УДК 550.348:556.33

ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОГО СОСТАВА МАКСИМАЛЬНЫХ ФАЗ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА ПРИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Касимова В.А.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский

Проводится проверка обнаруженной ранее связи между проявлениями различных типов вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 и амплитудно-частотным составом сейсмических сигналов от сильнейших (M≥7.6) землетрясений 1997-2008 гг., зарегистрированных аппаратурой IRIS на сейсмостанции Петропавловск. База данных дополнена записями землетрясений 2009 – 2011 гг., в т. ч. 7 октября 2009 г. (о-ва Вануату), M=7.8; 6 апреля 2010 г. (о. Суматра), M=7.8 и Великого Японского землетрясения Тохоку 11.03.2011 г., M=9.1. Выполнено сопоставление вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 с параметрами амплитудно-частотного состава максимальных фаз колебаний скорости, смещений и ускорений грунта и уточнены их диапазоны для выделенных ранее трех групп сильнейших землетрясений, сопровождающихся различными типами вариаций уровня воды.

ВВЕДЕНИЕ

Поверхностные волны образуют наиболее продолжительную и интенсивную часть сейсмических колебаний, возбуждаемых сильнейшими землетрясениями. Их прохождение может сопровождаться разнообразными вариациями параметров геофизического мониторинга, в том числе изменениями в режиме подземных и поверхностных вод [10].

Уровнемерные наблюдения в скважинах являются одним из эффективных методов геофизического мониторинга, направленного на поиск предвестников сильных землетрясений [3, 5, 6]. Для количественной характеристики воздействия сейсмических волн на состояние подземных вод могут быть использованы оценки амплитуд и частотного состава максимальных фаз движений грунта (скоростей, смещений и ускорений) по данным регистрации сейсмических сигналов широкополосной сейсмической аппаратурой.

В предыдущих работах [9, 10] выполнено сопоставление параметров амплитудно-частотного состава движений грунта, зарегистрированных аппаратурой IRIS на сейсмостанции Петропавловск (PET) при сильнейших землетрясениях 1997-2008 гг. (рис. 1, табл. 1) с вариациями уровня воды. По данным наблюдений в скв. ЮЗ-5 зарегистрированы разнообразные изменения уровня воды при прохождении сейсмических волн от сильнейших (M≥7.6) удаленных землетрясений, которые по форме разделяются на четыре типа: 1 - вынужденные и свободные колебания уровня воды, 2 - колебания уровня воды с остаточным повышением, 3 - остаточное повышение без колебаний и 4 - длительное понижение уровня воды (табл. 2) [1, 3, 4].

