

УДК 556.3+550.34

ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2017-2018 гг.

Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский,
boldina@emsd.ru, gala@emsd.ru

Введение

Наблюдения за вариациями уровня воды в пьезометрических скважинах традиционно используются в системах геофизического мониторинга и поиска предвестников землетрясений в сейсмоактивных регионах [2, 6]. Проведение таких работ предполагает оценивание свойств скважин в качестве «датчиков» изменения напряженно-деформированного состояния геосреды при сейсмотектонических процессах с использованием данных о барометрических, приливных и других видах откликов наблюдаемых систем «скважина – водовмещающая порода» [3]. При этом регистрация разнообразных вариаций уровня (давления) подземных вод, вызванных отдельными землетрясениями, дает новые экспериментальные данные при изучении процессов подготовки и реализации землетрясений, а также воздействия сейсмических волн на состояние флюидонасыщенной среды и гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – водовмещающая порода». Различные эффекты изменений уровня (давления) воды при воздействии сейсмических волн или *гидрогеосейсмические вариации* (ГГСВ) отражают совокупные процессы в системе «скважина – водовмещающая порода» при динамической деформации водовмещающих пород и сопутствующих фильтрационных процессах [4, 13].

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) проводит многолетние уровнемерные наблюдения в двух пьезометрических скважинах Е-1 и ЮЗ-5 с использованием цифрового оборудования [8]. В настоящей работе рассматриваются вариации уровня воды при 5-ти сильных местных и телесейсмических землетрясениях, произошедших в 2017-2018 гг. (табл.). Косейсмический скачок уровня воды в скважине ЮЗ-5 с амплитудой $\Delta h = 3.8$ см при Ближне-Алеутском землетрясении 17 июля 2017 г., $M_w = 7.8$, эпицентрального расстояние $d_e = 750$ км, был зафиксирован впервые на таком удалении от скважины. В скважине Е-1 в 2012-2017 гг. проявлялся тренд понижения уровня воды с амплитудой около 1.5 м, который рассматривается в качестве нового гидрогеодинамического предвестника усиления сейсмической активности в пределах обширного района Камчатской сейсмоактивной области, включая область ее сочленения с Алеутской островной дугой.

Таблица. Сильные землетрясения 2017-2018 гг. (<http://www.globalcmt.org>), сопровождавшиеся вариациями уровня (давления) воды в скв. ЮЗ-5

Дата, дд.мм.гг	Время в очаге, ч:мин:с	Координаты, град		M_w	H , км	d_e , км	Район	Характер вариаций уровня воды
		с. ш.	в. д.					
17.07.17	23:34:13	54.44	168.86	7.8	10	750	Камчатка (Алеуты)	Косейсмический скачок повышения уровня на 3.8 см
09.09.17	4:49:21	15.07	93.72	8.1	70	7400	Мексика	Колебания в течение 1-2 ч с амплитудой ≥ 2 см
23.01.18	09:31:42	56.05	-149.07	7.9	25	3440	Аляска	Колебания в течение 2 ч с амплитудой 1.5 см
30.11.18	16:09:36	61.35	-149.96	7.0	46	3254	Аляска	Колебания в течение 20 мин. с амплитудой 0.5 см
20.12.18	17:02:02	54.95	164.85	7.3	16	460	Камчатка (Командоры)	Косейсмический скачок повышения уровня на 3.2 см

Исходные данные и методика обработки

В скважине ЮЗ-5 (53.17° с. ш., 158.41° в. д., открытый интервал 310-800 м, водовмещающие породы представлены сланцами и алевролитами, уровень на глубине 1.5 м, вода пресная) и в скважине Е-1 (53.26° с. ш., 158.48° в. д., открытый интервал 625-647 м, туфы, уровень на глубине 27 м, вода слабоминерализованная с газом метаново-азотного состава) в течение 1997-2018 гг. проводились измерения уровня воды и атмосферного давления с периодичностью 5 минут с использованием оборудования Кедр ДМ (ООО Полином, г. Хабаровск) [8]. Обеспечивалась точность

регистрации вариаций уровня воды ± 0.1 см, атмосферного давления ± 0.1 гПа. В [1-7] представлены данные о строении скважин, упругих и фильтрационных свойствах водовмещающих пород, закономерностях гидрогеодинамического режима и описание зарегистрированных гидрогеодинамических предвестников, косейсмических скачков и ГГСВ при сильных местных и телесейсмических землетрясениях 1997-2016 гг.

