

УДК 556.3+550:34

СЕЙСМОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ТРИГГЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ (НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИН ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОГО ПОЛИГОНА, ПОЛУОСТРОВОВ КАМЧАТКА)

© 2023 г. Г. Н. Копылова¹, *, С. В. Болдина¹, **

¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН”, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

*E-mail: gala@emsd.ru

**E-mail: boldina@emsd.ru

Поступила в редакцию 11.10.2022 г.

После доработки 03.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

По данным многолетних наблюдений на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона, полуостров Камчатка, рассматриваются проявления трех главных видов сейсмогидрогеологических эффектов — гидрогеологических предвестников, косейсмических скачков давления и постсейсмических эффектов вибрационного воздействия сейсмических волн в изменениях давления и химического состава подземных вод, в зависимости от параметров землетрясений (магнитуда, эпицентрального расстояние, интенсивность сейсмического воздействия в районах наблюдений). Представлены данные о землетрясениях, которым предшествовали гидрогеологические предвестники в нескольких ($n = 2-4$) скважинах. Обсуждается возможность использования гидрогеологических предвестников для прогнозирования сильных землетрясений на Камчатке и результаты эксперимента по их применению в реальном времени путем подготовки еженедельных заключений по текущим данным наблюдений для Камчатского филиала Российского экспертного совета. На примере данных равномерных наблюдений в скважине ЮЗ-5 рассмотрены косейсмические скачки давления подземных вод при образовании разрывов в очагах местных землетрясений с $M_w > 6.0$ и четыре типа эффектов вибрационного воздействия сейсмических волн при местных и удаленных землетрясениях с магнитудами $M_w = 6.8-9.3$ на эпицентральных расстояниях от 80 до 14 600 км; показана зависимость проявления таких эффектов от параметров землетрясений и интенсивности сейсмического воздействия в районе скважины.

Ключевые слова: скважина, землетрясение, уровень воды, химический состав подземной воды, гидрогеологический предвестник, сейсмический прогноз.

DOI: 10.31857/S0002333723030079, **EDN:** JZZXQD

ВВЕДЕНИЕ

В течение десятилетий в науках о Земле обсуждаются вопросы воздействия землетрясений на подземные воды по материалам наблюдений на скважинах и источниках для оценки изменчивости давления, разгрузки, температурного и гидрогеохимического режима подземных вод в зависимости от параметров сейсмических событий [Wakita, 1995; Reddy et al., 2011; Юсупов и др., 2014; Skelton et al., 2014; 2019; Barberio et al., 2017; Boschetti et al., 2019; Chiodini et al., 2020; Martinelli et al., 2020; Tsunogai, Zhou et al., 2020; Kopylova, Boldina, 2020; 2021; Копылова и др., 2020; 2022]. Результаты таких исследований позволяют изучить пространственно-временные масштабы проявления сейсмогидрогеологических эффектов в

зависимости от параметров сейсмических событий, что способствует эффективному управлению водными ресурсами и экологическим состоянием окружающей среды в сейсмоактивных регионах. Кроме этого, разработка адекватных моделей реакции подземных вод на сейсмические воздействия способствует совершенствованию методов поиска и практического использования гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников при проведении сеймопрогностических исследований, а также изучению сейсмических эффектов в геофизических и геохимических полях при изменении обводненности и водопроницаемости горных пород.

Сейсмогидрогеологические эффекты, проявляющиеся до, во время и после моментов земле-

трясений, рассматриваются с учетом трех факторов воздействия землетрясения на подземные воды (1–3).