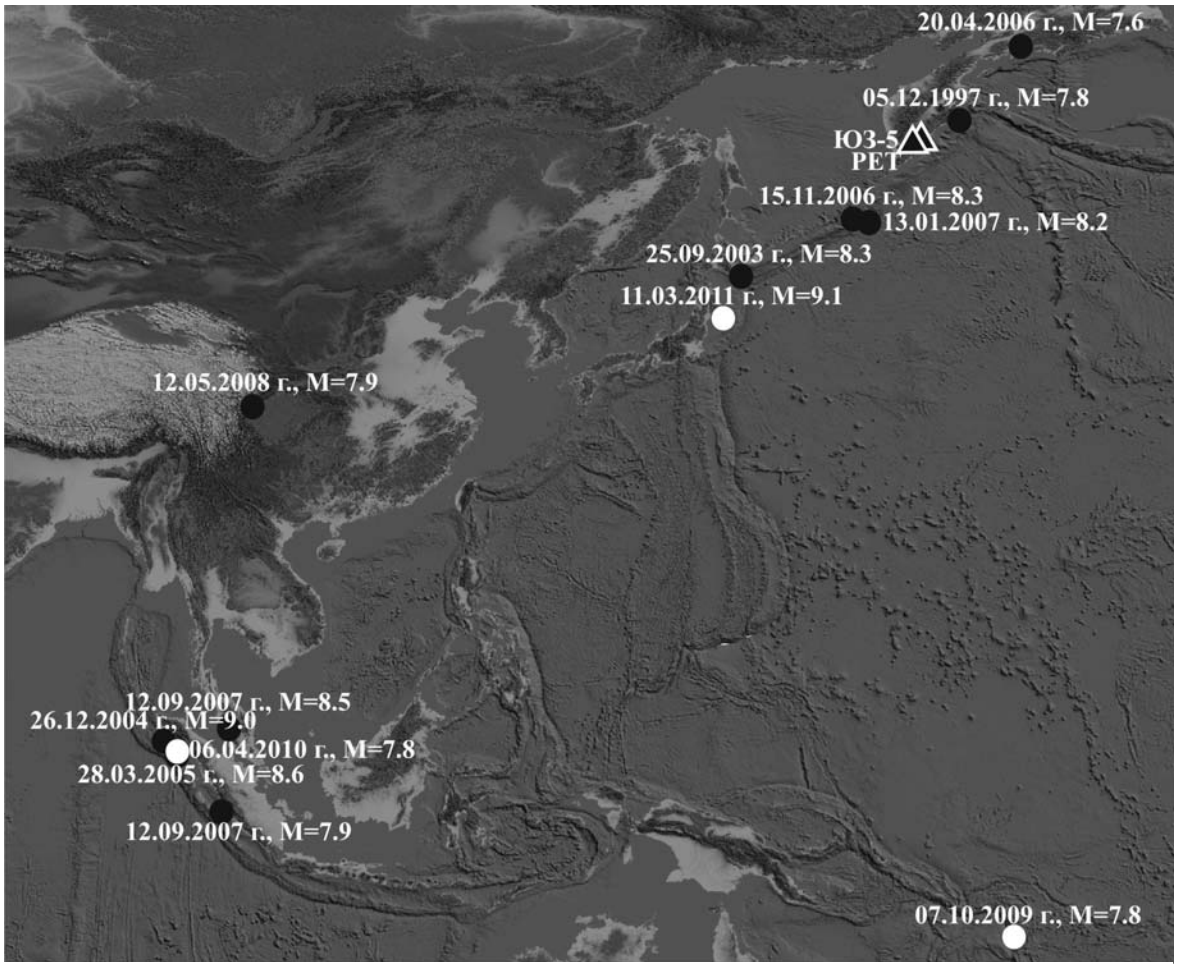


Рис. 1. Расположение скважины ЮЗ-5, сейсмостанции Петропавловск (показаны треугольниками); эпицентры землетрясений 1997-2008 гг. показаны черными кружками; эпицентры землетрясений 2009-2011 гг. – белыми кружками.

Таблица 1. Характеристика сильных землетрясений 1997-2011 гг., сопровождавшихся изменениями уровня воды в скважине ЮЗ-5

№ со-бы-тия	Дата дд.мм.гг	Время в очаге чч:мм:сс	Координаты		Эпицент-ральное рас-стояние, км	Глу-бина, км	Район; название землетрясения	Магни-туда M_w по NEIC	Характер вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5
			град., с.ш.	град., в.д.					
1	05.12.97	11:26:54	54.84	162.04	300	33	Камчатка; Кроноцкое	7.8	Длительное в течение 3 мес. постсейсмическое понижение на 1 м [4]
2	25.09.03	19:50:06	41.81	143.91	1668	27	о. Хоккайдо; Хоккайдское	8.3	Вынужденные и свободные колебания, остаточное повышение с амплитудой 1.7 см
3	26.12.04	00:58:53	3.30	95.98	8259	30	о. Суматра; Суматра-Андаманское	9.0	Вынужденные и свободные колебания с амплитудой более 5 см, остаточное повышение на 1 см [1]
4	28.03.05	16:09:36	2.09	97.11	8293	30	о. Суматра; афтершок Суматра-Андаманского	8.6	Вынужденные и свободные колебания с амплитудой 1 см [1]
5	20.04.06	23:25:02	60.95	167.09	1018	22	Корякия; Олюторское	7.6	Остаточное повышение на 1.8 см [4]
6	15.11.06	11:14:13	46.59	153.27	812	10	о. Симушир; Симуширское-1	8.3	Колебания, остаточное повышение с амплитудой 6.5 см [4]
7	13.01.07	04:23:21	46.24	154.52	810	10	о. Симушир; Симуширское-2	8.2	Колебания, остаточное повышение с амплитудой 1 см [4]
8	12.09.07	11:10:26	4.44	101.37	7765	34	о. Суматра; Суматранское-1	8.5	Колебания, остаточное повышение с амплитудой 0.2 см. [4]
9	12.09.07	23:49:03	-2.62	100.84	8486	35	о. Суматра; Суматранское-2	7.9	Вынужденные и свободные колебания [4]
10	12.05.08	06:28:00	31.08	103.27	5176	10	Китай; Сычуаньское	7.9	Повышение на 0.9 см
11	07.10.09	22:03:14	-13.01	166.51	7383	45	о-ва Вануату	7.8	Вынужденные и свободные колебания
12	06.04.10	22:15:01	2.38	97.05	8270	31	о. Суматра	7.8	Вынужденные и свободные колебания
13	11.03.11	05:46:24	38.8	142.37	2000	29	Япония; Тохоку	9.1	Вынужденные и свободные колебания с амплитудой 6.6 см, остаточное повышение

Таблица 2. Характеристика выделенных типов вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 при прохождении сейсмических волн от сильнейших (M≥7.6)землетрясений