В течение сентября 2017 г. – мая 2019 гг. в скважине ЮЗ-5 проводилась регистрация давления на глубине 5.6 м с частотой 10 и 40 Гц с использованием оборудования фирм Keller, Швейцария (датчик давления PAA 36XW) и Cambell, США (регистратор CR6), предоставленных Геологической службой Израиля. С использованием этого оборудования были получены высокочастотные записи ГГСВ при трех телесейсмических землетрясениях с $M_w = 7.0-8.1$, произошедших в районах Аляски и Мексики (табл.).

В 2018 г. в скважине ЮЗ-5 был установлен комплект аппаратуры производства фирмы Keller, Швейцария (датчик 36XiW CTD, регистратор GSM2) для измерения давления подземной воды на глубине 8 м ниже уровня. С использованием этого оборудования получены непрерывные записи давления с периодичностью 1 мин. с октября 2018 г. по август 2019 г. В записях давления были зарегистрированы ГГСВ при местных землетрясениях с $M_w > 4$ и при землетрясениях 30 ноября и 20 декабря 2018 г. (табл.).

Землетрясение 17 июля 2017 г. (Ближне-Алеутское) (табл.) произошло в области сочленения Тихоокеанской и Северо-Американской литосферных плит. Описание сеймотектонических условий в районе очага землетрясения и данные о развитии сейсмичности приводятся в [10]. Землетрясение вызвало сотрясения с интенсивностью $I = 5-6$ баллов по шкале MSK-64 на о. Беринга и незначительную волну цунами на о-вах Ближних. В районе г. Петропавловска-Камчатского и окрестностей интенсивность сотрясений составила $I = 2-3$ балла. В скважине ЮЗ-5, расположенной на эпицентральной дистанции $d_e = 750$ км, был зарегистрирован косейсмический скачок повышения уровня воды с амплитудой $\Delta h = 3.8$ см (рис. 1а) в течение 5-минутного интервала времени, включающего вступление сейсмических волн на ближайшей (~ 20 км) с/ст. Петропавловск (PET).

