

ОЦЕНКИ КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО УРОВНЕМЕРНЫМ ДАННЫМ (НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 24 МАЯ 2013 Г., КАМЧАТКА)

Болдина С.В., Копылова Г.Н.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
boldina@emsd.ru*

Введение

Образование разрывов в очагах землетрясений сопровождается не только излучением сейсмических волн, но и изменением статического поля напряжений на некоторой территории и, соответственно, косейсмической деформацией водовмещающих пород. Поэтому косейсмические скачки уровня воды, фиксируемые при уровнемерных наблюдениях в пьезометрических скважинах, можно рассматривать в качестве калибровочных сигналов, свидетельствующих о чувствительности наблюдательной скважины к изменениям напряженно-деформированного состояния среды и ее информативности при проведении геофизического мониторинга [1, 5].

Как показано в [1-2, 4-5] по амплитуде косейсмического скачка и по направлению изменения уровня воды можно оценить величину объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скважины и характер деформации (сжатие или расширение).

Наблюдения на скв. ЮЗ-5 проводятся Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), на скв. 1309 - ОАО «Камчатгеология» (табл.1). Наблюдения за вариациями уровня и атмосферного давления проводятся с использованием измерительного комплекса Кедр ДМ-У [3]. Обеспечивается точность измерений вариаций уровня воды ± 0.1 см.

Таблица 1. - Характеристика наблюдательных скважин

Скважина	Координаты, град		Глубина, м Фильтр, м	Уровень, м	Состав пород, возраст	Характеристика флюида	Система регистрации, периодичность
	с. ш.	в. д.					
ЮЗ-5	53.17	158.41	800 310-800	1.5	Алевролиты, К ₂	холодный пресный	Кедр ДМ-У, 5 мин
1309	56.03	158.57	790 223-790	4	Туфы, N ₂	холодный пресный	Кедр ДМ-У, 10 мин

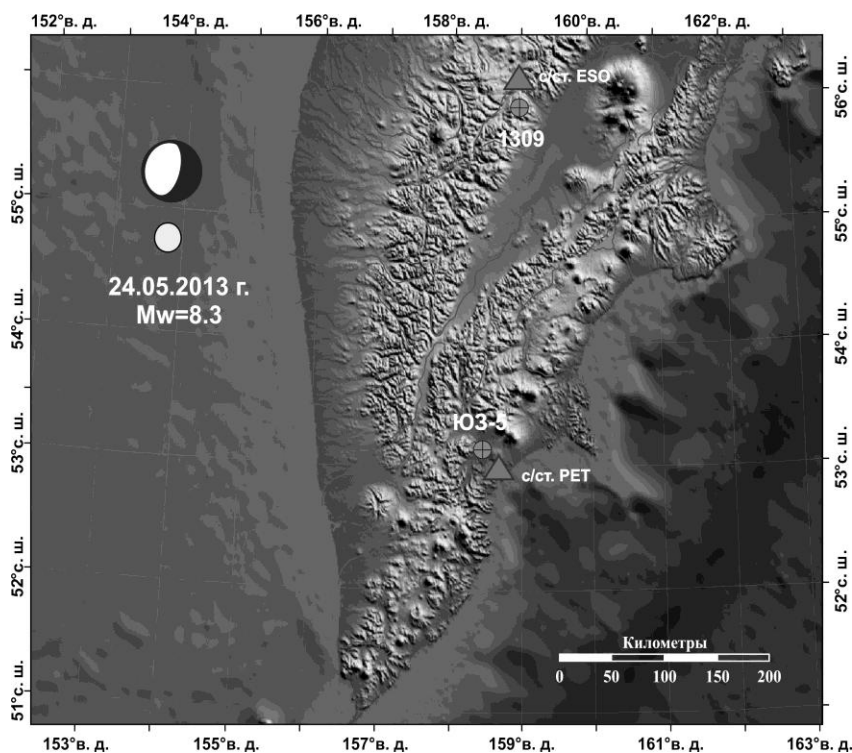


Рис. 1. Схема расположения скважин ЮЗ-5 и 1309, с/ст. Петропавловск (PET) и Эссо (ESO) эпицентра землетрясения 24 мая 2013 г. Показан также механизм очага землетрясения.