Типы вариаций	Характеристика вариаций уровня воды [1, 3, 4]	Механизмы воздействия землетрясений на подземные воды	Землетрясения, при которых наблюдались соответствующие вариации уровня воды
1	Вынужденные и свободные колебания	Возникают при сильных далеких землетрясениях, которые генерируют поверхностные волны с периодами не менее десятков секунд и могут вызывать резонансный эффект усиления гармонических колебаний порового давления в системе скважина-резервуар	афтершок Суматра-Андаманского землетрясения, Суматранское-2, 07.10.2009 (о-ва Вануату), 06.04.2010 (о-в Суматра)
2	Вынужденные и свободные колебания с кратковремен-ным остаточ-ным повышением	Прохождение поверхностных сейсмических волн сопровождается импульсами сжатия-расширения водонасыщенных пород, изменениями порового давления и колебаниями уровня воды, на которые накладывается эффект повышения порового давления вследствие нарушения структуры трещинно-порового пространства	Хоккайдское, Суматра-Андаманское, Симуширское-1, Симуширское-2, Суматранское-1, Тохоку
3	Кратковременное остаточное повышение	Повышение уровня воды за счет временного увеличения порового давления при нарушении структуры трещинно-порового пространства	Олюторское, Сычуаньское
4	Длительное понижение	Падение порового давления в окрестностях скважины вследствие локального повышения проницаемости водовмещающих пород при интенсивных (не менее 5-6 баллов) сейсмических сотрясениях	Кроноцкое

Ранее в работах [8, 9] были выделены три группы землетрясений (I-III), сопровождавшихся различными типами откликов уровня воды. Первая группа включает землетрясения с M=7.9-8.6 на расстояниях R=8300-8500 км; при таких землетрясениях наблюдались вынужденные и свободные колебания уровня воды. Вторая группа землетрясений с M=7.9-9.0, R=800-

8300 км сопровождалась колебаниями с остаточным повышением уровня воды. Для третьей группы землетрясений с M=7.6-7.9, R=300-5000 км характерно постсейсмическое повышение или понижение уровня воды без проявления колебательного режима. Выделенные группы землетрясений характеризуются определенными диапазонами частот и амплитуд максимальных фаз колебаний скорости, смещений и ускорений грунта в районе с/ст. PET (табл. 3).

Таблица 3. Характеристика выделенных групп землетрясений, сопровождающихся однотипными вариациями уровня воды в скважине ЮЗ-5 [9]

Группы	Магнитуда, M	Эпицентральное расстояние R, км	Глубина H, км	Частотный диапазон ν, Гц			Диапазон амплитуд A		
				скорость	ускорение	смещение	скорость, см/с	ускорение, см/с^2	смещение, см
I	7.9-8.6	8300-8500	30-35	0.022–0.056	0.044–0.067	0.022	0.0192–0.0431	0.0059–0.0150	0.1257–0.1726
II	7.9-9.0	800-8300	10-30	0.044–0.056	0.044–0.067	0.022–0.044	0.1785–0.4530	0.0498–0.1655	0.1213–1.5557
III	7.6-7.9	300-5000	10-33	0.056–0.067	0.056–0.1	0.056–0.067	0.1033-0.4043	0.0370–0.1428	0.2828–1.1490

Целью настоящей работы являлась проверка обнаруженной ранее связи между проявлениями различных типов вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 и амплитудно-частотным составом сейсмических сигналов от сильнейших землетрясений 2009 - 2011 гг., в т. ч. 7 октября 2009 г., M=7.8; 6 апреля 2010 г., M=7.8 и Великого Японского землетрясения Тохоку 11.03.2011 г., M=9.1 (рис. 1, 2; табл. 1). С использованием методики частотно-временного анализа сейсмических сигналов, зарегистрированных на с/ст. PET аппаратурой IRIS на каналах BHE, BHN, BHZ, выполнялась количественная оценка амплитуд и частотного состава максимальных фаз изменений скорости, смещений и ускорений и их сопоставление с вариациями уровня воды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовались записи 13-ти землетрясений с M=7.6-9.1, произошедших в 1997-2011 гг. (табл. 1) и зарегистрированные широкополосными каналами BH (E, N, Z) аппаратуры IRIS на с/с PET, и 10-минутные (с 23.09.2010 г. 5-минутные) записи изменений уровня воды в скв. ЮЗ-5 (рис. 1). Записи телесейсмических событий взяты из базы данных по адресу http://www.iris.washington.edu/data. Все 13 рассматриваемых землетрясений сопровождались вариациями уровня воды в скв. ЮЗ-5.

