

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА, ВЫЗВАННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 28.02.2013 г., $M=6.8$

Болдина С.В., Копылова Г.Н.

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

Введение

Достоверная диагностика изменений уровня воды, вызванных процессами подготовки и реализации сильных землетрясений, является основной целью проведения скважинных уровнемерных наблюдений в сейсмоактивных районах. Такие изменения уровня воды называются гидрогеосейсмическими вариациями. Описание различных типов гидрогеосейсмических вариаций - гидрогеодинамических предвестников, косейсмических скачков и постсейсмических изменений, зарегистрированных в скважинах Камчатки в связи с местными и удаленными сильнейшими землетрясениями, приводится в [1-6]. Наличие данных о гидрогеосейсмических вариациях с указанием их форм, амплитуд и продолжительностей позволяет изучать гидрогеодинамические процессы в системах «скважина – водовмещающая порода» под воздействием сейсмичности. При этом математическое моделирование гидрогеосейсмических вариаций с учетом фильтрационных и упругих параметров водовмещающих пород, технического строения скважины, эффекта инерционности водообмена между скважиной и водовмещающей породой является одним из эффективных способов описания таких процессов [2, 8].

Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) проводит наблюдения на двух глубоких скважинах Е-1 и ЮЗ-5 с использованием измерительного комплекса Кедр ДМ-У [3]. Регистрация уровня воды и атмосферного давления проводится с интервалом 5 минут; обеспечивается точность измерений вариаций уровня воды не хуже ± 0.1 см.

28 февраля 2013 г. на расстоянии около 280 км от наблюдательных скважин произошло землетрясение с магнитудой $M_w=6.8$ (определение NEIS (USGS)). Вступление сейсмических волн было зарегистрировано на ближайшей к скважинам сеймостанции Петропавловск (с/ст РЕТ) в 14:07 (рис. 1). Интенсивность сотрясений в районах скважин составляла 4-5 баллов по шкале MSK-64 [7].

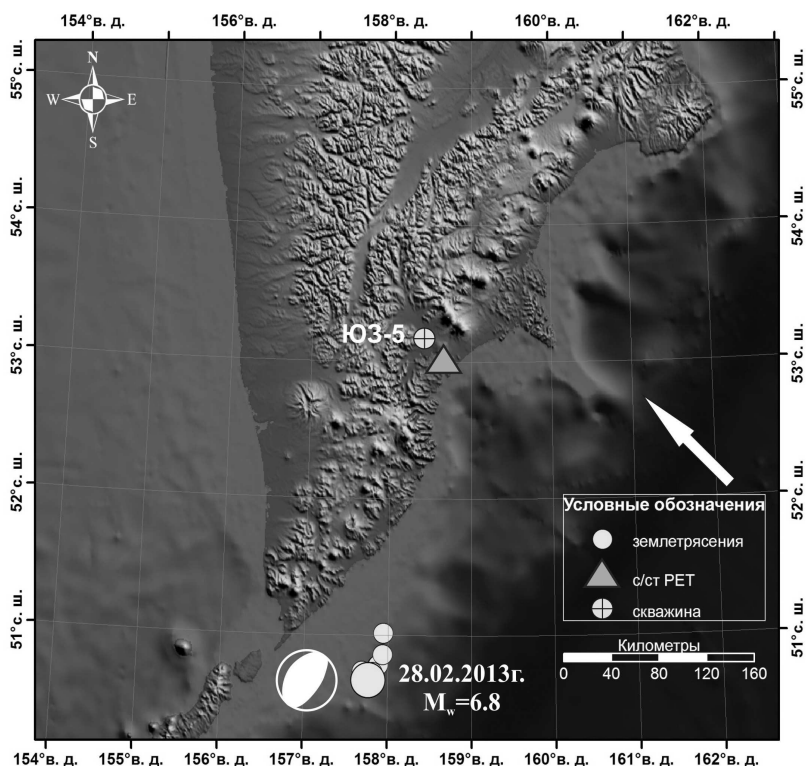


Рис. 1. Схема расположения скважины ЮЗ-5, с/ст. Петропавловск (РЕТ), эпицентров землетрясения 28 февраля 2013 г. и его сильнейших афтершоков. Показаны также механизм очага землетрясения и направление движения Тихоокеанской океанической плиты (стрелка).

