

УДК 556.33:550.348

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2013 г. В ИЗМЕНЕНИЯХ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5

© 2016 С.В. Болдина, Г.Н. Копылова

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: boldina@emsd.ru; gala@emsd.ru*

Проводится сравнение оценок косейсмической деформации для двух сильных землетрясений, произошедших на Камчатке 28.02.2013 г. $M_w = 6.8$ и 24.05.2013 г. $M_w = 8.3$, по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5 и по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве с параметрами тензора сейсмического момента землетрясения. Полученные различными способами точечные оценки объемной деформации водовмещающих пород близки по величинам амплитуд и согласуются по знаку (сжатие). Это свидетельствует о высокой чувствительности наблюдательной скважины к упругим изменениям напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород и ее информативности при проведении геофизического мониторинга.

Ключевые слова: скважина, уровень воды, водовмещающая порода, косейсмическая деформация, землетрясение.

ВВЕДЕНИЕ

Образование разрывов в очагах землетрясений сопровождается излучением сейсмических волн и изменением статического напряженного состояния некоторого объема геологической среды в окрестностях очага. В результате таких процессов в водонасыщенных горных породах, распространенных на глубинах до первых км, развивается косейсмическая деформация и изменение условий фильтрации подземных вод, проявляющиеся в разнообразных изменениях уровня воды в пьезометрических скважинах.

Регистрация косейсмических скачков уровня воды является одним из показателей деформометрической чувствительности наблюдательной скважины. Косейсмические скачки уровня воды, вызванные изменением статического напряженного состояния водовмещающих пород, обычно регистрируются в течение не более первых минут после образования разрыва, а их амплитуды составляют от десятых долей до первых десятков см.

Косейсмические скачки уровня воды в скважинах, вскрывающих напорные подземные воды в скальных горных породах, могут рассматриваться в качестве калибровочных сигналов,

свидетельствующих о чувствительности таких скважин к упругим изменениям напряженно-деформированного состояния геологической среды и возможности их использования для количественных оценок сейсмотектонической деформации при проведении геофизического мониторинга сейсмоактивного региона.

В работах (Болдина, Копылова, 2008; Копылова, 2009; Копылова и др., 2010; Igarashi, Wakita, 1991) показано, что по амплитуде косейсмического скачка и по направлению изменения уровня воды можно оценить величину и характер (сжатие или расширение) объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скважины:

$$D_1 = -\Delta h/A_v, \quad (1)$$

где D_1 — объемная деформация в единицах 10^{-9} : положительное значение соответствует расширению, отрицательное значение соответствует сжатию; Δh — амплитуда изменения уровня воды в см: положительное значение соответствует повышению уровня воды, отрицательное значение соответствует понижению уровня воды; A_v — приливная чувствительность уровня воды в $см/10^{-9}$.

Величина приливной чувствительности уровня воды A_v оценивается по соотношению

амплитуд отдельных приливных волн в изменениях уровня воды и соответствующих величин приливной объемной деформации (Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, 1988). В случае статически изолированных условий проявления отклика уровня воды в скважине на изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород, при котором течением подземных вод (фильтрацией) и инерционностью водообмена между скважиной и водовмещающими породами можно пренебречь, величина приливной чувствительности уровня определяется упругими параметрами водовмещающих пород (Копылова, Болдина, 2006; Rojstaczer, Agnew, 1989). В случае сильного искажения пороупругой реакции уровня воды на земные приливы и косейсмическую деформацию вследствие влияния фильтрации или сильной связи подземных вод с условиями на их свободной

поверхности, приливные вариации и косейсмические скачки в изменениях уровня воды не регистрируются, поэтому такие скважины не пригодны для количественной оценки сейсмотектонической деформации.

Скважина ЮЗ-5 расположена в 15–25 км от побережья Авачинского залива (рис. 1, 2). Скважина вскрывает в интервале 310–800 м пресные напорные подземные воды в метаморфизованных алевролитах и сланцах поздне мелового возраста. Наблюдения за вариациями уровня и атмосферного давления на скважине проводятся Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН) с использованием измерительного комплекса Кедр ДМ-У (Калинов и др., 2012) с дискретностью 5 минут, который обеспечивает точность измерений вариаций уровня воды ± 0.1 см и атмосферного давления — ± 0.1 гПа.