1. Предшествующие землетрясения процессы во флюидонасыщенной геологической среде, проявляющиеся в гидрогеологических (гидрогеодинамических и гидрогеохимических) предвестниках [Wang, Manga, 2010; 2021; Kopylova, Boldina, 2020]. В качестве гипотетических механизмов изменения давления, температуры, ионно-солевого и газового состава подземных вод в скважинах перед землетрясениями рассматриваются развитие трещинной дилатансии в водовмещающих породах, изменение фильтрационных свойств и гидравлической взаимосвязи между различными элементами гидрогеологических систем, контролируемых скважинами [Skelton et al., 2014; 2019; Kopylova, Boldina, 2021; и др.], либо квазиупругая деформация водовмещающих пород при возникновении предшествующих землетрясениям асейсмических движений в области очага [Копылова, Болдина, 2012].

2. Образование разрывов в очагах землетрясений сопровождается вариациями статического напряженного состояния водовмещающих пород и косейсмическими скачками повышения или понижения давления подземных вод в пьезометрических скважинах [Wakita, 1975; Копылова и др., 2010].

3. Излучение сейсмических волн из очага землетрясения и их распространение вызывает динамическую деформацию водовмещающих пород и разнообразные ко- и постсейсмические изменения давления, температуры, химического состава подземных вод и газов [Wang et al., 2001; Kitagawa et al., 2006; Копылова, Воропаев, 2006; Shi et al., 2013; 2015; Sun et al., 2015; Boschetti et al., 2019; Копылова, Болдина, 2020; Chiodini et al., 2020; Martinelli et al., 2020; и др.].

Указанные факторы сейсмического воздействия объясняют последовательность проявления во времени пред-, ко- и постсейсмических изменений в подземных водах по отношению к инструментальному времени землетрясения, но не могут объяснить широкого разнообразия наблюдаемых откликов параметров подземных вод даже в близко расположенных скважинах. Для объяснения разнообразия реакции давления и других физико-химических параметров подземных вод на сейсмические воздействия привлекаются сведения об особенностях локальных геолого-гидрогеологических условий, таких как фильтрационные и упругие свойства водовмещающих пород, уникальность гидрогеодинамических и газо-гидрогеохимических характеристик подземных вод в отдельных наблюдательных скважинах [Копылова Болдина, 2006; Болдина, Копылова, 2013; Kopylova, Boldina, 2020], степень связи режима подземных

вод с сейсмогенерирующими структурами и изменчивостью во времени полей напряжений и деформаций [Shi et al., 2013; 2015; Sun et al., 2015]. Вместе с тем, несмотря на длительную историю таких исследований, все еще не имеется исчерпывающего объяснения разнообразия, механизмов и процессов образования сейсмогидрогеологических эффектов, зафиксированных в изменениях уровней, расходов, температуры, газо- и гидрогеохимии подземных вод сейсмоактивных регионов до, в момент и после землетрясений [Wang, Manga, 2010; 2021].

Наименее изученными сейсмогидрогеологическими эффектами являются гидрогеологические предвестники, проявляющиеся на стадиях подготовки землетрясений, и с которыми связываются перспективы использования данных наблюдений на скважинах для прогнозирования времени сильных сейсмических событий. В мире получено сравнительно немного надежных данных о таких предвестниках, и этим обстоятельством объясняется пессимизм некоторой части научной общественности в отношении реальности их существования. Слабая изученность феномена гидрогеологических предвестников связана также с тем, что они проявляются на сравнительно небольших территориях в районах очагов будущих сильных землетрясений, включающих их ближние и промежуточные зоны [Kopylova, Boldina, 2020; Копылова и др., 2022], а сильные землетрясения в одном и том же месте случаются довольно редко.

Более надежно задокументированы в различных сейсмоактивных регионах сейсмогидрогеологические эффекты в изменениях уровней, давления, температуры, ионно-солевого и газового состава подземных вод в момент и после землетрясений (ниже ко- и постсейсмические эффекты). Для таких эффектов были предложены адекватные модели, описывающие их проявления в отдельных наблюдательных скважинах и источниках [Wang et al., 2001; Kitagawa et al., 2006; Shi et al., 2013; 2015; Sun et al., 2015; Болдина, Копылова, 2017; Kopylova, Boldina, 2021; и др.].

