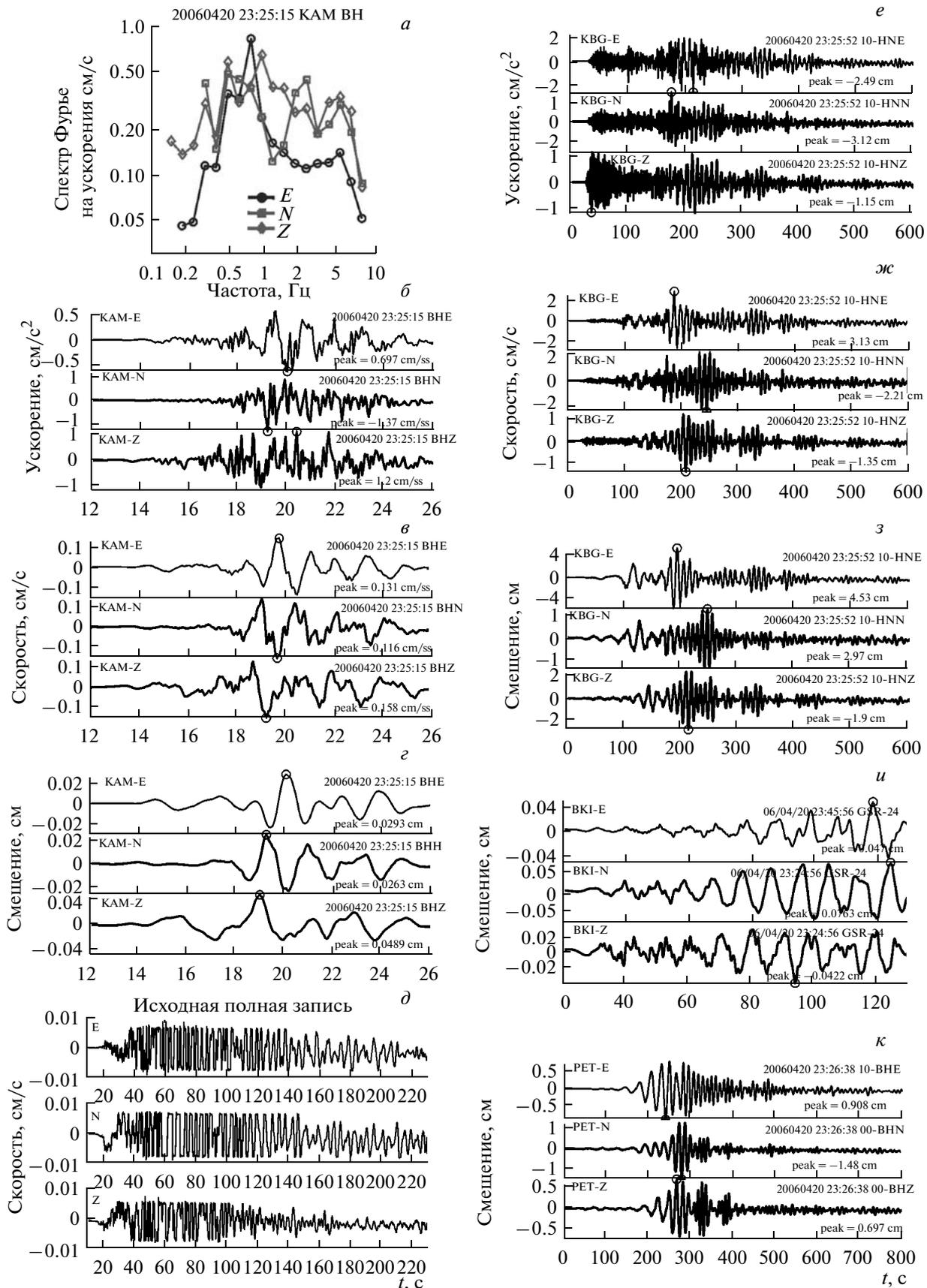
щений приводятся также для сейсмостанций РЕТ и ВКИ (рис. 2и, к). На них преобладают поверхностные волны. (Запись сейсмостанции ВКИ, работавшей в ждущем режиме, неполная из-за неоптимальной настройки временного окна ждущей регистрации в момент основного толчка).

На рис. 3 приведены материалы обработки участка записи  $P$ -волн (от первого вступления до вступления  $S$ -волн) на сейсмостанциях КВГ и ВКИ. Сравним сначала записи КВГ и ВКИ. Полоса частот ускорения на обеих записях – примерно 0.4–2 Гц. Из-за поглощения верхний срез полосы частот заметно опустился в сравнении со спектром на КАМ. Большой интерес представляет тот факт, что уровень амплитуд на ВКИ заметно (в 5–10 раз) ниже, чем на КВГ, хотя их эпицентральные расстояния различаются не сильно (650 и 590 км). При этом данное различие проявляется в пределах всей наблюдаемой полосы частот. Поэтому простое объяснение наблюдаемых различий за счет разницы в поглощающих свойствах трасс сомнительно: обычно эффекты поглощения заметно растут с частотой. При дальнейшем распространении  $P$ -волн полоса частот спектра еще сузилась и составила на сейсмостанции РЕТ (расстояние 1030 км) примерно 0.3–1 Гц.