24 мая 2013 г. на расстоянии около 370 км от скв. ЮЗ-5 и 330 км от скв. 1309 произошло землетрясение с магнитудой $M_w=8.3$ (табл. 2). Вступление сейсмических волн было зарегистрировано в 05:45 на сейсмостанциях Петропавловск (с/ст. PET) и Эссо (с/ст. ESO), расположенных вблизи скважин (рис. 1). Интенсивность сотрясений в районе скв. ЮЗ-5 составляла 4-5 баллов, в районе скв. 1309 - 3-4 балла по шкале MSK-64 [6].

Таблица 2. - Параметры очага землетрясения 24.05.2013 г. (по данным <http://www.globalcmt.org/>)

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Магнитуда M_w	Положение центраида			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 простирания ϕ_s , градусы	угол падения δ , градусы		
24.05.2013	05:45:07	8.3	54.54	153.94	611	189/12	11/79	-93/-89	41.1

Оценка величины объемной косейсмической деформации по уровнемерным данным

Оценка величины объемной косейсмической деформации производилась по формуле [1, 4-5]:

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

где D_1 – объемная деформация в единицах 10^{-9} : положительное значение соответствует расширению, отрицательное значение соответствует сжатию, Δh – амплитуда косейсмического скачка уровня воды в см: положительное значение соответствует повышению уровня воды, отрицательное значение соответствует его понижению, A_v – приливная чувствительность вариаций уровня воды по отношению к объемной деформации, см/ 10^{-9} .

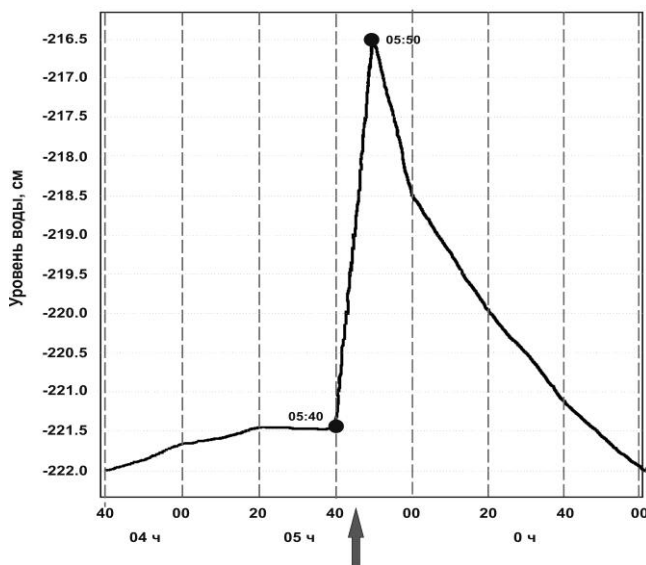


Рис. 2. Косейсмический скачок уровня воды в скважине 1309 после вступления сейсмических волн от землетрясения 24 мая 2013 г. (показано стрелкой).

Физический механизм косейсмического скачка уровня соответствует отклику порового давления на упругую деформацию водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения [1, 5].

Амплитуда косейсмического скачка уровня воды Δh в скв. 1309 составила 5 см (рис. 2).

В скв. ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн (05:45) в течение 15-ти минут происходило повышение уровня с амплитудой 7.28 см (рис. 3). В [2] предполагалось, что такое повышение

обусловлено наложением двух процессов: объемным сжатием водовмещающих пород при их косейсмическом деформировании, отжатием из них подземной воды и ее поступлением в ствол скважины, а также ростом порового давления при прохождении сейсмических волн.

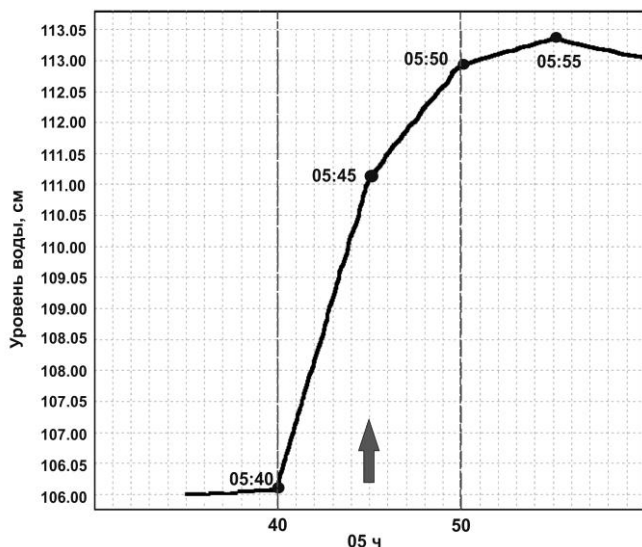


Рис. 3. Повышение уровня воды в скважине ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн от землетрясения 24 мая 2013 г. (показано стрелкой).