Описание гидрогеологических предвестников, их связи с параметрами последующих землетрясений и процессов их формирования в отдельных наблюдательных скважинах, основанное на концептуальных моделях, учитывающих особенности проявления гидрогеологических предвестников и комплекс локальных природно-технических условий [Kopylova, Boldina, 2021; Копылова и др., 2022], позволяет оценить значение гидрогеологического метода для сейсмического прогнозирования. Изучение ко- и постсейсмических эффектов в подземных водах расширяет представление о гидрогеодинамических и гидрогеохи-

мических процессах в водонасыщенной среде сейсмоактивных и асейсмичных регионов Земли.

Очевидно, что для изучения гидрогеологических предвестников и других сейсмогидрогеологических эффектов в ближней и промежуточной зонах очагов землетрясений необходимы детальные и длительные (многолетние) наблюдения за режимом скважин и родников. В настоящей работе рассматриваются результаты изучения сейсмогидрогеологических эффектов на территории Петропавловск-Камчатского полигона на полуострове Камчатка (ПКП), полученные Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (КФ ФИЦ ЕГС РАН) при проведении многолетних (1977 г. – настоящее время) наблюдений в пяти глубоких скважинах (табл. 1).

Полуостров Камчатка расположен в области сочленения Тихоокеанской океанической плиты с континентальными Евразийской и Северо-Американской плитами и является одним из наиболее сейсмоактивных районов Земли, где повторяемость сильнейших землетрясений с магнитудами порядка 8–9 составляет не более первых сотен лет, а сильные ощутимые землетрясения, вызывающие в континентальных районах сотрясения интенсивностью 5–6 и более баллов по 12-балльной шкале *MSK-64* [Медведев и др., 1965], происходят с периодичностью в первые годы [Чебров и др., 2011].

Основное внимание в работе уделяется проявлениям гидрогеологических предвестников в нескольких ($n \geq 2$) скважинах ПКП в зависимости от соотношения магнитуд и эпицентральных расстояний землетрясений и интенсивности их воздействия в районах наблюдений. В качестве параметров интенсивности сейсмического воздействия использовались балльность землетрясений по шкале *MSK-64*, плотность сейсмической энергии [Wang, 2007], амплитудно-частотные характеристики сейсмических волн по данным регистрации землетрясений на ближайшей к пунктам наблюдений сейсмостанции Петропавловск [Копылова, Болдина, 2020].

За время наблюдений в 1977–2021 гг. произошло всего семь землетрясений (табл. 2), которым предшествовали проявления гидрогеологических предвестников в нескольких скважинах, функционирующих в условиях естественного режима, не нарушенного каким-либо техногенными воздействиями. Все семь землетрясений относятся к наиболее сильным ($M_w = 6.5–7.8$) сейсмическим событиям в районе полуострова Камчатка, произошедшим на глубинах до 200 км. Это указывает на относительную редкость, а также на уникальность комплексного проявления гидрогеологических предвестников как природного явления, на-

блюдаемого в сейсмоактивном регионе на стадиях подготовки сильных землетрясений.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Авторы принимали непосредственное участие в наблюдениях на скважинах ПКП, в создании и развитии системы наблюдений за параметрами подземных вод [Копылова и др., 2016; Копылова, Болдина, 2019; Болдина и др., 2022], в разработке методов и программных средств обработки данных наблюдений [Копылова и др., 2003; 2009]. Описание скважин, методика наблюдений и способы обработки данных для выделения сейсмогидрогеологических эффектов приводятся в работах [Копылова и др., 1994; 2016; Хаткевич, Рябинин, 2004; Копылова, Болдина, 2019; Болдина и др., 2022].

Все наблюдательные скважины территории ПКП, в которых были зарегистрированы предвестники, являются глубокими, вскрывают скальные водовмещающие породы и характеризуются различными гидрогеологическими и гидрогеохимическими параметрами (табл. 1). Интервалы водоприемной части скважин составляют 310–2423 м при глубине 600–2500 м. Подробное описание конструкции скважин приводится в статьях [Копылова и др., 2016, Kopylova, Boldina, 2021; 2022].