На рис. 4 приведены материалы обработки записей афтершока 09.05.2006 г. в 11:02, записанного одновременно на сейсмостанциях ТЛС и КАМ. Любопытны записи смещений на КАМ, на которых видно мощное вступление поверхностных волн. Формы спектров Фурье и на ТЛС, и на КАМ достаточно обычны и отличаются в этом плане от спектров сильнейшего афтершока 22.05.2006 г. Однако, обращает на себя внимание тот факт, что высокочастотный спад спектров на ТЛС относительно круче, чем на КАМ, несмотря на то, что эпицентральной расстояние этой станции меньше. Эффекты поглощения должны были бы дать противоположную картину. Причина, скорее всего, в относительном усилении полосы 0.3–3 Гц на сейсмостанции ТЛС за счет ее грунтово-геологических условий (см. ниже).

## МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ СВЯЗЕЙ АМПЛИТУДА-РАССТОЯНИЕ-МАГНИТУДА

Для изучения связей максимальная амплитуда–гипоцентральной расстояние–магнитуда были использованы 49 записей афтершоков с магнитудами 4 и более, в основном зарегистрированных обеими станциями ТЛС и КАМ, иногда – только одной из этих станций. Гипоцентральной расстояние рассчитывалось по разности  $S$ - $P$  по годографу И.П. Кузина [8] для глубины 10 км. Времена вступлений  $P$  и  $S$  – по данным КФ ГС РАН. Исползованный способ оценки гипоцентральных расстояний достаточно надежен и гарантирует от потенциальных неточностей гипоцентров за счет неоптимальной конфигу-



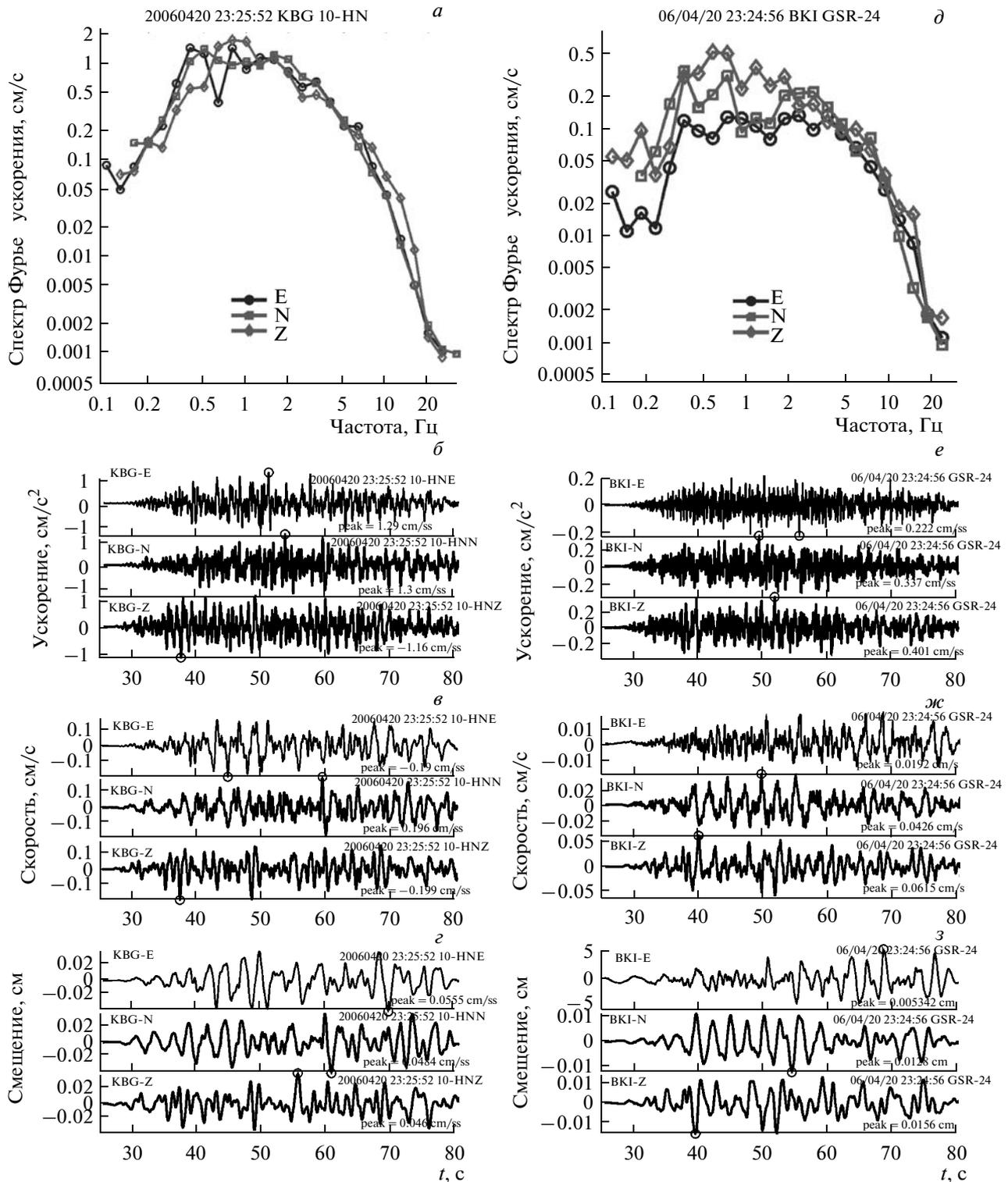


Рис. 3. Записи и спектры  $P$ -волн основного толчка 20.04.2006 г. на KBG и VKI:  $a$  – спектры Фурье записей  $P$ -волн;  $b$ – $z$  – (восстановленные) ускорения, скорости и смещения грунта для KBG;  $d$  –  $z$  – аналогичные графики для VKI.