Для описания повышения уровня воды, вызванного прохождением сейсмических волн, использовалась затухающая экспоненциальная функция, которая ранее применялась при анализе изменения уровня воды в скважине BV (США, Калифорния) в результате землетрясения Ландерс 28 июня 1992 г., $M_w = 7.3$ [8]:

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

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

Для оценки амплитуды косейсмического скачка повышения уровня полагалось, что

такой скачек произошел в период времени с 05:45 до 05:50 (рис. 3). Его амплитуда Δh определялась путем подбора модели повышения уровня воды с максимальной амплитудой 7.28 см, складывающейся из u_0 , определяемой по (2), и Δh , т. е. с учетом условия $u_0 + \Delta h = 7.28$ см.

Расчетное повышение уровня воды в течение 15 минут хорошо согласуется с наблюдаемыми данными при амплитуде косейсмического скачка $\Delta h = 6$ см, $u_0 = 1.28$ см и при величине $t_r = 5$ (рис. 4).

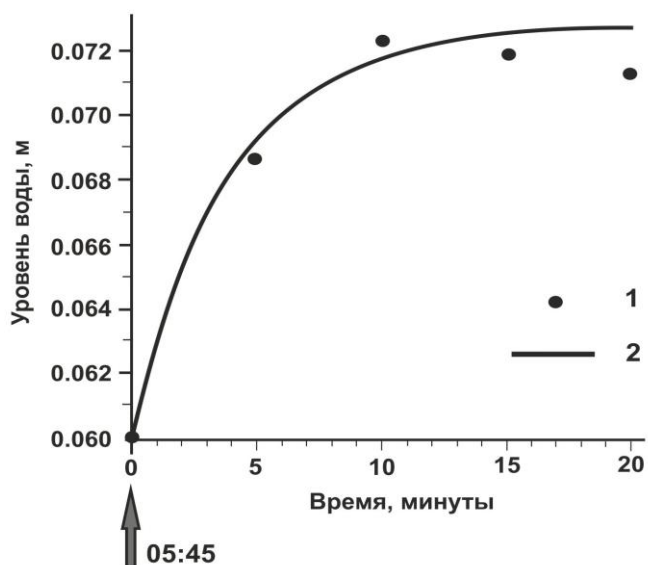


Рис. 4. Результаты моделирования повышения уровня воды в скважине ЮЗ-5 в течение 15 минут после вступления сейсмических волн от землетрясения 24 мая 2013 г. (показано стрелкой) с учетом величины косейсмического скачка $\Delta h = 0.06$ м: 1 – 5-минутные данные наблюдений; 2 – расчетное повышение уровня воды по (2).

При оценке величины D_1 для каждой из скважин ЮЗ-5 и 1309 по (1) использовались: A_v – величина приливной чувствительности вариаций уровня воды в скважине по отношению к объемной приливной деформации, полученные по отклику уровня воды на суточную и полусуточную группы приливных волн по результатам приливного анализа вариаций уровня воды. Для скв. ЮЗ-5 – $A_v = 0.161$ см/10⁻⁹, а для скв. 1309 – 0.124 см/10⁻⁹

[1, 4-5]. Получена величина D_1 для обеих скважин: – 3.73·10⁻⁸ (скв. ЮЗ-5) и – 4.03·10⁻⁸ (скв. 1309). По направлению изменения уровня воды (повышение) характер деформации водовмещающих пород соответствует их сжатию.

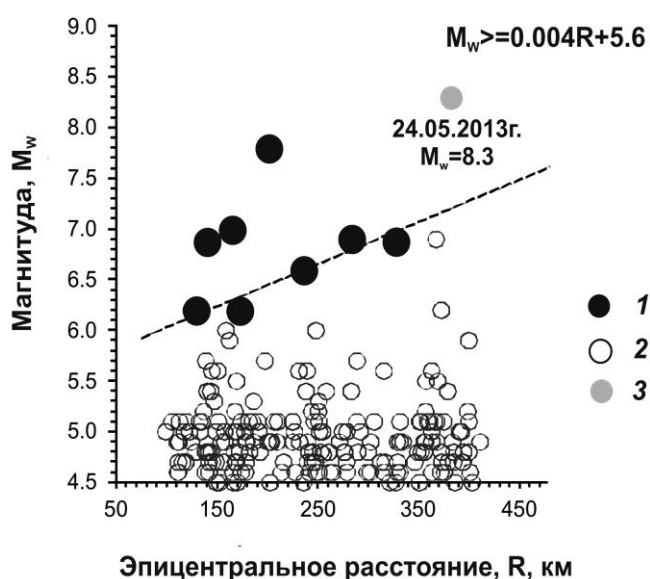


Рис. 5. Распределение землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших за время наблюдений на скважине ЮЗ-5, в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния R , км: 1 – землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды; 2 – землетрясения, в связи с которыми косейсмические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