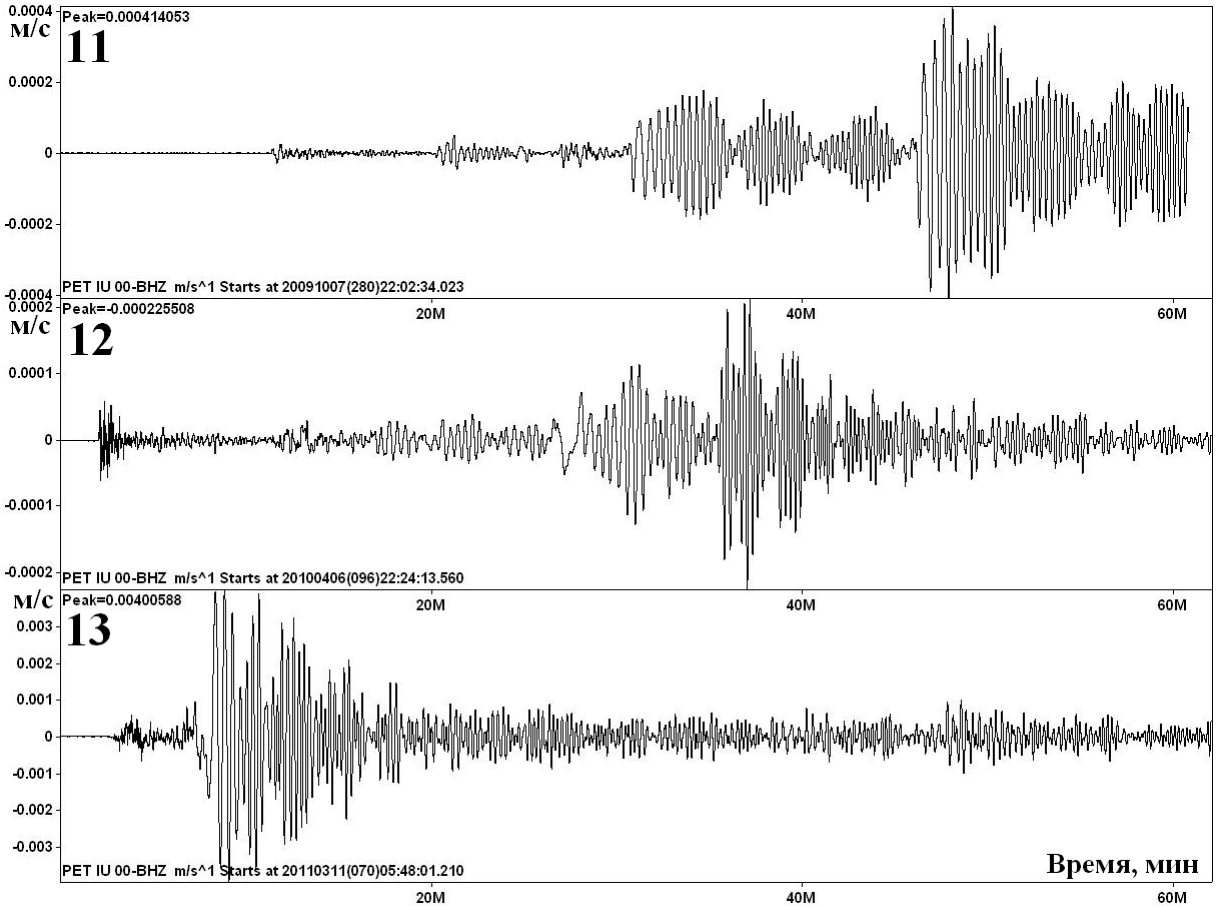


Рис. 2. Записи сейсмических сигналов от землетрясений 2009-2011 гг., зарегистрированных каналом BHZ аппаратурой IRIS, цифрами обозначены номера землетрясений 2009-2011 гг. из табл. 1.

С/ст. PET (53.024° с. ш., 158.653° в. д., высота 68 м над уровнем моря) расположена в г. Петропавловске-Камчатском на склоне сопки Петровской и находится в пределах Петропавловского горста, сложенного метаморфизованными породами верхнемелового возраста, перекрытыми мало-

мощным чехлом четвертичных отложений. На с/ст. PET расположена цифровая трехкомпонентная широкополосная аппаратура IRIS, которая входит в глобальную сеть сейсмических наблюдений.

Скважина ЮЗ-5 (53.169° с. ш., 158.414° в. д., глубина 800 м, уровень воды расположен на глубине 1 м ниже земной поверхности) вскрывает подземные воды в метаморфизованных отложениях позднемелового возраста в диапазоне глубин 310-800 м. С 1996 г. на скважине проводятся наблюдения КФ ГС РАН с использованием цифровой системы регистрации уровня воды и атмосферного давления Кедр А2 [3]. Периодичность измерений составляла один раз в 10 мин, точность измерений уровня воды – 0.1 см.

23.09.2010 г. на скважине была произведена установка оборудования Кедр-ДМ, обеспечивающая периодичность измерений уровня воды один раз в 5 мин и передачу данных по каналам сотовой связи GPRS через каждые 6 часов.

Записи сейсмических сигналов от сильнейших землетрясений сопоставлялись с фрагментами 10 и 5-минутных данных уровнемерных наблюдений длительностью от первых часов до одних суток, включающих интервал времени вариаций уровня воды, вызванных прохождением сейсмических волн (рис. 3).

Частотно-временной анализ сейсмических записей с оценкой времен, амплитуд и периодов максимальных фаз колебаний выполнялся с использованием программы обработки сейсмических сигналов DIMAS, разработанной Д.В. Дрозниным, КФ ГС РАН [2]. Восстановление движений грунта выполнялось путем эмуляции исходных сигналов скорости в смещения и в ускорения.