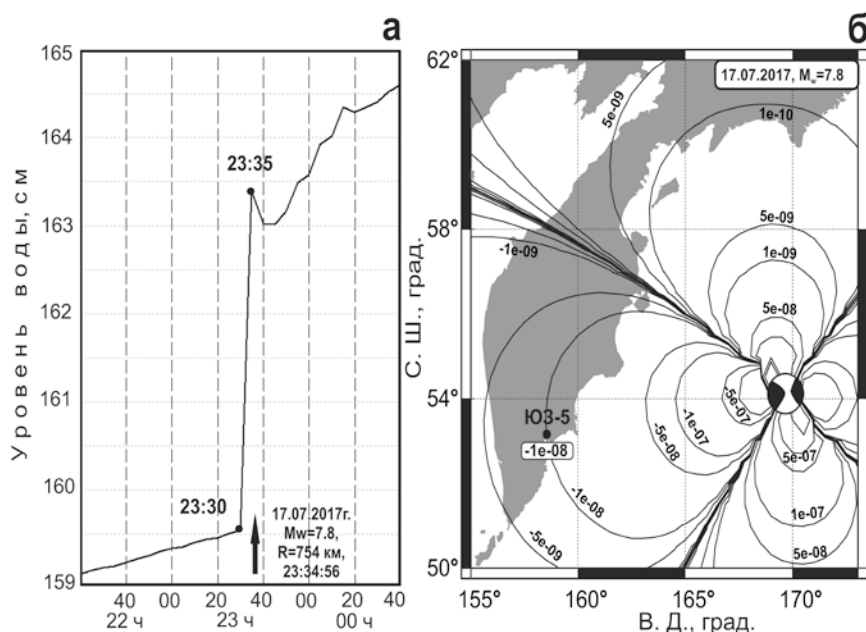


Рис. 1. (а) Косейсмическое повышение уровня воды в скв. ЮЗ-5 в результате землетрясения 17 июля 2017 г. (момент землетрясения показан стрелкой с указанием времени вступления сейсмических волн на с/ст. PET). (б) Горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации на глубине 500 м по модели дислокационного источника с параметрами механизма очага СМТ землетрясения 17 июля 2017 г. (<http://www.globalcmt.org/>) с указанием величины деформации в районе скв. ЮЗ-5 (показана черным кружком).

В [1, 9] приводится зависимость $M_w \geq 0.004R + 5.6$, описывающая соотношение между величинами магнитуд ($M_w \geq 6.0$) и эпицентрными расстояниями ($d_e \leq 350$ км) землетрясений, ранее сопровождающихся косейсмическими скачками уровня воды в скважине ЮЗ-5 с амплитудами 0.2-12 см. При землетрясении 17 июля 2017 г. косейсмический скачок проявился на эпицентральной дистанции $d_e = 750$ км, которое примерно в два раза превышает эпицентрные расстояния других землетрясений, сопровождавшихся косейсмическими скачками уровня воды в этой скважине.

С использованием зависимости $D_1 = -\Delta h/A_v$, где $A_v = 0.161 \text{ см}/10^{-9}$ – величина чувствительности уровня воды в скважине ЮЗ-5 по отношению к приливной объемной деформации в диапазоне суточных и полусуточных приливных волн, а Δh – амплитуда скачка в см [9], получена оценка величины объемной косейсмической деформации водовмещающих пород $D_1 = -2.4 \cdot 10^{-8}$. По

направлению изменения уровня воды (повышение) (рис. 1а) характер деформации водовмещающих пород соответствовал объемному сжатию.

С использованием данных о механизме очага Ближне-Алеутского землетрясения (<http://www.globalcmt.org/>) построено горизонтальное распределение объемной косейсмической деформации по модели дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве [12] на глубине 500 м, соответствующей средней глубине открытой части ствола скважины (рис. 1б). Полученная величина косейсмической деформации сжатия в районе скважины $D_2 = -1 \cdot 10^{-8}$ (рис. 1б) согласуется в пределах одного порядка с амплитудой D_1 и характером объемной деформации (сжатие) по данным равномерных наблюдений.

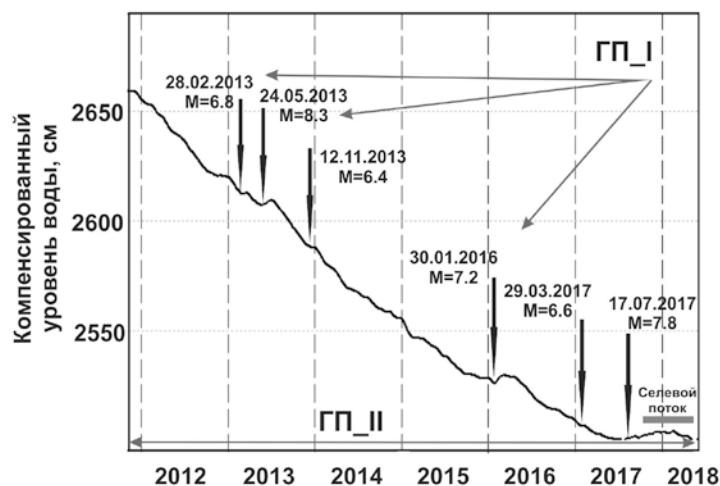


Рис. 2. Понижение уровня воды в скв. Е-1 в 2012-2017 гг., соответствующее гидрогеодинамическому предвестнику ГП_II. На фоне тренда понижения уровня выделяются менее продолжительные его понижения, вызванные подготовкой землетрясений 28.02 и 24.05.2013 г. и 30.01.2016 г., соответствующие гидрогеодинамическому предвестнику ГП_I [6].