В докладе рассматриваются гидрогеосейсмические вариации уровня воды, зарегистрированные в скв. ЮЗ-5 (53.17° с. ш., 158.41° в. д., глубина 800 м; уровень воды находится на глубине 1.5 м; в интервале 310 - 800 м вскрыты напорные подземные воды в алевролитах и сланцах позднемелового возраста [4,6, <http://emsd.ru/cgi/places/uz5>]).

Характеристика гидрогеосейсмических вариаций уровня воды

На рис. 2 А представлены изменения уровня воды в скв. ЮЗ-5 в период землетрясения 28 февраля. Наиболее ярко проявилось постсейсмическое понижение уровня в течение 1.5 мес. с амплитудой около 45 см (см. графики 3 и 4). Ранее эффект интенсивного постсейсмического понижения уровня воды наблюдался в скв. ЮЗ-5 лишь однажды, после Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w = 7.8$, произошедшего на эпицентральной дистанции 310 км. В этом случае понижение уровня с амплитудой около 1 м продолжалось три месяца [4, 6].

Непосредственно после вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля (14:07) в течение 50-ти минут происходило повышение уровня с амплитудой 2.3 см (рис. 2 Б). Мы полагаем, что такой эффект мог быть вызван наложением косейсмического скачка повышения уровня вследствие изменения напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения (их объемного сжатия) и кратковременного повышении порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении сейсмических волн.

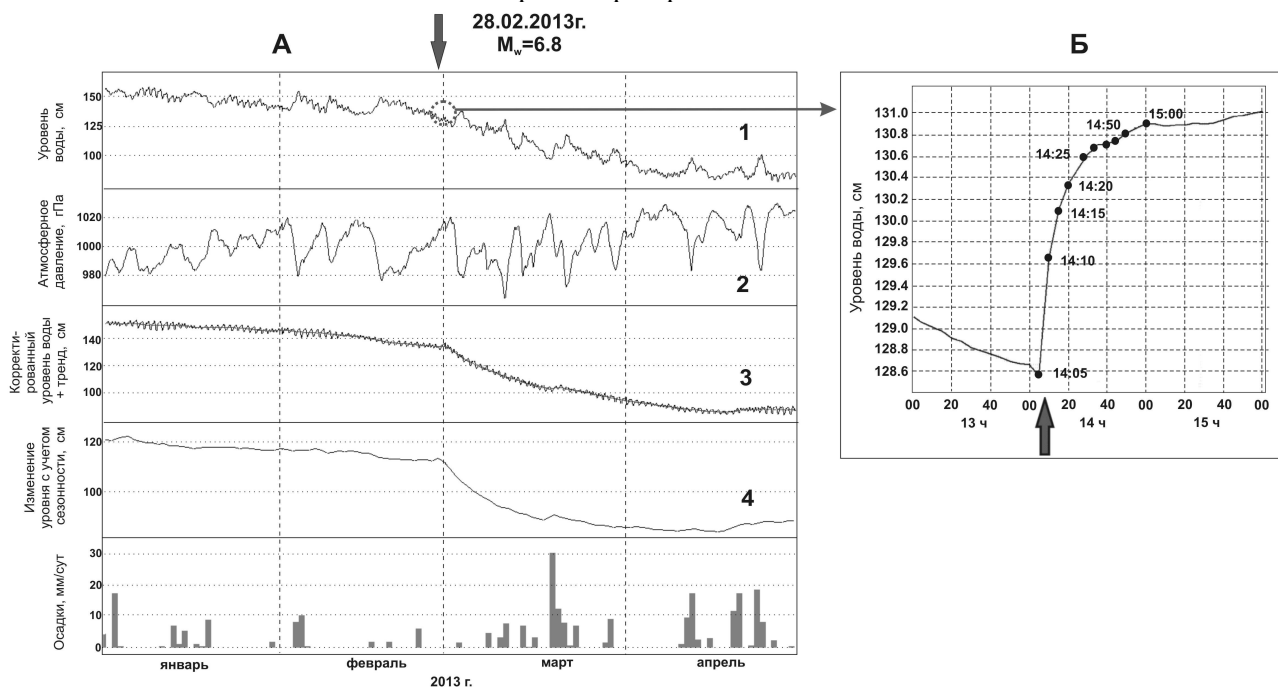


Рис. 2. (А) Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 с 01 января по 30 апреля 2013 г., включающие постсейсмическое понижение после землетрясения 28 февраля 2013 г. (момент землетрясения показан стрелкой): 1 и 2 – данные 5-минутной регистрации уровня воды и атмосферного давления, 3 – среднечасовые изменения уровня воды с компенсированными баровариациями и выделенным трендом, 4 – среднечасовые изменения уровня воды с учетом сезонности; (Б) 50-минутное повышение уровня воды после вступления сейсмических волн (14:07, показано стрелкой) по данным 5-минутной регистрации.