В работах 2018–2022 гг. [Копылова и др., 2018; 2020; 2022; Копылова, Болдина, 2019; 2020; Kopylova, Boldina, 2020; 2021] представлены результаты обобщения данных о сейсмогидрогеологических эффектах, зарегистрированных в скважинах на полуострове Камчатка в связи с местными и телесеismicкими землетрясениями. В частности, в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 были выделены косейсмические скачки давления при местных землетрясениях и четыре типа эффектов вибрационного воздействия сейсмических волн (I–IV), для которых были установлены зависимости от параметров землетрясений. В данной статье используются как ранее опубликованные, так и уточненные, а также новые данные о таких эффектах. Более ранние публикации авторов по теме приводятся в списках литературы к указанным выше работам 2018–2022 гг. Все эти данные составляют основу материалов о сейсмогидрогеологических эффектах в скважинах ПКП, представленных в настоящей работе.

Гидрогеологические предвестники

Критерием выделения гидрогеологических предвестников (ГП) в изменениях уровня, ионного и газового состава подземных вод является аномальный характер поведения отдельных параметров относительно фоновых среднесуточных величин в нескольких ($n \geq 2$) скважинах перед землетрясениями.

Таблица 1. Характеристика наблюдательных скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона, полуостров Камчатка

Скважина	Координаты	Глубина, м Открытый интервал, м	Водовмещающие породы: возраст, состав	Дебит, q , л/с; Уровень воды, h , м	Температура воды, °С	Минерализация воды, г/л	Тип воды	Состав газа	Наблюдения: период, частота измерений
ГК-1	53.28° N 158.40° E	1261 400–1261	Q, N, K ₂ , туфы, алевро- литы, сланец	Самонзлив, $q = 0.1$	16	10	Cl–Na–Ca	Свободный газ, CH ₄ –N ₂	1986–1998, 3 сут
М-1	53.18° N 158.28° E	600 310–313 407–410 553–556	N, туфы	Самонзлив, $q = 1.5$	16	0.25	SO ₄ –Ca–Na	Растворенный газ, N ₂	
Г-1	53.05° N 158.66° E	2500 1710–1719 1750–1754 1790–1799 2415–2424	Q, K ₂ , диориты, сланец	Самонзлив, $q < 0.001$	10	12	Cl–Na	Свободный газ, CH ₄ –N ₂	
Е-1	53.26° N 158.48° E	665 625–645	N, туфы	Пьезометричес- кая скважина, $h = 28$	10	1.5	Cl–HCO ₃ –Na	Свободный газ, N ₂ –CH ₄	1987–2016: 03.01.1987– 08.07.1994, 1 сут; 29.01.1996–2016, 5–10 мин
ЮЗ-5	53.17° N 158.41° E	800 310–800	K ₂ , аргиллиты, сланец	Пьезометричес- кая скважина, $h = 1.5$	14	0.45	HCO ₃ –SO ₄ – Na–Ca	Растворенный газ, N ₂	09.09.1997–2016, 5–10 мин

Таблица 2. Землетрясения (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>, <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>), которым предшествовали гидро-геологические предвестники в двух — четырех наблюдательных скважинах