Рис. 2. Записи основного толчка 20.04.2006 г. на сейсмостанциях KBG, VKI, PET и КАМ:  $a$  – спектр Фурье ускорения первых 15 с записи  $P$ -волн на КАМ;  $b$ – $z$  – (восстановленные) ускорения, скорости и смещения грунта первых 15 с записи  $P$ -волн на КАМ;  $d$  – полная исходная запись велосиграфа на КАМ;  $e$ – $z$  – (восстановленные) ускорения, скорости и смещения грунта на KBG;  $u$ ,  $k$  – смещения грунта на VKI и PET, запись VKI – неполная. Максимальные значения сигналов здесь и далее помечены кружком.

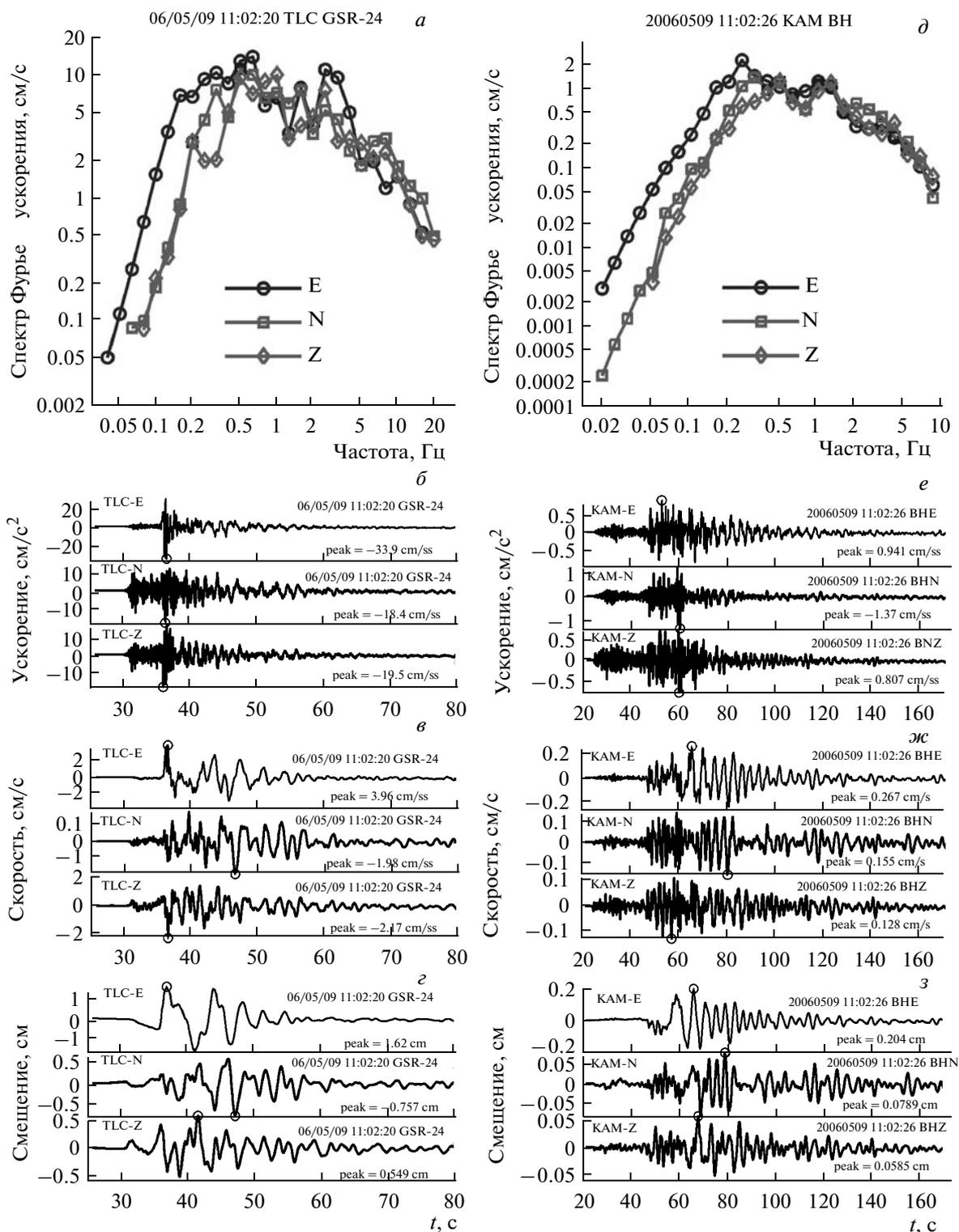


Рис. 4. Записи и спектры полных записей для афтершока 09.05.2006 г. в 11:02 ( $M_L = 5.75$ ): а – спектры Фурье для записей на TLC,  $R = 39$  км; б–д – ускорения, скорости и смещения грунта на TLC; е–з – аналогично для КАМ,  $R = 188$  км;  $R$  – гипоцентральное расстояние.