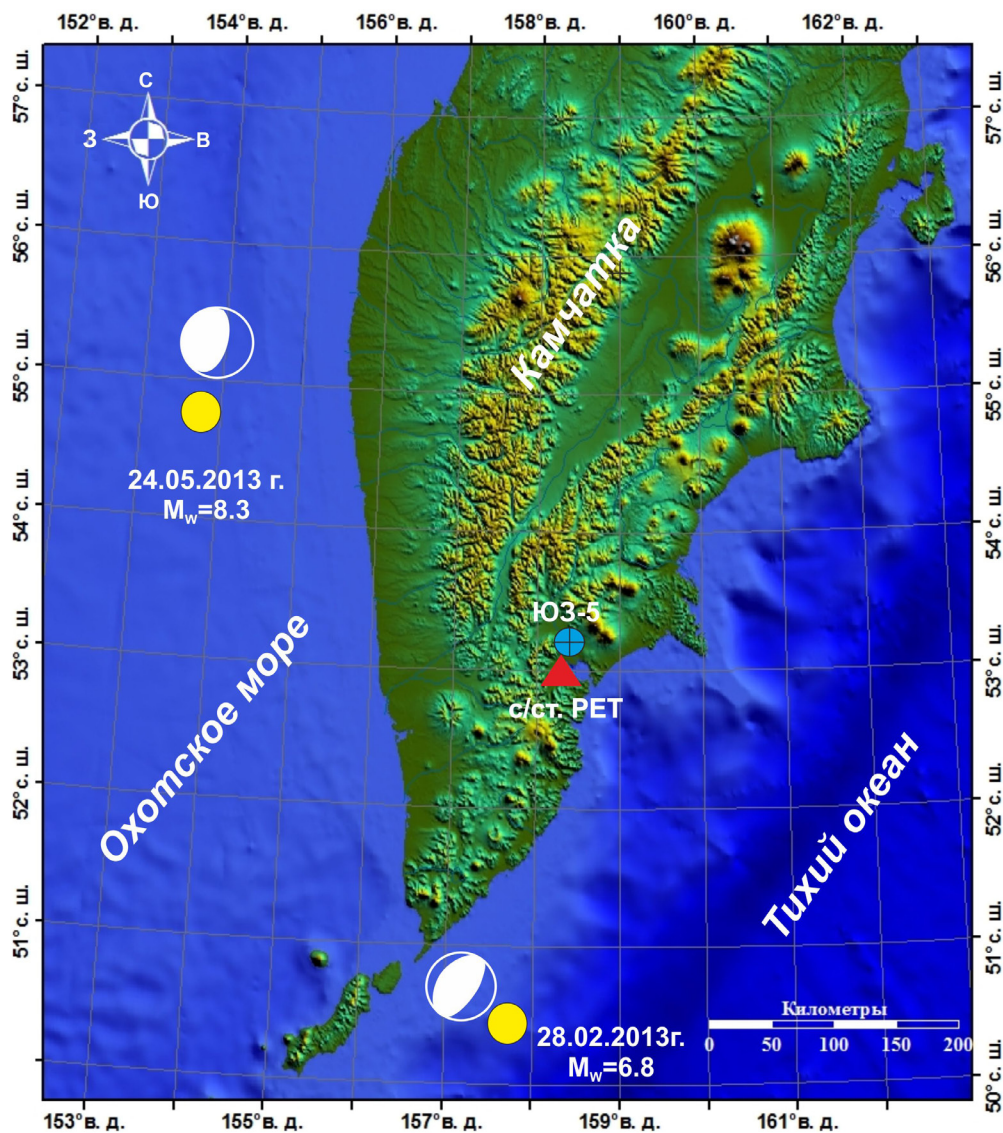


Рис. 1. Схема расположения скважины ЮЗ-5 и с/ст. Петропавловск (ПЕТ). Кружками показаны эпицентры землетрясений 2013 г. (табл. 2). Показаны механизмы очагов землетрясений по <http://www.globalcmt.org/>.



Рис. 2. Строение наблюдательной скважины ЮЗ-5 и характеристика водовмещающих пород.

По реакции уровня воды на вариации атмосферного давления в скважине был диагностирован статически изолированный барометрический отклик уровня воды на изменения напряженно-деформированного состояния среды в диапазоне периодов часы — первые десятки суток. Для нее также установлен неискаженный приливной отклик уровня воды на периодах приливных волн полусуточной и суточной групп (Болдина, Копылова, 2008; Копылова, Болдина, 2006).

В период 1997-2012 гг. в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 зарегистрированы шесть косейсмических скачков с амплитудами 0.25–12.0 см во время местных землетрясений с $M_w = 6.2-7.8$, произошедших на расстояниях $R = 128-316$ км (табл. 1, № 1-6). Скачки уровня регистрировались, в основном, в течение 10-минутного интервала, включающего момент землетрясения. В четырех случаях наблюдалось понижение уровня воды, в двух случаях — его повышение (Копылова и др., 2010, 2012).

В 2013 г. во время двух сильнейших землетрясениями 28 февраля ($M_w = 6.8$, $R = 280$ км)

и 24 мая ($M_w = 8.3$, $R = 370$ км) (рис. 1, табл. 2) в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 также были зарегистрированы скачки с амплитудами 2.3 и 7.3 см соответственно (рис. 3). В обоих случаях наблюдалось повышение уровня воды.

В настоящей работе проводится оценка величин объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скважины ЮЗ-5 при двух сильных землетрясениях 2013 г. (рис. 1, табл. 2) по амплитудам косейсмических скачков с использованием расчетной величины приливной деформометрической чувствительности уровня воды по отношению к теоретической объемной деформации A_v , полученной из приливного анализа среднечасовых вариаций уровня воды. Для сравнения приводятся теоретические оценки объемной косейсмической деформации в районе скважины при этих же землетрясениях по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве (Okada, 1985).

Для определения параметров подвижек в очагах использованы фокальные механизмы из международного каталога Global CMT (табл. 2) (<http://www.globalcmt.org/>). По фокальным механизмам землетрясений с помощью указанной модели построены горизонтальные распределения объемной косейсмической деформации на глубине 500 м и оценены соответствующие величины объемной деформации в районе скважины. Для расчетов и графического представления горизонтальных распределений объемной косейсмической деформации использовалась программа-интерфейс для работы с алгоритмом, разработанным Y. Okada (Okada, 1985) на основе аналитических выражений смещений и напряжений в однородном упругом изотропном полупространстве вследствие однородной подвижки по заглубленному разрыву прямоугольной формы.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОБЪЕМНОЙ КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО УРОВНЕМЕРНЫМ ДАННЫМ

Оценка величины объемной косейсмической деформации производилась по формуле (1). Физический механизм косейсмического скачка уровня воды соответствует отклику порового давления на упругую деформацию водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения (Болдина, Копылова, 2008; Копылова и др., 2010).