На рис. 3 представлена диаграмма и эмпирическая формула, определяющие проявление косейсмических скачков уровня в скв. ЮЗ-5 в зависимости от соотношения величин магнитуды и эпицентрального расстояния землетрясений [5-6].

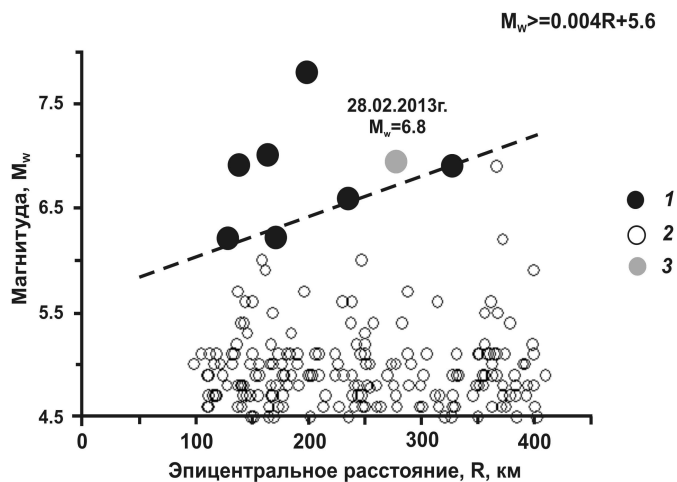


Рис. 3. Распределение землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших за время наблюдений на скважине ЮЗ-5, в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния R , км [5-6]: 1 – землетрясения, сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды; 2 – землетрясения, в связи с которыми косейсмические скачки уровня не были зарегистрированы; 3 – землетрясение 28 февраля 2013 г.

Из рис. 3 видно, что по соотношению магнитуды и расстояния событие 28 февраля находится в области землетрясений, которые

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

Таблица. Параметры очага землетрясения 28.02.2013 г. (по данным каталога СМТ (<http://www.globalcmt.org/>))

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Магнитуда M_w	Положение центроида			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 простиранья 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

Моделирование гидрогеосейсмических вариаций уровня воды

Повышение уровня воды в течение 50 минут с амплитудой 2.3 см (14:05 - 14:55, рис. 2 Б) отражает процесс увеличения порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода». Будем полагать, что такое повышение обусловлено наложением двух процессов: косейсмическим объемным сжатием водовмещающих пород и ростом порового давления в системе «скважина – водовмещающая порода» при прохождении сейсмических волн. При этом физический механизм косейсмического скачка уровня соответствует отклику порового давления на упругую деформацию водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения [1-2, 5].

Механизм повышения 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 постсейсмического повышения уровня воды (рис. 2 Б) использовалась затухающая экспоненциальная функция, которая ранее применялась при анализе постсейсмического изменения уровня воды в скважине BV (США, Калифорния) в результате землетрясения Ландерс 28 июня 1992 г., $M_w = 7.3$ [8]:

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

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

Экспоненциальная зависимость изменения уровня воды во времени (1) 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 повышения уровня верно (кратковременное повышение давления в водовмещающей породе вблизи ствола скважины), 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 скачек произошел в период времени с 14:07 до 14:10 (см. рис. 2 Б). Его амплитуда Δh определялась путем подбора модели повышения уровня воды с максимальной амплитудой 2.3 см, складывающейся из u_0 , определяемой по (1), и Δh , т. е. 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 скачка $\Delta h = 0.6$ см, $u_0 = 1.7$ см и при величине $t_r = 12$ мин (рис. 4).

По амплитуде косейсмического скачка Δh и по направлению изменения уровня воды можно оценить величину объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скважины и характер деформации (сжатие или расширение).