На рис. 5 представлена диаграмма и эмпирическая формула из [5], определяющие проявление косейсмических скачков уровня в скв. ЮЗ-5 в зависимости от соотношения величин магнитуды и эпицентрального расстояния землетрясений. Видно, что по соотношению магнитуды и расстояния событие 24 мая находится в области параметров

землетрясений, которые раньше всегда сопровождались косейсмическими скачками уровня. Данные по механизму очага землетрясения (табл. 2, рис. 1) не противоречат гипотезе о преимущественном косейсмическом сжатии водовмещающих пород в районе скв. ЮЗ-5.

Теоретическая оценка величины объемной косейсмической деформации

Для землетрясения 24 мая (табл.2; рис. 1) была выполнена оценка объемной косейсмической деформации D_2 в окрестности обеих скважин по модели дислокации в однородном упругом изотропном полупространстве по алгоритму Okada, 1985 [7]. На рис. 6 представлено распределение по площади объемной косейсмической деформации на глубинах 500 м для скв. ЮЗ-5 и 240 м для скважины 1309, соответствующих средней глубине открытой части стволов скважин, через которые осуществляется связь скважин с водовмещающими породами. В районе скважин получены величины косейсмической деформации D_2 : – 6.20·10⁻⁸ в районе скв. ЮЗ-5 и – 5.3·10⁻⁸ в районе скв. 1309. Эти

величины хорошо согласуются с полученными величинами объемной деформации D_1 по данным равномерных наблюдений для обеих скважин.

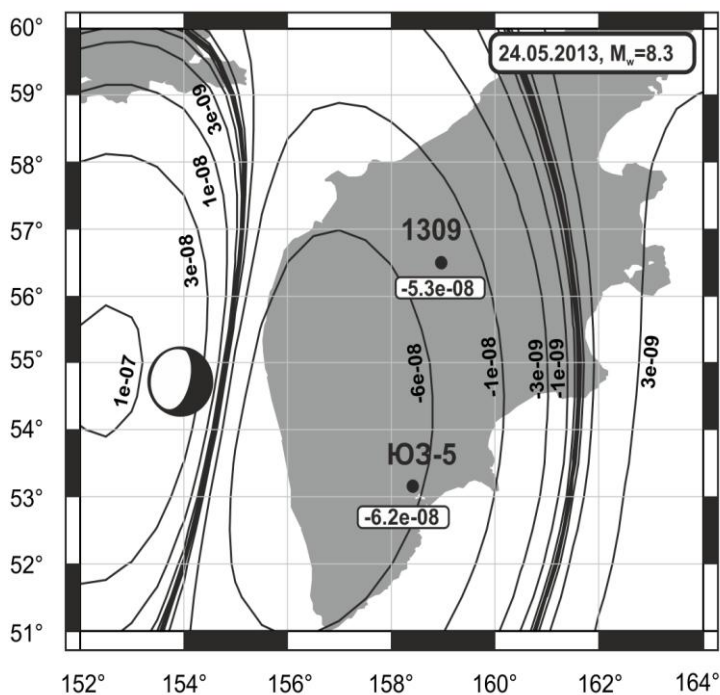


Рис. 6. Горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации по модели дислокационного источника для землетрясения 24 мая 2013 г., $M_w=8.3$ с указанием величин деформации в районе скважин ЮЗ-5 и 1309 (показаны черными кружками).

Сравнение величин объемной косейсмической деформации по обоим методам

В работе [5] для шести землетрясений (см. табл. 3 № 1-6) по обоим методам было получено соответствие оценок косейсмической деформации для скв. ЮЗ-5 по знаку и по амплитуде в пределах одного порядка величин. Для землетрясений: 28.02.2013 г. и 24.05.2013 г. (см. табл. 3 № 7-9) также было получено хорошее соответствие оценок косейсмической деформации для скважин ЮЗ-5 (см. табл. 3 № 7-8) и 1309 (см. табл. 3 № 9) и по знаку, и по амплитуде. На точность оценок D_1 и D_2 существенно влияет как ряд упрощений, заложенных 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 чувствительности уровня воды A_v [5].