Землетрясение 28 февраля 2013 г. ($M_w = 6.8$, $R = 280$ км) (табл. 2). Вступление сейсмических волн было зарегистрировано на ближайшей к скважине сейсмостанции Петропавловск (с/ст. РЕТ) в 14:07 (рис. 1). Интенсивность сотря-

КОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Таблица 1. Данные о землетрясениях и косейсмических скачках уровня воды в скважине ЮЗ-5 с оценкой косейсмической деформации воловмещающих пород на глубине 500 м.

№	Дата дд.мм.гггг	Время в очаге чч:мм	Координаты, градусы		Глубина, км	M_w	Эпицентральное расстояние, R , км	Амплитуда скачка уровня воды, Δh , см	Объемная косейсмическая деформация в районе скважины ЮЗ-5, 10^{-9}	
			с. ш.	в. д.					по косейсмическим скачкам уровня	по модели дислокации- очного источника (расчет по Okada, 1985)
1	05.12.1997	11:27	54.0	162.3	25	7.8	316 200*	-12.0	75±	14.3 40*
2	01.06.1998	05:34	52.81	160.37	31	6.9	136	-1.0	6.30.7	1.03
3	08.03.1999	12:26	51.93	159.72	7	7.0	162	-1.7	10.60.8	16.4
4	20.12.2000	09:20	53.31	160.06	65	6.2	110	0.6	-3.8±	-1.4
5	16.06.2003	22:08	55.30	160.34	190	6.9	266	-0.3	1.9±	0.61
6	20.03.2004	08:53	53.74	160.76	31	6.2	167	0.25	-1.60.4	-0.01
7	28.02.2013	14:05	50.83	157.90	45.1	6.8	280	-0.6	-3.7±	-1.5
8	24.05.2013	05:45	54.54	153.94	611.0	8.3	370	-6.0	-37.3±	-62.0

Примечание: * — эпицентральное расстояние от скв. ЮЗ-5 до средней точки плоскости смещения (координаты очага смещены в направлении скв. ЮЗ-5 на полградуса по с.ш. и в.д. в центр облака афтершоков первых суток); 1–6 по (Капылова и др., 2010).

Таблица 2. Параметры очагов землетрясений 2013 г. (по данным <http://www.globalcmt.org/>).

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Магнитуда M_w	Положение центра			Плоскости подвижки		Угол подвижки λ_s , градусы	Скалярный сейсмический момент M_0 , Н·м· 10^{20}
			град. с.ш.	град. в.д.	Н, км	азимут простираения ϕ_s , градусы	угол падения δ , градусы		
28.02.2013	14:05:59	6.8	50.83	157.9	45.1	212/36	32/58	86/92	0.211
24.05.2013	05:45:07	8.3	54.54	153.94	611	189/12	11/79	-93/-89	41.1

сений в районе скважины ЮЗ-5 составляла 4-5 баллов по шкале MSK-64 (Сильные ..., 2014).

Непосредственно после вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля (14:07) в течение 50-ти минут происходило повышение уровня воды, амплитуда которого составила 2.3 см (рис. 3б). Мы полагаем, что такой эффект мог быть вызван наложением двух процессов: объемным сжатием водовмещающих пород при их косейсмическом деформировании, отжатием из них подземной воды и ее поступлением в ствол скважины (косейсмический скачок повышения уровня воды), а также импульсным ростом порового давления в системе «скважина — водовмещающая порода» при прохождении сейсмических волн (кратковременное повышение уровня воды) (Болдина, Копылова, 2013).

Механизм импульсного повышения порового давления, инициированного прохождением сейсмических волн, не вполне ясен. Можно предположить, что он связан с неоднородностью фильтрационных свойств водовмещающих пород, примыкающих к стволу скважины, и с кратковременным эффектом нелинейной фильтрации, возникающей при воздействии сейсмических волн и сопровождающемся притоком воды в ствол скважины.

Для описания кратковременного повышения уровня воды (рис. 3б) нами использовалась затухающая экспоненциальная функция, которая применялась ранее при анализе

постсейсмического изменения уровня воды в скважине BV (США, Калифорния) в результате землетрясения Ландерс 28 июня 1992 г., $M_w = 7.3$ (Roeloffs, 1998):

$$u(t) = u_0(1 - \exp(-t/t_r)), \quad (2)$$

где u_0 — максимальная амплитуда повышения уровня воды, t — время; t_r — константа.

Эта экспоненциальная зависимость изменения уровня воды во времени может характеризовать диффузионный процесс течения воды без конкретизации пространственного изменения поля давления, вызывающего приток воды в скважину.

Вместе с тем, если наше предположение относительно механизма кратковременного повышения уровня воды верно, то константа t_r может рассматриваться как параметр времени релаксации давления в системе «скважина — водовмещающая порода».

Для учета амплитуды косейсмического скачка повышения уровня вследствие сжатия водовмещающих пород полагалось, что такой скачок произошел в период времени с 14:07 до 14:10 (рис. 3б). Его амплитуда Δh определялась путем подбора модели повышения уровня воды с максимальной амплитудой 2.3 см, складывающейся из u_0 , определяемой по (2), и Δh , то есть с учетом условия $u_0 + \Delta h = 2.3$ см.