В режиме скважины Е-1 проявляются тренды понижения и повышения уровня воды продолжительностью 3-6 лет с амплитудами от первых десятков см до 1.5 м со средней скоростью ≥ 0.1 см/сут. В

[6] тренды понижения уровня (давления) в 1991-1997 гг. и в 2012-2017 гг. были выделены в гидрогеодинамический предвестник ГП_II (рис. 2), т. к. они предшествовали и сопровождали группы сильных землетрясений на прилегающем участке Камчатской сейсмофокальной зоны: шесть событий с $M_w = 6.9-7.8$ на эпицентральных расстояниях до 300 км в первом случае [3, 5] и более 20-ти землетрясений с максимальными магнитудами $M_w = 6.8-8.3$ на эпицентральных расстояниях до 350 км во втором случае [1]. На фоне таких трендов выделяются менее продолжительные (первые десятки суток) понижения уровня воды с повышенной скоростью, вызванные подготовкой землетрясений с $M_w \geq 5.0-6.0$ на эпицентральных расстояниях d_e до 350 км. Такие вариации уровня воды были выделены в гидрогеодинамический предвестник ГП_I [6].

Мы полагаем, что понижение уровня в 2012-2017 гг. (рис. 2) отражало геодинамическую обстановку роста напряженного состояния среды в районах Камчатской островной дуги и ее сочленения с Алеутской островной дугой, предшествующее усилению сейсмической активности 2013-2016 гг. и возникновению Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017 г. с $M_w = 7.8$.

Сильные телесейсмические землетрясения 2017-2018 гг. Землетрясение 9 сентября 2017 г. ($M_w = 8.2$, $d_e = 7400$ км) в районе Мексики и два землетрясения на Аляске: 23 января 2018 г. ($M_w = 7.9$, $d_e = 3440$ км) и 30 ноября 2018 г. ($M_w = 7.0$, $d_e = 3254$ км) (табл.) сопровождалось ГГСВ в изменениях уровня (давления) воды в скважине Ю3-5, зарегистрированных тремя комплектами оборудования (рис. 3, 4).

На рис. 3 приводятся данные 5-минутной регистрации уровня воды во время прохождения сейсмических волн от землетрясения 9 сентября 2017 г., полученные Кедр ДМ, совместно с записями давления на глубине 5.6 м с частотой 10 Гц и записью смещений поверхности земли на канале ВНЗ на с/ст. РЕТ.

На рис. 4 представлены 5-минутная запись уровня воды во время землетрясения 23 января 2018 г., полученная Кедр ДМ, и 1-минутная запись давления на глубине 9 м (датчик 36XiW STD) во время землетрясения 30 ноября 2018 г. в сопоставлении с высокочастотными (10 Гц) записями давления на глубине 5.6 м (датчик РАА 36XW) и вертикальными смещениями поверхности земли на с/ст. РЕТ для обоих землетрясений. В 10-герцовых записях давления подземной воды (рис. 3, 4, табл.), четко выделяются вступления S и L-волн, идентичные сейсмическим записям.

В случае землетрясения 9 сентября 2017 г. (рис. 3) продолжительность колебаний давления составляла 1.5 ч при максимальной амплитуде 3 гПа, что эквивалентно 3 см водяного столба. По данным 5-минутных измерений уровня воды также диагностируется наличие ГГСВ I типа (вынужденные и свободные колебания) [7] продолжительностью не менее одного часа с

максимальной зарегистрированной амплитудой в 2 см, что в 1.5 раза меньше, по сравнению с зарегистрированными вариациями давления подземной воды.