рации сети сейсмостанций в исследуемом районе. Для анализа связей амплитуда–расстояние–магнитуда в качестве основной магнитудной шкалы при-

няли локальную короткопериодную магнитуду  $M_L$  Камчатской сети, которую с 1999 г. вычисляют, по предложению А.А. Гусева, прямым пересчетом из

энергетического класса С.А. Федотова  $K_S = K_{S1,2}^{\Phi68}$  [10]. Обоснование такого пересчета следующее. Локальная магнитуда традиционно опирается на величину логарифма амплитуды записи. Поскольку шкала  $K_S$  построена как:

$$K_S = 2 \lg(A_S/T_S) + f(r), \quad (1)$$

где  $A_S$  – максимальная амплитуда  $S$ -волны на короткопериодном приборе,  $T_S$  – видимый период,  $f(r)$  – калибровочная функция, локальную магнитуду можно определить через  $K_S$  как:

$$M_L = 0.5K_S + \text{const} = \lg(A_S/T_S) + 0.5f(r) + \text{const}. \quad (2)$$

Здесь постоянную следует выбрать так, чтобы обеспечить согласие с первоначальным определением Рихтера. В [4] определена нелинейная связь  $K_{S1,2}^{\Phi68}$ – $M_W$ , а также приведена нелинейная связь  $M_L$ (Рихтера)– $M_W$ . Исключая  $M_W$  как параметр из этих двух нелинейных функций, получим зависимость, весьма близкую к следующей линейной связи:

$$M_L = 0.5K_S - 0.75. \quad (3)$$

Эта формула и была рекомендована для использования в пересчете. Заметим попутно, что для условий Камчатки телесеismicкие короткопериодные магнитуды связаны с новой локальной магнитудой  $M_L$  следующим образом:

$$m_{PV}^{(CKM)} = \text{MPVA(Обнинск)} = M_L - 0.12, \quad (4)$$

$$m_b(\text{USGS}) = M_L - 0.30 \quad (m_b < 5.8). \quad (5)$$

Параллельно с камчатской магнитудой  $M_L$  использовали телесеismicкую магнитуду  $m_b$ . Диапазон магнитуд в исходных данных –  $M_L = 4.0$ – $6.4$ , гипоцентральных расстояний –  $R = 34$ – $237$  км, глубины очагов –  $H = 0$ – $22$  км.

Анализ данных проводили методом множественной линейной регрессии. Каждое наблюдение амплитуды  $Y$  (номер  $j$ ), относящееся к событию с магнитудой  $M_j$  на удалении  $R_j$ , представляется в виде

$$\lg Y_j = a_0 + bM_j - c \lg R_j + \varepsilon_j, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_j$  – неизвестная случайная ошибка. Предполагается, что  $\varepsilon_j \sim N(0, \sigma^2)$ . Соотношение (6) – это линейное уравнение относительно неизвестных параметров  $a_0$ ,  $b$  и  $c$ . Набор этих трех параметров и представляет собой в данном приближении эмпирическую модель связи амплитуда–расстояние–магнитуда. В роли  $Y_j$  в нашем случае выступают максимальные амплитуды скорости или ускорения, на вертикальном или горизонтальном канале.

В уравнении (6) неявно предполагается, что вклад грунтово-геологических условий отдельных станций пренебрежимо мал, либо одинаков для всех станций (и тогда входит слагаемым в параметр  $a_0$ ). Обычно станционные грунтовые условия не идентичны от станции к станции. В таких условиях

возможно использование модификации модели (6) с дополнительными неизвестными (индикаторными переменными)  $\delta_k$ :

$$\lg Y_j = a_0 + bM_j - c \lg R_j + d_k \delta_{kj} + \varepsilon_j, \quad (7)$$

где параметры  $d_k$  – это новые неизвестные, индивидуальные поправки для станций, причем номер  $k = 1, 2, \dots, K$  выделяет конкретную станцию, а “индикаторная” переменная  $\delta_{kj}$  принимает значение 1, если данное уравнение (номер  $j$ ) записано по данным станции номер  $k$ , и значение 0 в противном случае. Система уравнений типа (7) оказывается недоопределенной; чтобы этого избежать, обычно используют одну из станций как опорную и полагают для нее  $d_k \equiv 0$ . Выписав (6) или (7) для достаточно большого числа наблюдений, получаем избыточную систему уравнений относительно вектора неизвестных  $\{a_0, b, c\}$  или  $\{a_0, b, c, d_1, d_2, \dots\}$ , которую решаем методом наименьших квадратов (МНК). Решение МНК и дает искомую связь  $Y$ – $M$ – $R$ .

Анализ данных начали с варианта (7). За опорную взяли сейсмостанцию КАМ со скальным грунтом и попытались определить вектор неизвестных  $\{a_0, b, c, d_{TLC}\}$ . Результаты оказались неприемлемыми. Подобных проблем следовало ожидать, так как в силу взаимного расположения используемой “сети” из двух станций и облака афтершоков (рис. 1), данные каждой из станций характеризуют непересекающиеся диапазоны расстояний, что ведет к сильной зависимости между компонентами вектора решения. Попросту говоря, легко обменять добавку к станционной поправке  $d_{TLC}$  на соответствующее изменение параметра затухания  $c$  без заметного ухудшения подгонки модели. Поэтому пришлось оценивать эффекты грунта (значение  $d_{TLC}$ ) независимым путем, а затем приводить амплитуды на TLC к эталонному грунту КАМ.