Расчетное повышение уровня воды в течение 50 минут хорошо согласуется с наблюдаемыми данными при амплитуде косейсмического

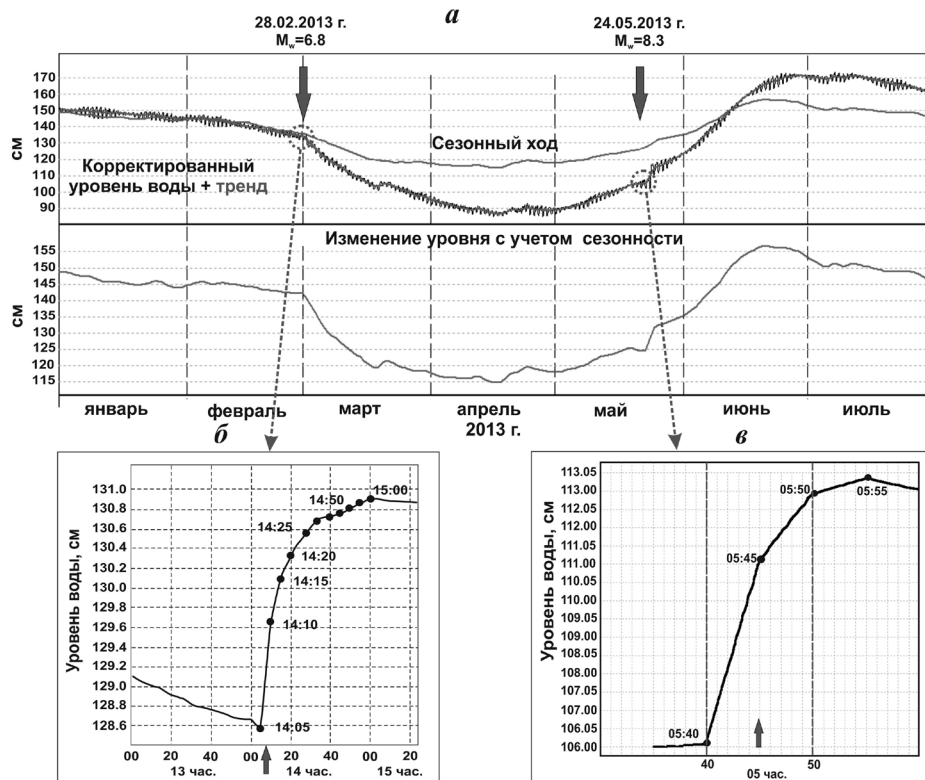


Рис. 3. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 1 января по 1 августа 2013 г. (а), включающие косейсмические вариации вследствие землетрясений 28 февраля (б) и 24 мая (в) 2013 г.

скачка $\Delta h = 0.6$ см, $u_0 = 1.7$ см и при величине $t_r = 12$ мин (рис. 4а).

Землетрясение 24 мая ($M_w = 8.3$, $R = 370$ км) (табл. 2). Вступление сейсмических волн было зарегистрировано в 05:45 на сейсмостанции Петропавловск (с/ст. РЕТ), расположенной вблизи скважины (рис. 1). Интенсивность сотрясений в районе скважины ЮЗ-5 составляла 4-5 баллов по шкале MSK-64 (Сильные ..., 2014).

После вступления сейсмических волн (05:45) в течение 15-ти минут происходило повышение уровня с амплитудой 7.3 см (рис. 3в). Полагая, что такое повышение, как и при землетрясении 28 февраля 2013 г., $M_w = 6.8$, обусловлено наложением двух процессов: косейсмического скачка повышения уровня и кратковременного повышения уровня воды

вследствие прохождения сейсмических волн, оценим амплитуду косейсмического скачка Δh по формуле (2).

Было сделано предположение, что такой скачек произошел в период времени с 05:45 до 05:50 (рис. 3в). Амплитуда скачка Δh определялась путем подбора модели повышения уровня воды с максимальной амплитудой 7.3 см, складывающейся из u_0 , определяемой по (2), и Δh , то есть с учетом условия $u_0 + \Delta h = 7.3$ см.

Расчетное повышение уровня воды в течение 15 минут хорошо согласуется с наблюдаемыми данными при амплитуде косейсмического скачка $\Delta h = 6$ см, $u_0 = 1.3$ см и при величине $t_r = 5$ мин (рис. 4б).

Оценка величины объемной косейсмической деформации. При оценке величины объемной косейсмической деформации D_1 по (1) для скважины ЮЗ-5 использовались величина приливной деформометрической чувствительности вариаций уровня воды в скважине по отношению к объемной приливной деформации $A_v = 0.161$ см/ 10^{-9} , полученная по отклику уровня воды на суточную и полусуточную группы приливных волн по результатам приливного анализа вариаций уровня воды (Болдина, Копылова, 2008; Копылова, 2006; Копылова и др., 2010) и полученные с использованием формулы (2) величины косейсмических скачков: $\Delta h = 0.6$ см (28.02.2013 г., $M_w = 6.8$) и $\Delta h = 6$ см (24.05.2013 г., $M_w = 8.3$).

Величина D_1 для скважины ЮЗ-5 составила $-3.7 \cdot 10^{-9}$ при землетрясении 28 февраля 2013 г. и $-3.73 \cdot 10^{-8}$ при землетрясении 24 мая 2013 г. По направлению изменения уровня воды (повышение) в обоих случаях характер деформации водовмещающих пород соответствует их сжатию.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОБЪЕМНОЙ КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Для расчетов и графического представления горизонтальных распределений объемной косейсмической деформации была создана программа-интерфейс для работы с алгоритмом модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве, разработанным Y. Okada (Okada, 1985).