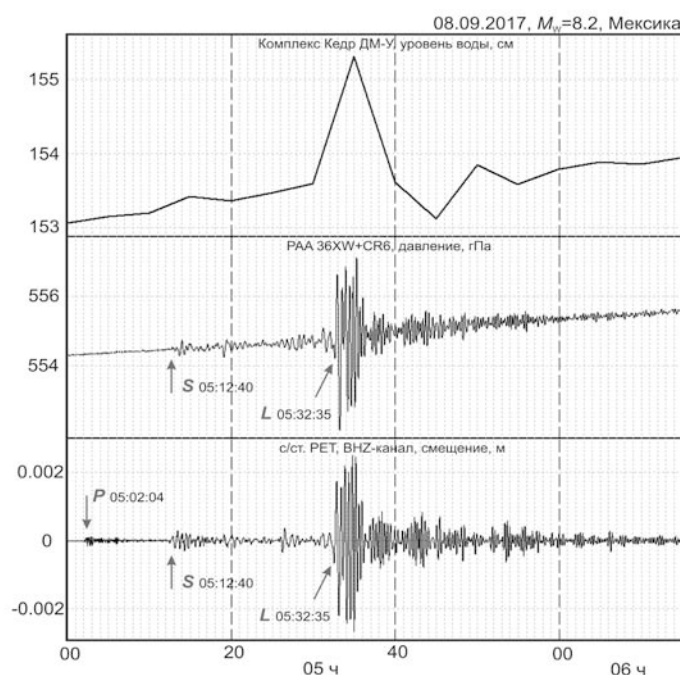


Рис. 3. Вариации уровня воды с периодичностью измерений 5 мин (Кедр ДМ) и давления подземных вод на глубине 5.6 м с частотой регистрации 10 Гц (датчик PAA 36XW) в скв. ЮЗ-5 при землетрясении 9 сентября 2017 г., $M_w = 8.2$, Мексика (табл.) в сопоставлении с записью смещений на канале ВНЗ, с/ст. РЕТ, датчик STS-1, 20 Гц.

Приведенные примеры демонстрируют возможность выделения по данным 5-минутной регистрации уровня воды ГГСВ I типа (вынужденные и свободные колебания) и II типа (колебания с кратковременным остаточным повышением) и получать приблизительные оценки их амплитуд, продолжительности и характера вариаций.

Предварительные результаты обработки данных наблюдений за гидрогеодинамическими параметрами в скважине ЮЗ-5, полученные тремя комплектами аппаратуры, показывают их

идентичность в части выделения высокочастотных ГГСВ, а также низкочастотного тренда, барометрического и приливного откликов в изменениях уровня (давления) подземной воды.

Землетрясение 20 декабря 2018 г. (Углового поднятия), $M_w = 7.3$, $d_e = 460$ км произошло на крайнем северо-западе Тихоокеанской литосферной плиты в районе сочленения Камчатского и Алеутского (Командорского) желобов. Его эпицентральная область пересекает небольшое Угловое поднятие, возвышающееся на океанической стороне Камчатского и Алеутского желобов в районе их сочленения. Максимальная интенсивность сотрясений $I = 6$ баллов по шкале MSK-64 зафиксирована в пос. Никольское на о. Беринга. В Петропавловске-Камчатском интенсивность сотрясений составила $I = 3-4$ балла [11].