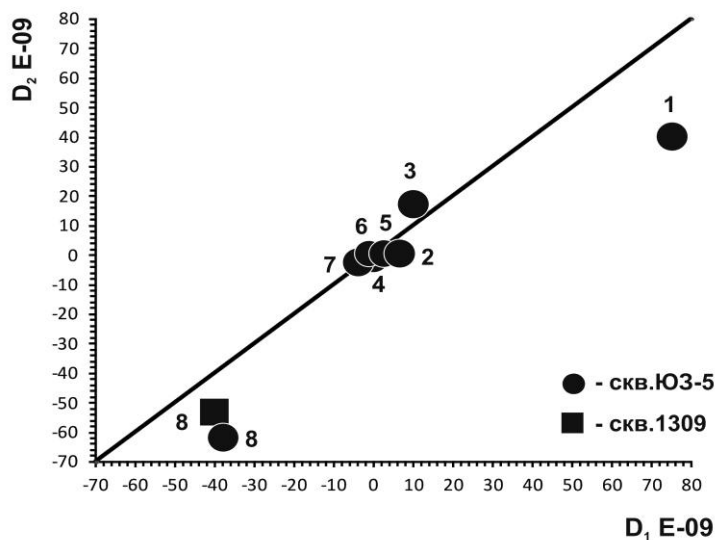


Рис. 7. Соотношение величин косейсмической объемной деформации, полученных по данным равномерных наблюдений D_1 и по модели дислокационного источника D_2 . Номера соответствуют номерам землетрясений по табл. 3.

На рис. 7 приводится соотношение величин объемной косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений D_1 и модели дислокационного источника D_2 . Наблюдается равномерное распределение точек относительно средней линии, характеризующей прямую зависимость этих величин. Какое-либо закономерное смещение точек 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.

Заключение

Полученное соответствие теоретических оценок косейсмической объемной деформации по модели протяженного дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве и экспериментальных оценок по данным равномерных наблюдений подтверждает высокую деформометрическую чувствительность вариаций уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1309 в

диапазоне малых периодов и перспективность их использования в системе геофизического мониторинга Камчатки.

Таблица 3. - Данные о землетрясениях и косейсмических скачках уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1309 и оценка косейсмической деформации

Скважина	№	Дата гммдд	Время в очаге чч:мм	Координаты, град		Глубина, км	M _w	Гипоцентральное 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 дислокационного источника (расчет по Okada)
ЮЗ-5	1	971205	11:27	54.0	162.3	25	7.8	316 200*	-12.0	75±4	14.3 40*
	2	980601	05:34	52.81	160.37	31	6.9	140	-1.0	6.3±0.7	1.03
	3	990308	12:26	51.93	159.72	7	7.0	164	-1.7	10.6±0.8	16.4
	4	001220	09:20	53.31	160.06	65	6.2	128	0.6	-3.8±0.5	-1.4
	5	030616	22:08	55.30	160.34	190	6.9	328	-0.3	1.9±0.4	0.61
	6	040320	08:53	53.74	160.76	31	6.2	169	0.25	-1.6±0.4	-0.01
	7	130228	14:05	50.83	157.90	45.1	6.8	274	-0.6	-3.7±0.4	-1.5
	8	130524	05:45	54.54	153.94	611.0	8.3	692	-5.0	-37.3±2	-62.0
1309	8	130524	05:45	54.54	153.94	611.0	8.3	692	-5.0	-40.3±4	-53.0

Примечание: * - гипоцентральное 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. (гипоцентральное расстояние 200 км)).

Представленный способ оценки косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений можно применять на других пьезометрических скважинах, расположенных в сейсмоактивных регионах и вскрывающих напорные подземные воды. Непременными условиями точечного оценивания косейсмической деформации при сильных землетрясениях по уровнемерным данным являются прецизионная и 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.

Список литературы:

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка косейсмической деформации при Кроноцком землетрясении 5.12.1997 г., M_w=7.8 по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С.95-102.
2. 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.
3. Калинов Г.А., Лысаков А.В., Римлянд В.И. и др. Автоматизированная система сбора гидрологической информации // Измерительная техника. 2012. № 2 (32). С. 92-99.
4. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
5. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51-61.
6. Сильные камчатские землетрясения 2013 года / под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. «Новая книга». 2014. 252 с.
7. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. of Seism. Soc. Amer. 1985. V. 75. P. 1135-1154.
8. Roeloffs E. A. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 869-889.