Изучение изменения частоты сигнала во времени проводилось путем пропускания сейсмической записи через набор полосовых фильтров и вычисления огибающей сигнала в каждой полосе частот. Далее определялась максимальная амплитуда сигнала и диапазон частот ее проявления для скоростей, смещений и ускорений грунта.

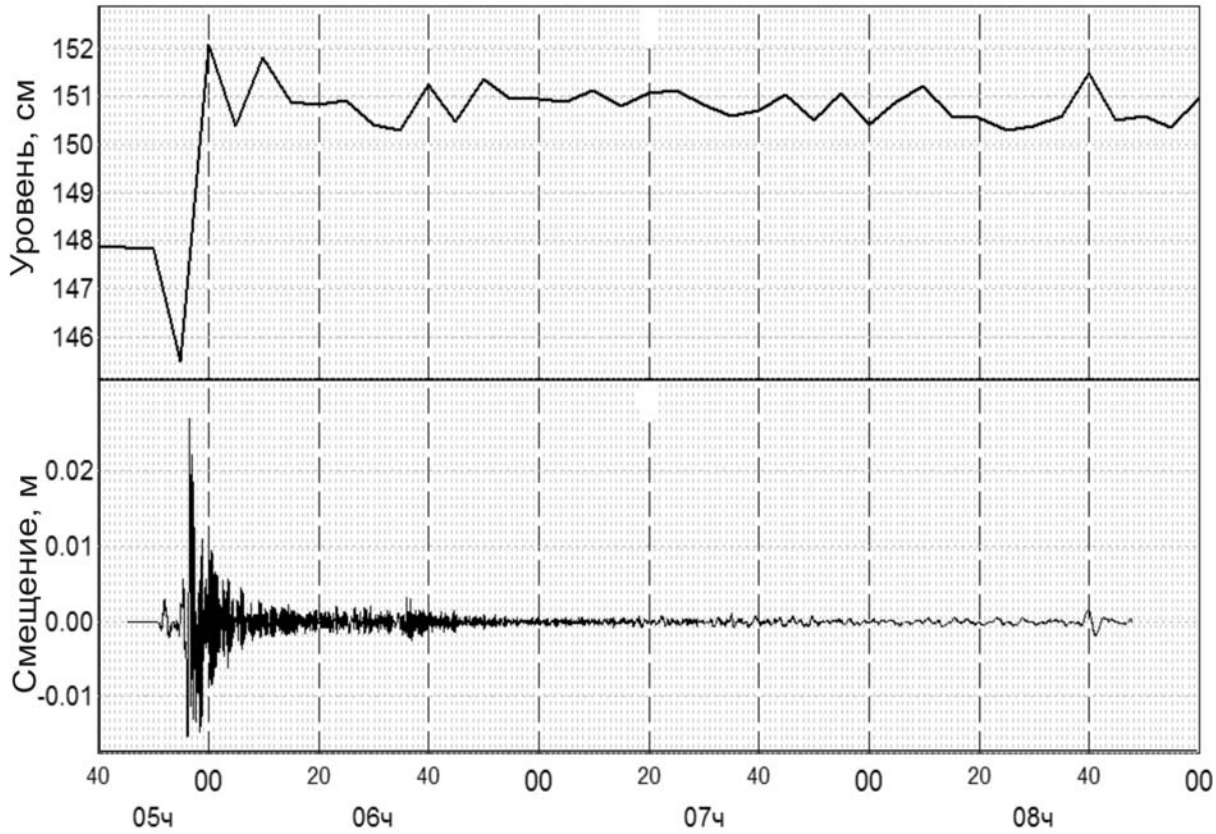


Рис. 3. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 по данным 5-тиминутных измерений в период землетрясения Тохоку 11.03.2011 г., M_w=9.1 в сопоставлении с записью смещений по BHZ-каналу на с/ст. PET [7]