Исходными данными для программы-интерфейса являются: геометрия разрыва (размеры, ориентация, глубина), величина и направление подвижки по разрыву, отношение упругих модулей среды. В результате расчетов получается трехмерное поле деформаций полупространства в виде распределения вектора смещений и его пространственных частных производных.

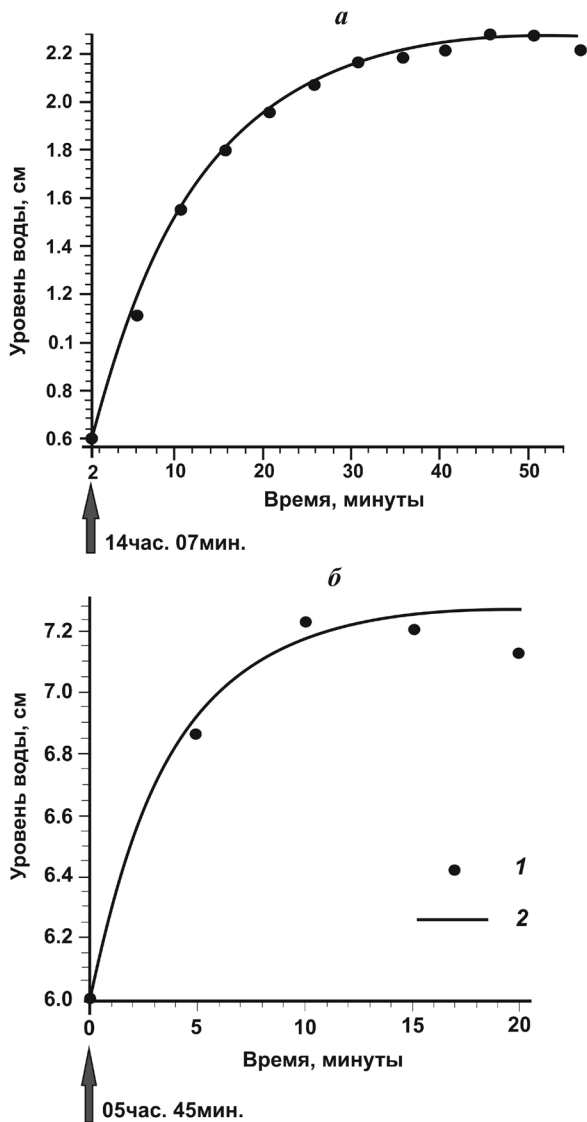


Рис. 4. Результаты моделирования повышения уровня воды в скважине ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн от землетрясений 28 февраля (а) и 24 мая (б) 2013 г.: 1 — 5-минутные данные наблюдений; 2 — расчетное повышение уровня воды по (2).

Для определения параметров подвижек в очагах использованы данные международного каталога Global CMT (<http://www.globalcmt.org/>): азимут простирания и угол падения плоскости разрыва, направление подвижки по разрыву, скалярный сейсмический момент.

Размеры очага: длина L по простиранию и ширина W по падению, оценивались по величине магнитуды M по формулам (Ризниченко, 1976):

$$\lg L = 0.440M - 1.289 \quad (3)$$

$$\lg W = 0.401M - 1.448 \quad (4)$$

Величина подвижки по разрыву U определялась из скалярного сейсмического момента M_0 :

$$U = M_0 / S\mu \quad (5)$$

где $S = LW$ — площадь разрыва, μ — модуль сдвига упругой среды.

С использованием этой программы-интерфейса для обоих землетрясений (табл. 2,

рис. 1) были выполнены оценки объемной косейсмической деформации D_2 на глубине 500 м, соответствующей средней глубине открытой части ствола скважины, через которую осуществляется связь скважины с водовмещающими породами. Графическое представление распределения по площади объемной косейсмической деформации на глубине 500 м представлено на рис. 5 и 6.

Получены величины косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 (табл. 1, № 7–8): для землетрясения 28 мая 2013 г. D_2 : $-1.5 \cdot 10^{-9}$ (рис. 5); для землетрясения 24 мая 2013 г. D_2 : $-6.2 \cdot 10^{-8}$ (рис. 6). Эти величины хорошо согласуются с полученными величинами объемной деформации D_1 по данным уровнемерных наблюдений на скважине (табл. 1, № 7-8).