Чтобы найти значение  $d_{TLC}$ , использовали сейсмические кода-волны по методике Т.Г. Раутиан [9]. За основу взяли сглаженные спектры Фурье коды в пределах определенного временного окна. Определенная сложность заключается в том, что по спектрам коды мы получаем спектральные поправки, в то время как нуждаемся в поправках для пиков во временной области. Мы считали, что спектральные поправки, определенные в пределах полосы частот, соответствующей максимуму спектра сигнала, применимы для пиковых амплитуд этого сигнала. В методе кода-волн используется тот факт, что амплитуды коды при достаточном запаздывании практически не зависят от гипоцентрального расстояния и определяются очаговым спектром землетрясения и грунтом. Сначала оценили необходимое минимальное запаздывание. Для TLC и КАМ оно составило 120 с от времени в очаге. Затем для шести относительно сильных афтершоков были построены спектры Фурье участков записей кода-волн на этих станциях в интервале 120–180 с. На рис. 5 приведе-

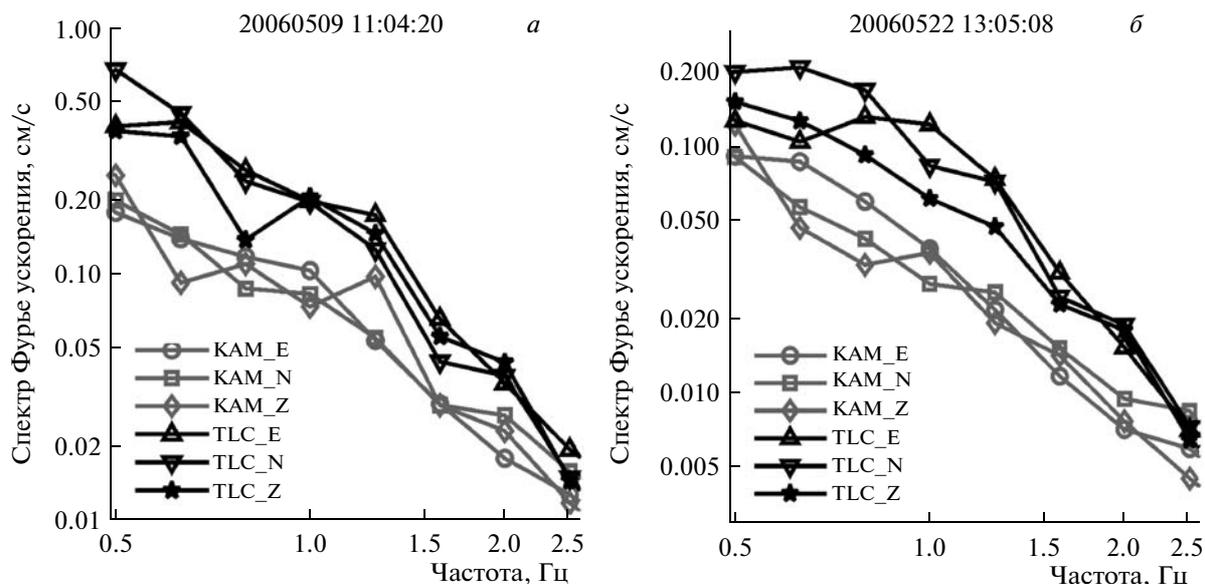


Рис. 5. Примеры сглаженных спектров Фурье ускорения для записей кода-волн в интервале 120–180 с от времени в очаге: *a* – для землетрясения 2006 г. 05.09 в 11:02; *б* – для землетрясения 2006.05.22 в 13:03. Приведены спектры всех компонент записей на сейсмостанциях КАМ и ТЛС.

ны соответствующие графики для двух землетрясений. Видно, что уровень спектра для ТЛС существенно превышает соответствующий уровень для КАМ во всем изученном диапазоне частот, так что имеется принципиальная возможность оценить  $d_{\text{TLC}}$ . Более детальный анализ показал, однако, что лишь на частотах ниже 2.5–3.0 Гц по этим данным можно оценить отношение спектров землетрясений на данных станциях. На более высоких частотах сигнал коды уходит ниже уровня микросейсм. Но для нашей цели полосы частот 0.5–3.0 Гц достаточно, так как полосы максимумов спектров скорости и ускорения составляют, соответственно, 0.5–1.0 и 1.5–2.5 Гц. Для получения численных значений поправок к амплитудам использовали осредненные значения отношений сглаженных спектров Фурье в пределах указанных выше частотных диапазонов. Заметных различий в поведении отношений горизонтальных и вертикальных компонент не наблюдалось, поэтому осредняли отношения по всем трем парам компонент. Полученные оценки грунтовых поправок  $d_{\text{TLC}}$  составляют: для логарифма ускорения +0.29 (1.95 раза для амплитуд); для логарифма скорости +0.38 (2.4 раза для амплитуд).

Поправки были введены в наблюдаемые данные для сейсмостанции ТЛС, после чего повторили регрессионный анализ на основе следующей модификации уравнения (6):

$$\lg Y_j = a + b(M_j - M_0) - c \lg(R_j/R_0) + \varepsilon_j \quad (8)$$

с другим вариантом свободного члена. Приняли  $R_0 = 25$  км и  $M_0 = 5$ . Использовали магнитуды  $M_L$  и  $m_b$ , в качестве  $Y$  брали максимальные ускорение и

скорость на вертикальных и горизонтальных компонентах. Для горизонтальных компонент выполняли два варианта обработки: с использованием наибольшей из двух величин для компонент или с анализом всех 98 уравнений. Регрессионный анализ дал вполне приемлемые результаты. Параметры уравнения (8) сведены в табл. 3 для 10 вариантов обработки. Необычно большое различие для двух вариантов обработки горизонтальных каналов связано с тем, что в подавляющем числе случаев амплитуда на компоненте EW существенно больше, чем на NS. Причины такой аномалии установить не удалось. Напомним, что данные, приведенные в табл. 3, это модели затухания амплитуд для специфических грунтовых условий сейсмостанции КАМ. Для пересчета к грунту сейсмостанции ТЛС нужно умножить ускорения на 1.95, а скорости на 2.4. В квадратные скобки взяты недостоверные оценки, которые могут быть искажены за счет зауженной полосы пропускания каналов ВН.