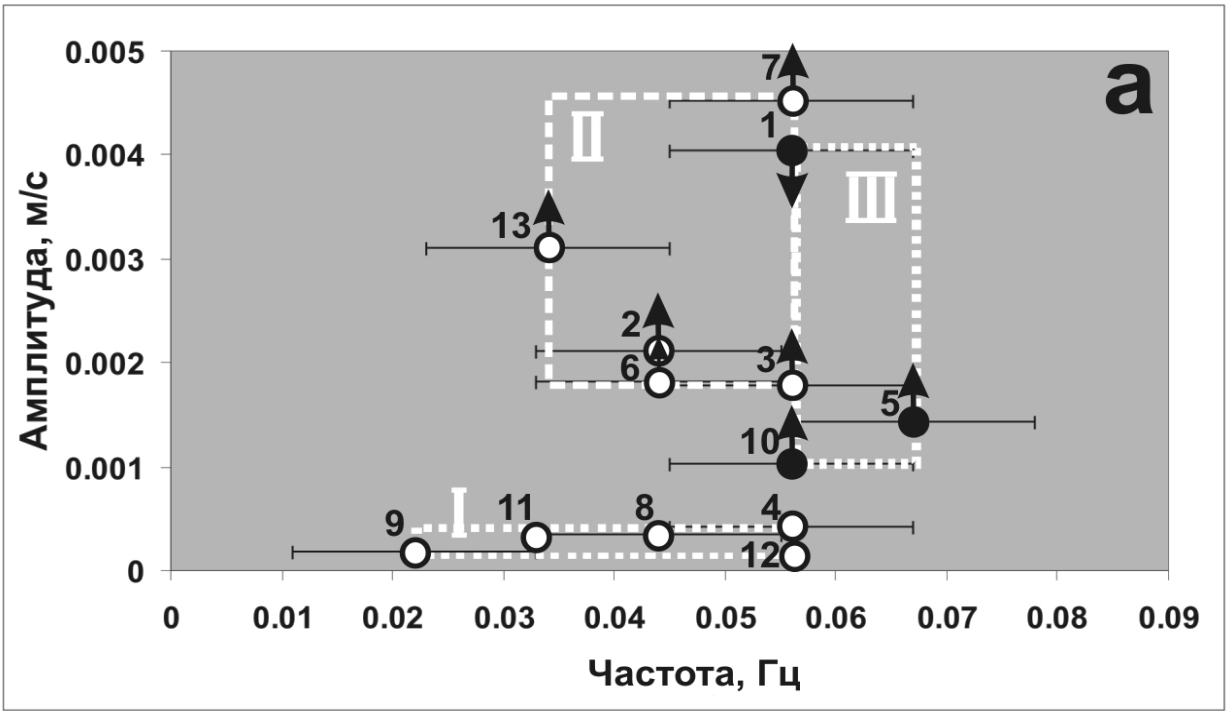
По полученным данным строились диаграммы (рис. 4), демонстрирующие соотношение амплитуд максимальных фаз колебаний грунта и их частотного состава при 13-ти рассматриваемых землетрясениях с учетом выделенных вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 и их разделения на четыре типа (табл. 2).

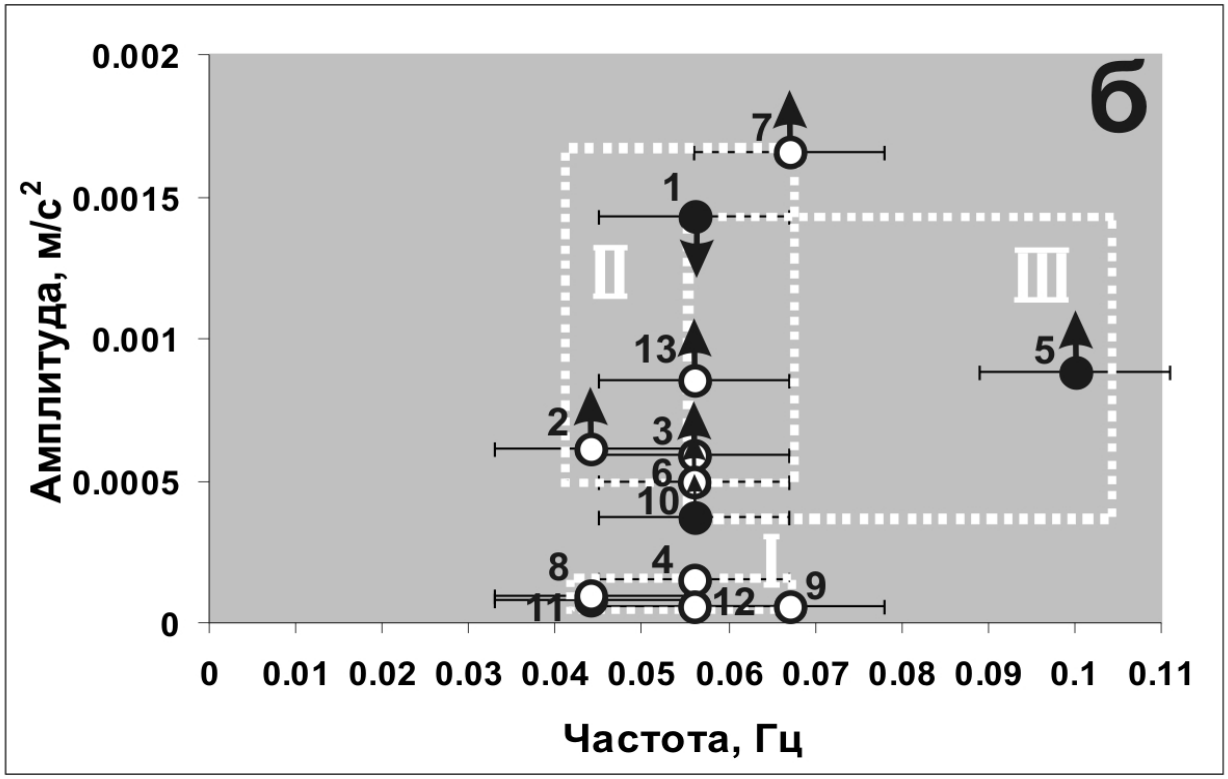
ОБ СУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Сопоставления амплитудно-частотного состава максимальных фаз колебаний скорости, смещений и ускорений грунта при землетрясениях 2009-2011 гг. (табл. 1) с выделенными типами вариаций уровня воды (табл. 2) производилось с использованием диаграмм, пример которых приводится на рис. 4. На таких диаграммах по вертикальной оси для каждого землетрясения показана максимальная амплитуда колебаний, по горизонтальной оси - частотный диапазон ее проявления. Различные типы вариаций уровня воды при отдельных землетрясениях (на рис. 4 показаны их номера в соответствие с табл. 1) обозначены соответствующими значками.