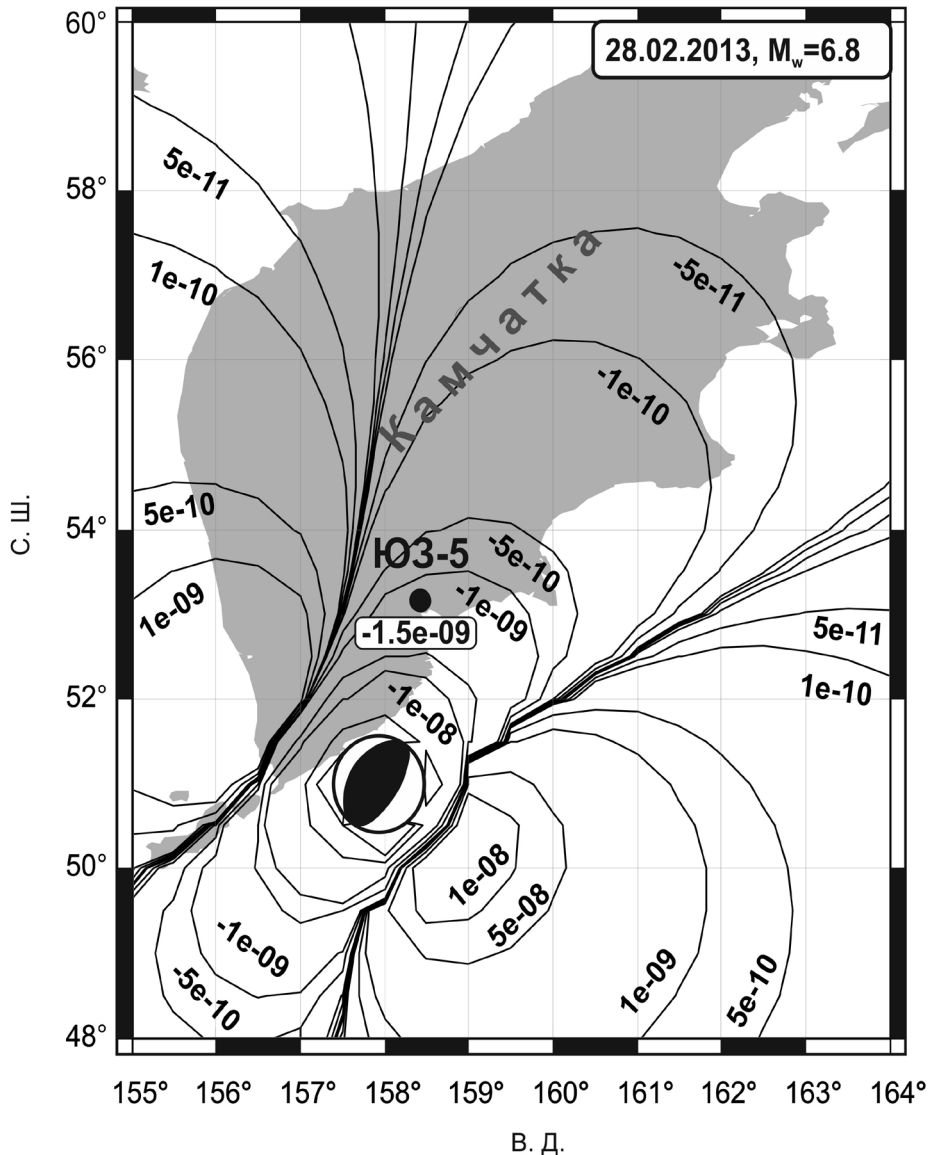


Рис. 5. Горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации на глубине 500 м по модели дислокационного источника для землетрясения 28 мая 2013 г. ($M_w = 6.8$, $R = 280$ км) с указанием величины деформации в районе скважины ЮЗ-5 (показана черным кружком).