Результаты множественной регрессии целесообразно представить в виде графиков, но это трудно сделать непосредственно. Поэтому рассчитали приведенные значения  $Y$  по схеме:

$$\lg Y_j^{(R)} = \lg Y_j + c \lg(R/R_0), \quad (9)$$

$$\lg Y_j^{(M)} = \lg Y_j b(M - M_0). \quad (10)$$

На рис. 6 представлены зависимости приведенных значений максимального ускорения (рис. 6а–г) и скорости (рис. 6д–ж) от магнитуды (рис. 6а, в, д, ж) и расстояния (рис. 6б, г, е, з). Приводятся зависимости для наибольшей из горизонтальных компонент

**Таблица 3.** Результаты регрессионного анализа для данных, приведенных к грунтовым условиям сейсмостанции КАМ

M	A/V	H/Z	a	b	c	$\sigma$	Y(5, 25) "КАМ"	Y(5, 100) "КАМ"	Y(5, 25) "TLC"
$M_L$	A	H(1)	0.965	0.789	[1.825]	0.25	9.2	[0.73]	18
$M_L$	A	H(2)	0.795	0.798	[1.687]	0.25	6.2	[0.60]	12.2
$M_L$	A	Z	0.647	0.760	[1.652]	0.26	4.4	[0.44]	8.7
$M_L$	V	H(1)	-0.429	0.959	1.156	0.22	0.37	0.075	0.89
$M_L$	V	H(2)	-0.288	0.971	1.261	0.21	0.51	0.089	1.23
$M_L$	V	Z	-0.538	0.933	1.252	0.22	0.28	0.051	0.69
$m_b$	A	H(1)	0.929	0.943	[1.920]	0.27	8.4	[0.59]	17
$m_b$	A	Z	0.629	0.924	[1.746]	0.28	4.2	[0.37]	8.3
$m_b$	V	H(1)	-0.315	1.161	1.377	0.26	0.48	0.071	1.16
$m_b$	V	Z	-0.561	1.151	1.371	0.23	0.27	0.041	0.65

Примечание. M – род магнитуды; A/V – род сигнала – ускорение или скорость; H/Z – компонента, а именно: H(1) – наибольшая из двух горизонтальных компонент; H(2) – любая из двух горизонтальных компонент; Z – вертикальная компонента; a, b, c,  $\sigma$  – параметры уравнения (8); Y(5, 25) – значение амплитуды при M = 5, R = 25; Y(5, 100) – то же для R = 100 км; "КАМ" – для грунтовых условий КАМ; "TLC" – то же для условий TLC. В квадратных скобках – сомнительные цифры (см. текст).

(рис. 6а, б, д, е) и вертикальной компоненты (рис. 6в, г, ж, з). Чтобы показать влияние внесения поправок в данные станции TLC, на графиках нанесены ее данные в двух вариантах – с поправками (черные треугольники) и без них (серые треугольники). Кружками отмечены данные станции КАМ, грунты которой считали опорными. На графиках зависимостей приведенных амплитуд от расстояния (рис. 6 б, г, е, ж) ясно видно, сколь неравномерно и неоднородно распределение данных по расстоянию. Во-первых, имеется выраженный дефицит данных для расстояний 60–130 км. Во-вторых, все данные на малых расстояниях получены на TLC, а почти все данные на больших расстояниях – на КАМ. В результате появляется сильная чувствительность результатов регрессии по варианту (б) к степени однородности грунтовых условий на станциях. Для получения осмысленных результатов в подобном случае было необходимо использование станционных поправок, что и было выполнено выше с привлечением дополнительной информации. Разброс данных относительно аппроксимирующей плоскости (8) характеризуется величиной  $\sigma = 0.25$ – $0.26$  лог. ед. для ускорений и  $\sigma = 0.21$ – $0.22$  лог. ед. для приведенных скоростей. Это вполне типичные значения для подобного рода исследований в относительно однородных условиях.