Прохождение поверхностных волн от землетрясений 2009 – 2011 гг. (№№ 11-13) сопровождалось изменениями уровня воды первого (1) и второго (2) типов (табл. 2). Частотно-временной анализ соответствующих сейсмических записей показал близкое соответствие амплитудно-частотных диапазонов проявления максимальных движений грунта для этих землетрясений с амплитудно-частотными диапазонами для выделенных ранее групп землетрясений I и II [8, 9].

С учетом данных по трем землетрясениям 2009-2011 г. были уточнены диапазоны магнитуд и эпицентральных расстояний, а также амплитуд и частот проявлений максимальных фаз движении для скоростей, смещений и ускорений, характеризующих выделенные ранее три группы землетрясений (табл. 3). Уточненные параметры землетрясений для групп I и II приводятся в табл. 4.


а
Амплитуда, м/с
Частота, Гц
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
I
II
III
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13


б
Амплитуда, м/с2
Частота, Гц
0.002
0.0015
0.001
0.0005
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
0.11
I
II
III
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

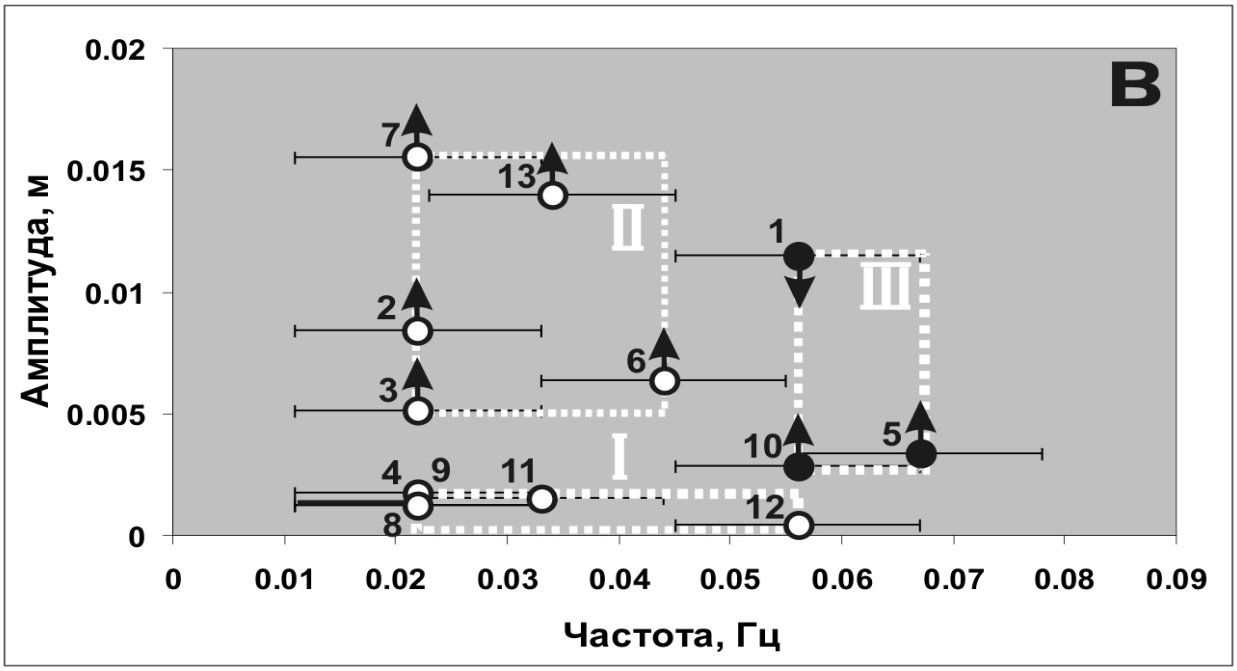


Рис. 4. Соотношение амплитуд скорости (а), ускорений (б), смещений (в) и частотного состава максимальных фаз колебаний грунта в районе с/ст. PET по каналу BHZ; арабскими цифрами обозначены номера землетрясений (табл. 1); черными кружками показаны землетрясения, сопровождавшиеся остаточными повышениями и понижениями уровня воды в скв. ЮЗ-5: стрелками показан характер остаточных изменений уровня (повышение - вверх, понижение - вниз); белыми кружками показаны землетрясения, сопровождавшиеся колебаниями уровня воды. I, II, III – выделенные группы землетрясений (табл. 3, пояснения см. в тексте)

Таблица 4. Характеристика выделенных трех групп землетрясений, сопровождающихся однотипными вариациями уровня воды в скважине ЮЗ-5 с уточнениями для групп I и II (выделены жирным шрифтом) по данным 2009-2011 гг.