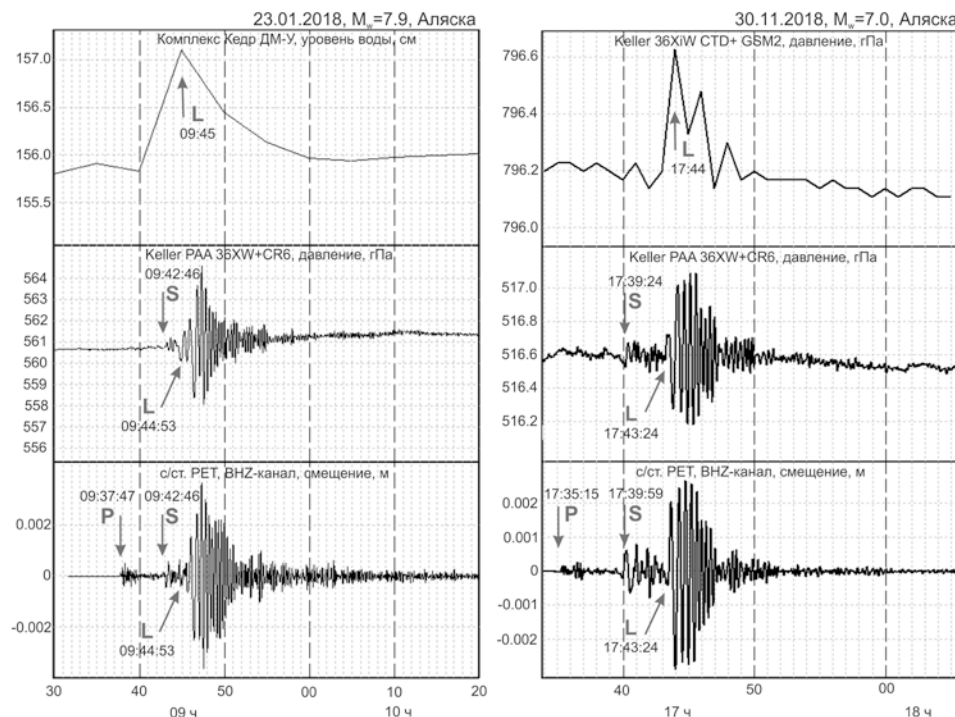


Рис. 4. Вариации уровня и давления подземных вод в скв. ЮЗ-5 при прохождении сейсмических волн при землетрясениях 23 января 2018 г., $M_w = 7.9$ и 30 ноября 2018 г., $M_w = 7.0$ (табл.) в сопоставлении с записями смещений на канале ВНЗ на с/ст. РЕТ (датчик STS-1, 20 Гц).

В скважине ЮЗ-5, расположенной на эпицентральном расстоянии $d_e = 460$ км, по 1-минутным измерениям наблюдался скачок повышения давления воды с амплитудой $\Delta h = 3.2$ см в течение 1-

минутного интервала времени, включающего вступление сейсмических волн на с/ст. РЕТ. Полученная оценка объемной косейсмической деформации $D_1 \approx -20 \cdot 10^{-9}$ значительно превышает

теоретическую оценку $D_2 = -2.5 \cdot 10^{-9}$ по [12], но согласуется с ней по характеру деформации (сжатие). Такое отличие величины косейсмической деформации по уровнемерным данным от теоретической оценки, по-видимому, является следствием сильной зашумленности амплитуды косейсмического скачка осцилляциями давления при вступлении S-волн.

Заключение

Развитие скважинных гидрогеодинамических исследований определяется внедрением высокотехнологичных комплексов специализированного оборудования, обеспечивающих надежную диагностику сигналов сейсмичности в изменениях параметров подземных вод для их последующего использования в задачах оценки вариаций напряженно-деформированного состояния геологической среды и прогнозирования сильных землетрясений.

Продемонстрированы первые результаты очередного этапа модернизации системы гидрогеодинамических наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН, дано детальное описание высокочастотных эффектов в изменениях уровня (давления) подземной воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясениях 2017-2018 гг. в сравнении с данными, полученными ранее используемой системой наблюдений Кедр ДМ. Получено удовлетворительное соответствие данных, зарегистрированных различными комплектами оборудования, что позволяет рассматривать многолетний ряд наблюдений в качестве непрерывного и однородного в диапазоне частот < 0.002 Гц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00337.

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 863–880.
2. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
3. Копылова Г.Н. Оценка информативности уровнемерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56–68.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г., $M=9.3$ // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39–48.
5. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.
6. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20.
7. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Касимова В.А. Эффекты сильных землетрясений, $M_w=6.8-9.1$, в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1-7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 276–280.
8. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г. Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4. Т. 52. С. 43–56.
9. 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.
10. Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с $M_w=7.8$. I. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 4. С. 48–71.
11. Чебров Д.В., Ландер А.В., Кугаенко Ю.А. и др. Землетрясение Углового Поднятия и условия тектонического растяжения в северо-западном углу Тихоокеанской плиты // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Седьмой научно-техн. конф. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. (этот сборник).
12. 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.
13. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. 225 p.