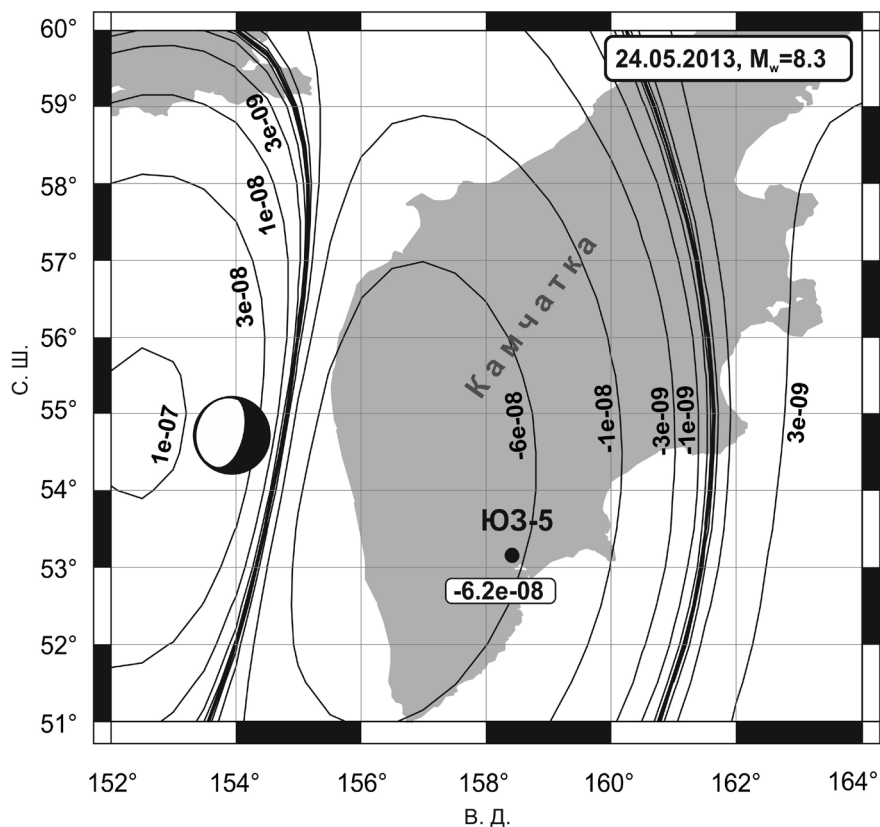


Рис. 6. Горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации на глубине 500 м по модели дислокационного источника для землетрясения 24 мая 2013 г. ($M_w = 8.3$, $R = 370$ км) с указанием величины деформации в районе скважины ЮЗ-5 (показана черным кружком).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение величин объемной косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений D_1 и по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве D_2 и возможные ошибки их определения. Ранее в работе (Копылова и др., 2010) для шести землетрясений (табл. 1, № 1–6) по обоим методам было получено соответствие оценок косейсмической деформации для скважины ЮЗ-5 по знаку и по амплитуде в пределах одного порядка величин. Для землетрясений: 28.02.2013 г. и 24.05.2013 г. также было получено хорошее соответствие и по знаку, и по амплитуде (табл. 1, № 7–8). На точность оценок D_1 и D_2 существенно влияют упрощения, заложенные как в самой модели равномерной подвижки по разрыву в однородном упругом изотропном полупространстве, так и в определении объемной косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений, в первую очередь, при оценивании величины приливной деформометрической чувствительности уровня воды A_v (Копылова и др., 2010).

По соотношению величин D_1 и D_2 для землетрясений, представленных в табл. 1, наблюдается равномерное распределение точек относительно

средней линии, характеризующей прямую зависимость этих величин (рис. 7). Какое-либо закономерное смещение друг относительно друга не наблюдается, что указывает на отсутствие систематической ошибки в определении косейсмической деформации по обоим методам. Поэтому можно полагать, что имеющиеся расхождения в оценках D_1 и D_2 обусловлены ошибками оценивания объемных деформаций, присущих обоим методам.

О зависимости проявления косейсмических скачков уровня воды от параметров землетрясений. Соотношения величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния R землетрясений, сопровождающихся косейсмическими скачками уровня воды в скважине ЮЗ-5 (табл. 1), описываются зависимостью из работы (Копылова и др., 2010) $M_w \geq 0.004R + 5.6$ (рис. 8). По соотношению величин M_w и R оба события 28 февраля и 24 мая 2013 г. находятся в области параметров землетрясений, которые раньше всегда сопровождались косейсмическими скачками (рис. 8).

Данные по механизмам очагов землетрясений (табл. 2, рис. 5, 6) согласуются с предположением о преимущественном косейсмическом сжатии водовмещающих пород в районе скважины ЮЗ-5 при обоих землетрясениях.

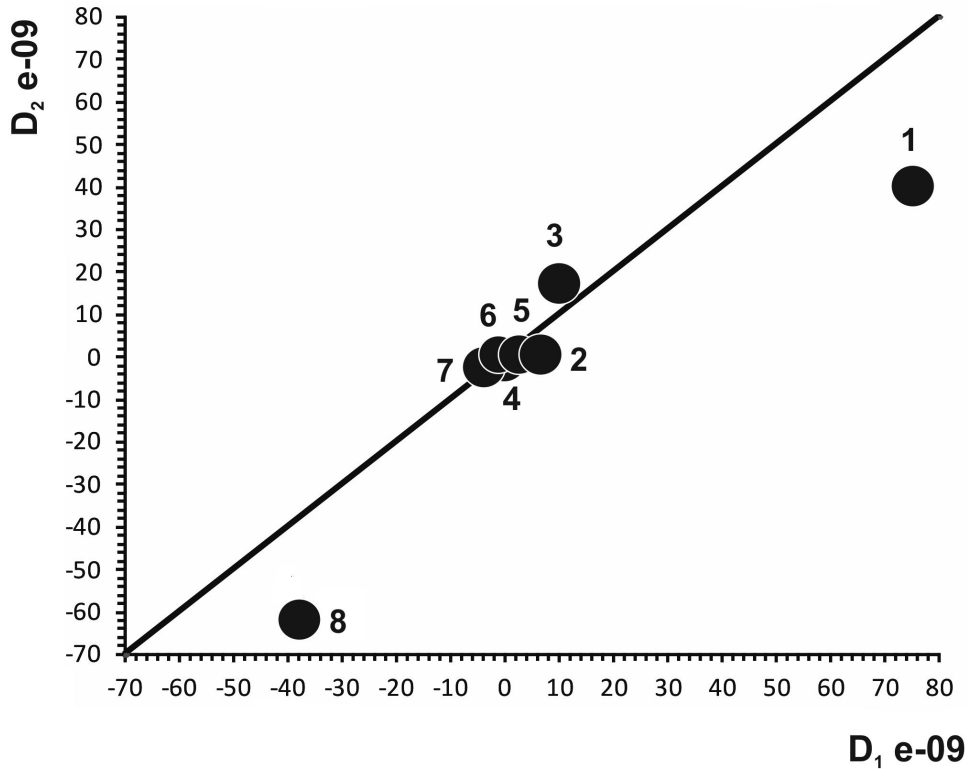


Рис. 7. Соотношение величин косейсмической объемной деформации в районе скважины Ю3-5, полученных по данным уровенерных наблюдений D_1 и по модели дислокационного источника D_2 . Номера кружков соответствуют номерам землетрясений в табл. 1.