Для оценки величины объемной деформации использовалась формула [1, 4-5]:

$$D = -\Delta h/A_v, \quad (2)$$

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

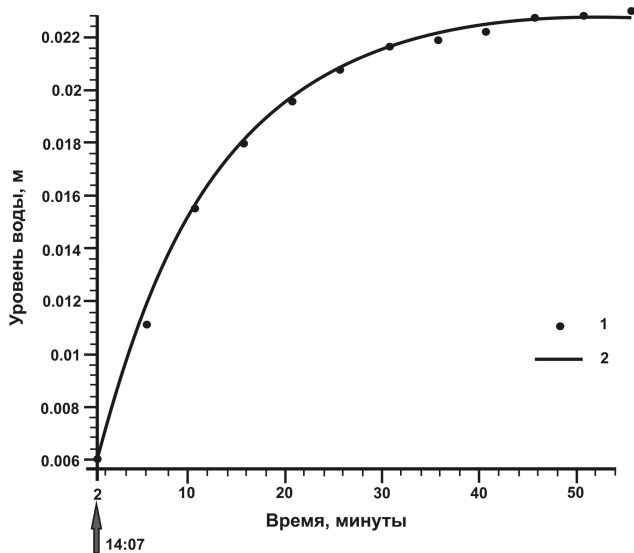


Рис. 4. Результаты моделирования повышения уровня воды в скважине ЮЗ-5 в течение 50 минут после вступления сейсмических волн от землетрясения 28 февраля 2013 г. (показано стрелкой): 1 – 5-минутные данные наблюдений; 2 – расчетное повышение уровня воды по (1).

При оценке величины $D = -3.7 \cdot 10^{-9}$ по (2) использовались: величина приливной чувствительности уровня воды в скв. ЮЗ-5 по отношению к объемной приливной деформации $A_v = 0.161 \text{ см}/10^{-9}$, полученная по результатам приливного анализа вариаций уровня воды [1, 4-5] и величина $\Delta h = 0.6 \text{ см}$. По направлению изменения уровня воды (повышение) характер деформации водовмещающих пород соответствует сжатию.

Для проверки величины косейсмической деформации в районе скв. ЮЗ-5, полученной по данным урвнмерных наблюдений, выполнялась ее теоретическая оценка (ε) на основе решения уравнения для двойной пары сил в бесконечной однородной среде [1] по формуле:

$$\varepsilon = -\frac{2M_0}{\pi \rho c_p^2 r^3} \sum_{p,q=1}^3 M_{pq} \gamma_p \gamma_q, \quad (3)$$

где M_0 – скалярный сейсмический момент, ρ – плотность среды, c_p – скорость Р-волн, r – гипоцентральное расстояние, M_{pq} ($p, q = 1, 2, 3$) – компоненты единичного тензора сейсмического момента (механизм), γ_p ($p = 1, 2, 3$) – направляющие косинусы луча.

Расчет косейсмической объемной деформации при землетрясении 28 февраля по (3) с использованием величин $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_p = 6.15 \cdot 10^3 \text{ м}/\text{с}$, $r = 283 \cdot 10^3 \text{ м}$ (расстояние от центра до скважины), $M_0 = 0.211 \cdot 10^{20} \text{ Н} \cdot \text{м}$ и параметров СМТ (табл.), дает величину объемной деформации в районе скв. ЮЗ-5 $\varepsilon = 1.8 \cdot 10^{-9}$. Некоторое различие в определении амплитуды косейсмической деформации в районе скважины ($D = -3.7 \cdot 10^{-9}$ и $\varepsilon = 1.8 \cdot 10^{-9}$) связано с ошибками оценивания объемных деформаций, присущих обоим используемым методам [5].

Понижение уровня воды в скв. ЮЗ-5 после землетрясения 28 февраля продолжалось в течение 1.5 мес. После 15 апреля началось возвращение уровня воды к его фоновому сезонному положению. Визуально, амплитуда понижения уровня воды с 28 февраля по 15 апреля составила примерно 45 см (рис. 2 А). Если учесть характер сезонного тренда за многолетний период, то амплитуда постсейсмического понижения уровня в результате землетрясения будет меньше ($\approx 28 \text{ см}$, см. график 4 на рис. 2 А).

Постсейсмическое понижение уровня с 28 февраля по 15 апреля отражает понижение и восстановление напора в контролируемом скважиной водоносном горизонте и может описываться математической моделью удаленного точечного источника падения напора [2]:

$$x = x_0 - \Delta h \cdot \text{erfc}\left(R/\sqrt{4at}\right), \quad (4)$$

где x – уровень воды в скважине, x_0 – начальный уровень воды в скважине, $\Delta h = \Delta p/\rho g$ – изменение напора при изменении порового давления Δp , ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, R – расстояние от источника падения напора в горизонте до скважины, a – пьезопроводность, t – время.