Группы	Магнитуда, M	Эпицентральное расстояние R, км	Частотный диапазон ν, Гц			Диапазон амплитуд A		
			скорость	ускорение	смещение	скорость, см/с	ускорение, см/с^2	смещение, см
I	7.8-8.6	7350-8500	0.022–0.056	0.044–0.067	0.022-0.056	0.0162–0.0431	0.0059–0.0150	0.0461–0.1726
II	7.9-9.1	800-8300	0.033–0.056	0.044–0.067	0.022–0.044	0.1785–0.4530	0.0498–0.1655	0.5121–1.5557
III	7.6-7.9	300-5000	0.056–0.067	0.056–0.1	0.056–0.067	0.1033-0.4043	0.0370–0.1428	0.2828–1.1490

Полученные данные подтверждают наличие двух основных тенденций, определяющих особенности вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 в зависимости от амплитудно-частотного состава максимальных фаз колебаний грунта при прохождении сейсмических волн от сильнейших землетрясений (рис. 4):

1 – низкочастотные и низкоамплитудные сейсмические сигналы сопровождаются колебаниями уровня воды; при увеличении амплитуды сигнала на колебательный режим могут накладываться кратковременные остаточные повышения уровня воды;

2 – относительно высокочастотные сейсмические сигналы сопровождаются остаточным повышением уровня воды; при увеличении амплитуды сигнала могут проявляться длительные остаточные понижения.

Наиболее отчетливо такая связь между проявлениями различных типов вариаций уровня воды от амплитудно-частотного состава максимальных фаз колебаний грунта наблюдается для вертикальных смещений (рис. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Механизмы отклика уровня воды в скважинах на сейсмические воздействия // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Тр. регион. научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 1. С. 50-54.
2. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Тр. регион. научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 2. С. 117-121.
3. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г., M=9 // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39-48.

5. Копылова Г.Н., Смолина Г.Н. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки в связи с сильнейшими (M≥7.6) землетрясениями // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Тр. регион. научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 1. С. 175-179.

6. Копылова Г.Н., Смолина Н.Н. Изменения уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20.04.2006 г., Mw=7.6 // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3. С. 36-49.

7. Копылова Г.Н., Сизова Е.Г., Смолина Н.Н., Таранова Л.Н. Изменения уровня воды в скважинах Камчатки в связи с сильными местными и удаленными землетрясениями 2008-2011 гг. // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Тр. Третьей научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2011. С. 85-89.

8. Юшко В.А. Особенности вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, при прохождении сейсмических волн от сильнейших (M≥7.6) удаленных землетрясений // Исследования в области наук о Земле. Матер. VI рег. молодежной науч. конф. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. В.Беринга, 2008. С. 112-119.

9. Юшко В.А. Эффекты воздействия сейсмических волн от сильнейших (M≥7.6) землетрясений в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка // Десятая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сб. науч. материалов. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2009. С. 253-258.

10. Vorhis R.S. Hydrologic Effects of the Earthquake of March 27, 1964 Outside Alaska // Geological Survey Proffesional Paper 544-C. Washington, 1967. 34 p.

PECULIARITIES OF THE WATER LEVEL VARIATIONS IN THE WELL UZ-5, KAMCHATKA, DEPENDING ON AMPLITUDE-FREQUENCY STRUCTURE OF THE MAXIMUM PHASES OF VERTICAL DISPLACEMENT OF A GROUND IS FOUND OUT BY STRONG EARTHQUAKES

Kasimova V.A.

Kamchatka Branch of Geophysical Service Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatky, 683006

The revision of the previous link of this accidents is based on the different between the water level variations in the well uz-5 and amplitude-frequency structure seismic signal by stronger (M≥7.6) earthquakes since 1997 to 2008, is registrated by IRIS equipment on the seismic station Petropavlovsk. Database was supplemented by the notes about earthquakes since 2009 to 2011, including such earthquakes as: 7 october 2009 (Vanuatu Islands), M=7.8; 6 april 2010 (Sumatera), M=7.8 and Great Japan earthquakes 11.03.2011, M=9.1. Comparison of the water level variations in the well uz-5 with the parameters of amplitude-frequency structure of the maximum phases fluctuations rate, displacements and accelerations ground and refined their ranges for allocated three group of stronger earthquakes, accompanied by different types of the water level variations.