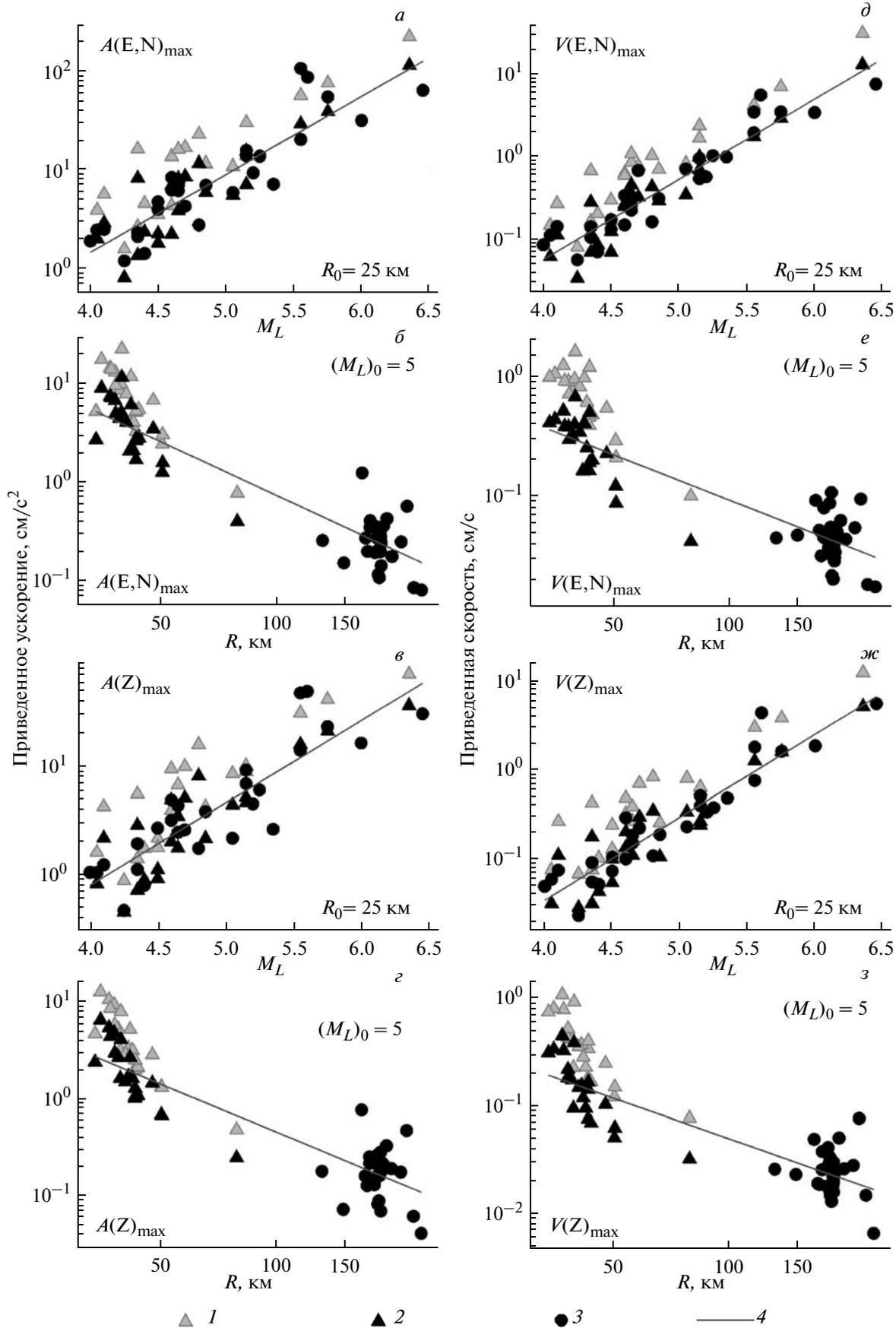
Построенные регрессионные зависимости представляют полученные нами численные данные вполне приемлемым образом. Однако, есть основания не считать достоверными полученные значения ускорения на КАМ, поскольку аппаратура этой сейсмостанции с шагом цифровки 0.05 с и рабочей верхней частотой воспроизводимого диапазона около 6–7 Гц, неспособна надежно зарегистрировать ускорения грунта, спектр которых охватывает частоты до 10–15 Гц и выше. Грубая оценка позво-

ляет ожидать занижения амплитуд ускорения в 1.2–1.8 раза. В отношении скоростей такая трудность формально также существует, но на практике спектр скорости падает достаточно круто выше 2–3 Гц и искажениями можно пренебречь. Поскольку на малых расстояниях вклад данных сейсмостанции КАМ в уровень регрессионных кривых относительно мал, значение  $R = R_0 = 25$  км было выбрано как опорное. В результате значения параметра a в (3) оцениваются относительно надежно, в то время как оценка параметра c для ускорений, скорее всего, несколько завышена.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результаты регрессионного анализа, представленные в табл. 3, в сопоставлении с аналогичными результатами для других регионов. Приведенное в столбце Y(5, 25) значение ускорения в варианте обработки H1 (большой из двух пиков) для условий сейсмостанции TLC составляет 18 см/с<sup>2</sup>. Условия сейсмостанции TLC можно считать соответствующими среднему типу грунта. Для сопоставимых значений магнитуд  $M_L = 5$ , или  $M_W = 5$ , или  $M_S = 4.4$ , или  $M_{JMA} = 4.6$  для расстояния R = 25 км имеются литературные оценки для средних пиков горизонтального ускорения и скорости. Значения скорости приводились для среднего грунта, а для ускорений без разделения на типы грунтов: средний и скальный. Оценки для ускорений составляют:

- 71 см/с<sup>2</sup> для Камчатки по [12];
- 39 см/с<sup>2</sup> для Японии по [11];
- 69 см/с<sup>2</sup> для Японии по [14];
- 21 см/с<sup>2</sup> для Греции по [15];
- 57 см/с<sup>2</sup> для Калифорнии по [13].



**Рис. 6.** Приведенные амплитуды колебаний грунта в функции магнитуды (приведение к расстоянию  $R_0 = 25$  км) —  $a, \delta, \delta, \delta$ ; и в функции расстояния (приведение к значению магнитуды  $M_{L0} = 5.0$ ) —  $b, \epsilon, e, z, a, b$  — максимальные горизонтальные ускорения,  $\nu, \epsilon$  — то же, вертикальные;  $\delta, e$  — максимальные горизонтальные скорости смещения грунта;  $\delta, z$  — то же, вертикальные. 1 — данные сейсмостанции TLC без станционной поправки; 2 — то же с учетом станционной поправки; 3 — данные сейсмостанции КАМ; 4 — линии регрессии.

Из этого сопоставления видно, что ускорения для афтершоков Олюторского землетрясения обычно низкие.

Для скоростей данные, приведенные в табл. 3, парадоксальны: оценка для наибольшей горизонтальной компоненты (Н1) ниже, чем для произвольной компоненты (Н2), что указывает на ограниченную точность результатов регрессии. Используем среднее из двух названных оценок, близкое к 1.1 см/с. Оценки для других регионов таковы:

— 2.4 см/с для Калифорнии по [13];

— 1.4 см/с для Греции (0.7 см/с для скалы с поправкой  $\times 2$ ) по [15];

— 2.2 см/с для Японии по [14].