Результаты расчета по (4) показывают удовлетворительное соответствие расчетной зависимости с постсейсмическим понижением уровня воды при следующих параметрах (рис. 5): амплитуда понижения уровня воды в скважине $\Delta h = 0.28 \text{ м}$, пьезопроводность $a = 0.24 \text{ м}^2/\text{с}$, расстояние от источника падения напора в водоносном горизонте до скважины $R = 450 \text{ м}$.

В качестве наиболее вероятного механизма падения напора в водоносном горизонте после Кроноцкого землетрясения в [2, 4] рассматривалось локальное повышение проницаемости водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях. Отметим также, что результаты расчета понижения уровня воды после Кроноцкого землетрясения с использованием (4) согласуются с представленными выше результатами (рис. 5) в части определения расстояния до источника падения

напора. В обоих случаях эти величины оказались одинаковыми $R = 450$ м. Возможно, это указывает на то, что на расстоянии порядка 450 м от скважины расположен геологический объект, проницаемость которого может резко увеличиваться при сейсмических сотрясениях, достигающих 4-5 и более баллов по шкале MSK-64. Для обоснованных предположений о природе этого объекта следует провести полевое обследование территории, примыкающей к скв. ЮЗ-5.

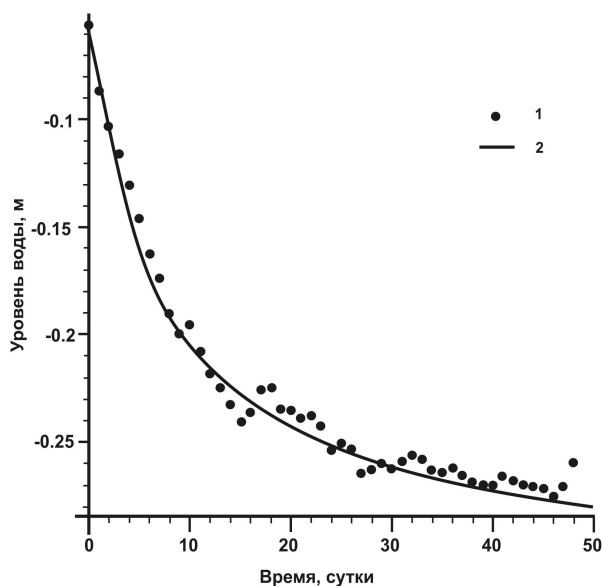


Рис. 5. Результаты моделирования понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 после землетрясения 28.02.2013 г.:

1 – среднесуточные данные наблюдений с компенсированными барометрическими и сезонными вариациями;
2 – расчетное понижение уровня воды по (4).

Заключение

Землетрясение 28 февраля 2013 г., $M_w = 6.8$ сопровождалось гидрогеосейсмическими вариациями уровня воды в скв. ЮЗ-5, имеющими, в основном, ко- и постсейсмический характер. С использованием измерительного комплекса Кедр ДМ-У [3] зарегистрировано кратковременное повышение уровня (рис. 2 Б), сменившееся длительным понижением (рис. 2 А). Этот факт расширяет эмпирическую базу наблюдений за различными типами гидрогеосейсмических

вариаций уровня воды.

Кратковременное повышение уровня воды могло быть обусловлено наложением эффектов косейсмической деформации сжатия водовмещающих пород и импульса повышения порового давления вблизи скважины. Оценена амплитуда косейсмического скачка уровня воды (0.6 см), получено соответствие оценок косейсмической деформации по равномерным данным и по теоретической модели очага ($D = -3.7 \cdot 10^{-9}$ и $\varepsilon = 1.8 \cdot 10^{-9}$). Такое соответствие подтверждает высокую деформометрическую чувствительность уровня воды в скв. ЮЗ-5.

Длительное постсейсмическое понижение уровня могло быть вызвано падением напора в водоносном горизонте вследствие локального повышения проницаемости и улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях.

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 равномерных 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. Механизмы отклика уровня воды в скважинах на сейсмические воздействия // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 50-54.
3. Калинов Г.А., Копылова Г.Н., Калинов Д.Г. и др. Измерительный комплекс для регистрации гидрогеосейсмических вариаций уровня воды и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах // Наст. сборник.
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 равномерных наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51-61.
6. 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: Новая книга, 2012. С. 236-269.
7. Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.В. и др. Сильное землетрясение 28.02.2013 г. у юго-восточного побережья Камчатки с магнитудой $M_w=6.8$ по данным оперативной обработки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 10-16
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.