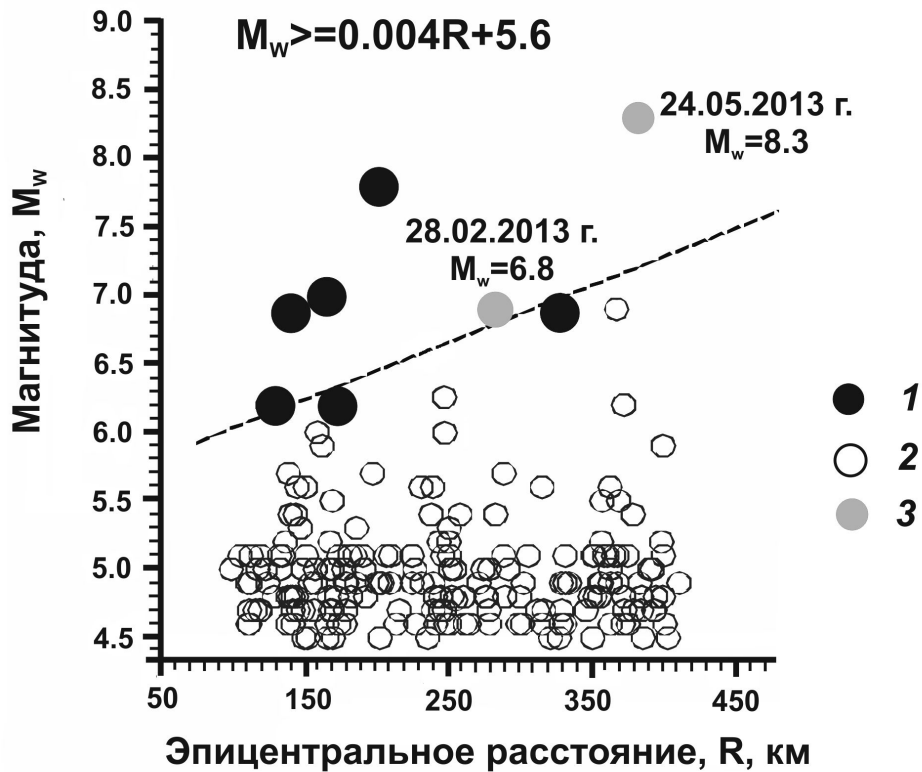


Рис. 8. Распределение землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших за время наблюдений на скважине Ю3-5 в 1997-2013 гг., в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния R , км: 1 — землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическим скачками уровня воды; 2 — землетрясения, в связи с которыми косейсмические скачки уровня не были зарегистрированы; 3 — землетрясения 28 февраля и 24 мая 2013 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное для землетрясений 28 февраля и 24 мая 2013 г. соответствие точечных оценок косейсмической объемной деформации по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве и экспериментальных оценок по данным уровневых наблюдений подтверждает высокую деформометрическую чувствительность вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне малых периодов.

Представленный способ оценки косейсмической деформации по данным уровневых наблюдений можно применять на других пьезометрических скважинах, расположенных в сейсмоактивных регионах и вскрывающих напорные подземные воды в скальных горных породах. Непременными условиями точечного оценивания косейсмической деформации при сильных землетрясениях по уровневых данным являются синхронная регистрация уровня воды и атмосферного давления с периодичностью не реже 5–10 минут, наличие и количественная оценка параметров приливного отклика в вариациях уровня воды, а также точное определение амплитуды косейсмического скачка уровня воды.

Исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ ФИЦ ЕГС РАН по темам: «Проведение непрерывного сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях, разработка и внедрение новых технологий обработки и системного анализа больших объемов сейсмологических и геофизических данных» (0152-2015-0003).

Список литературы

- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Оценка косейсмической деформации при Кроноцком землетрясении 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$ по данным уровневых наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 95–102.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Моделирование вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванных землетрясением 28.02.2013 г., $M = 6.8$ // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 435–439.
- Калинов Г.А., Лысаков А.В., Римлянд В.И. и др.* Автоматизированная система сбора гидрологической информации // Измерительная техника. 2012. № 2 (32). С. 92–99.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
- Копылова Г.Н.* Оценка информативности уровневых наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56–68.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод (по данным уровневых наблюдений на скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17–28.
- Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А.* О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровневых наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51–61.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смолина Н.Н. и др.* Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в пьезометрических скважинах Камчатки (по данным наблюдений 1987–2011 гг.) // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2012. С. 236–269.
- Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
- Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга», 2014. 252 с.
- Igarashi G., Wakita H.* Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells // JGR. 1991. V. 96. № B3. P. 4269–4278.
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
- Roeloffs E. A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure and Applied Geophysics. 1988. V. 126. № 2–4. P. 177–209.
- Roeloffs E. A.* Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes // JGR. 1998. V. 103. № B1. P. 869–889.
- Rojstaczer S.* Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // JGR. 1988. V. 93. № B11. P. 13619–13634.
- Rojstaczer S., Agnew D.S.* The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading. // JGR. 1989. V. 94. № B9. P. 12403–12411.

БОЛДИНА, КОПЫЛОВА

**COSEISMIC EFFECTS OF THE 2013 STRONG KAMCHATKA EARTHQUAKES
IN WELL YUZ-5**

Boldina S.V., Kopylova G.N.

*Kamchatka Branch of Geophysical Service Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,
e-mail: boldina@emsd.ru; gala@emsd.ru*

The paper presents a comparison of assessments of coseismic deformation caused by two strong earthquakes, which occurred in Kamchatka on February 28, 2013, at $M_w = 6.8$ and 24.05.2013, at $M_w = 8.3$: according to data on water-level observations in the well UZ-5 and according to the model of extended source of dislocation in a homogeneous isotropic elastic half-space with the parameters of seismic moment tensor (CMT) of the earthquake. Resulting estimates of volume deformation are similar in the values of amplitudes and agreed on sign (compression). This the evidence for a high sensitivity of the observation well to changes of stress-strain state of water-saturated rocks and its informativity during geophysical monitoring.

Keywords: well, water-level, water-saturated rock, coseismic deformation, earthquake.