Оценки для Корякии снова оказались ниже, чем для других регионов. Подобная специфика для Корякии согласуется с тем фактом, что частоты максимумов спектров Фурье скорости и особенно ускорений, не только на КАМ, но и на TLC, несколько смещены в низкочастотную сторону относительно средних камчатских спектров для  $M = 5-6$ , ожидаемых согласно [5, 7]. Вероятная причина выявленной аномалии — в низких значениях сброшенного напряжения для афтершоков. Целесообразно в будущем исследовать параметр “сброшенное напряжение” для изученных здесь записей. Также большой интерес представляет реконструкция спектра основного толчка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт работ по цифровой регистрации колебаний грунта при Олюторском землетрясении 2006 г. и его афтершоках обнадеживает. Несмотря на редкость сети и определенные недоработки, получены ценные, хотя и неполные данные об основном толчке и определенный материал по афтершокам. Построена средняя зависимость максимальных ускорений и скоростей грунта от магнитуды и расстояния для 49 записей афтершоков. Удалось выявить важные особенности колебаний грунта на малоизученной территории Корякии, такие, как сдвиг спектра ускорений в сторону низких частот и необычно низкие (для фиксированных расстояния и магнитуды) значения максимальных ускорений. Путем сравнения спектров Фурье кода-волн определены станционные поправки для сейсмостанции TLC, описывающие специфику грунтово-геологических условий этой станции. Заложена основа для получения количественных оценок сейсмической

угрозы для зданий и сооружений Корякии на основе собственных материалов данного региона.

Авторы признательны М.Я. Малкиной за техническую помощь и И.Р. Абубакирову за помощь в обработке данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 07-05-00775.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бриллинджер Д.* Временные ряды. Обработка данных и теория. М.: Мир, 1980. 536 с.
2. *Гусев А.А., Гусева Е.М.* Свойства колебаний грунта при сильных землетрясениях Камчатки (обзор) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 14–24.
3. *Гусева Е.М., Гусев А.А., Оскорбин Л.С.* Пакет программ для цифровой обработки сейсмических записей и его опробование на примере некоторых записей сильных движений // Вулканология и сейсмология. 1989. № 5. С. 35–49.
4. *Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
5. *Гусев А.А., Петухин А.Г., Гусева Е.М. и др.* Средние спектры Фурье сильных движений грунта при землетрясениях Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 60–70.
6. *Гусев А.А., Чубарова О.С., Чебров В.Н., Абубакиров И.Р.* Колебания грунта при Олюторском землетрясении 20(21) апреля 2006 г. и его афтершоках по данным цифровой регистрации: предварительные результаты // Олюторское землетрясение (20(21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 263–276.
7. *Гусев А.А., Шумилина Л.С., Акатова К.Н.* Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Электрон. научн.-информ. журнал "Вестник ОНЗ РАН". 2005. № 1(23). 2005. М.: ОИФЗ РАН, 2005. URL: [http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h\\_dgggms/1-2005/screp-2.pdf](http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2005/screp-2.pdf).
8. *Кузин И.П.* Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 1974. 145 с.
9. *Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С. и др.* Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 142 с.
10. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
11. *Fukushima Y., Tanaka T.* A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake

- Ground Motion in Japan // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1991. V. 80. P. 757–783.
12. *Gusev A.A., Gordeev E.I., Guseva E.M. et al.* The first version of the  $A_{\max}(M_W, R)$  relationship for Kamchatka // *PAGEOPH.* 1997. V. 149 P.299–312.
  13. *Joyner W.B., Boore D.M.* Estimation of response-spectral values as functions of magnitude, distance and site conditions // *USGS Open-file report 82–881.* 1982. 28 p.
  14. *Kawashima K., Aizawa K., Takahashi K.* Attenuation of peak ground acceleration, velocity and displacement based an multiple regression analysis of Japanese strong motion records // *Earthquake Eng. and Structural Dyn.* 1986. V. 14. P. 199–215.
  15. *Theodulidis N., Papazachos B.* Dependence of strong ground motion on magnitude, distance, site geology and macroseismic intensity for shallow earthquakes in Greece: I, Peak horizontal acceleration, velocity and displacement // *Soil Dyn. & Earth. Engn.* 1992. V. 13. P. 317–343.

## Ground Motion Excited by the Olyutorskii Earthquake of April 20, 2006 and Its Aftershocks Derived from Digital Recordings

O. S. Chubarova<sup>1</sup>, A. A. Gusev<sup>1</sup>, V. N. Chebrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

<sup>2</sup>*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

We studied broadband digital records of the  $M_W = 7.6$ . Olyutorskii earthquake of April 20, 2006 and its aftershocks at local and regional distances. We have made a detailed analysis of data on peak ground motion velocities and accelerations due to aftershocks based on records of two digital seismic stations, Tilichiki (TLC) and Kamenskoe (KAM). The first step in this analysis was to find the station correction for soil effects at TLC using coda spectra. The correction was applied to the data to convert them to the reference bedrock beneath the Kamenskoe station. The second step involved multiple linear regressions to get mean relations of peak amplitude to local magnitude  $M_L$  and distance  $R$  for the Koryak Upland conditions. The data scatter about the mean relations is comparatively low (0.22–0.25 log units). The acceleration amplitudes for  $M_L = 5$ ,  $R = 25$  km are lower by factors of 2–3 compared with eastern Kamchatka, the western US, or Japan. A likely cause of this anomaly could be lower stress drops for the aftershocks.