№	Дата, дд.мм.гггг	Координаты эпицентра землетрясения	Глубина H , км	Магнитуда M_w	Длина очага землетрясения ⁽¹⁾ L , км	Эпицентральное расстояние до скважины d_e , км	d_e/L	Удельная плотность сейсмической энергии e , Дж/м ³	Интенсивность сотрясений I по шкале MSK-64 ⁽²⁾	Скважины (длительность, T_1 /заблаговременность, T_2 ⁽⁵⁾ проявления предвестника, недели)
1	06.10.1987	52.86° N 160.23° E	33	6.5	37	130–134	3.5–3.7	0.1	5	ГК-1 (30/30), М-1 (4/4), Е-1 ⁽³⁾ (5/5)
2	02.03.1992	52.76° N 60.20° E	20	6.9	56	133–136	2.4	0.2	5–6	ГК-1 (39/39), М-1 (4/4), Е-1 ⁽³⁾ (9.5/9.5)
3	08.06.1993	51.20° N 157.80° E	40	7.5	103	220–233	2.1–2.3	0.3	5	ГК-1 (4/4), М-1 (4/21.5), Е-1 ⁽³⁾ (36/36)
4	13.11.1993	51.79° N 158.83° E	40	7.0	62	157–167	2.5–2.7	0.1–0.2	5–6	ГК-1 (4/4), М-1 (4/17), Е-1 ⁽³⁾ (12/12)
5	01.01.1996	53.88° N 159.44° E	0	6.6	41	95–108	2.3–2.6	0.1–0.2	4–5	ГК-1 (30/30), М-1 (4/13), Г-1 (21.5/21.5)
6	05.12.1997	54.64° N 162.55° E	10	7.8	139	305–314	2.2–2.3	0.3–0.4	5–6	ГК-1 (21.5/21.5), Г-1 (13/13), Е-1 ⁽³⁾ (3/3), ЮЗ-5 ⁽⁴⁾ (3/3)
7	30.01.2016	53.86° N 158.73° E	168	7.2	76	70–80	0.9–1.1	2.7–4.1	4	Е-1 (3/3), ЮЗ-5 (15/15), ГК-1 (24/24)

Примечания: (1) — максимальный линейный размер очага землетрясения по [Ризниченко, 1976].

(2) — Шкала Мелведа—Шпонхойера—Карника, также известная как 12-балльная шкала MSK-64, представляет собой шкалу макросейсмической интенсивности, используемую для оценки сотрясений земной поверхности на основе наблюдаемых эффектов в районе землетрясения; значения баллов даны для г. Перопавловска-Камчатского.

(3) — понижение уровня воды с амплитудами > 3 см с повышенной скоростью (см. табл. 3 в работе [Копылова, 2001]);

(4) — первое описание предвестника в изменениях уровня воды в течение трех недель дано в работе [Копылова, 2006];

(5) — длительность предвестника T_1 — продолжительность аномального изменения гидрогеологических параметров в скважине, заблаговременность предвестника T_2 — время от начала аномального изменения гидрогеологических параметров в скважине до землетрясения.

На рис. 1 приводятся примеры гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 в период Жупановского землетрясения 30 января 2016 г. с $M_w = 7.2$ (табл. 2, № 7).

В скважине Е-1 (табл. 1) ранее был выделен сигнал в форме понижения уровня воды с повышенной среднесуточной скоростью ≤ -0.06 см/сут до землетрясений с $M \geq 5.0$ на эпицентральных расстояниях $d_e \leq 350$ км в течение недель – первых месяцев [Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2012а]. Такой сигнал понижения уровня воды с пороговым значением -0.06 см/сут (гидрогеодинамический предвестник) проявлялся в 100% случаях перед землетрясениями с $M_w \geq 6.5$ и примерно в 50% случаев перед землетрясениями с $M = 5.0-6.4$ [Kopylova, Boldina, 2020]. С 2002 г. авторами проводится мониторинг этого вида гидрогеодинамического предвестника в режиме реального времени с составлением еженедельных заключений о его отсутствии либо проявлении для Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС) [Чебров и др., 2011]. Пример такого гидрогеодинамического предвестника перед Жупановским землетрясением, выделенным в реальном времени, представлен на рис. 1б.

В скважине ЮЗ-5 были выявлены два случая аномальных изменений уровня воды, которые проявлялись в значительных нарушениях его среднесуточного сезонного тренда: перед Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г. с $M_w = 7.8$ (табл. 2) в течение трех недель [Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2012] и перед Жупановским землетрясением (см. рис. 1а) в течение трех месяцев [Болдина, Копылова, 2017]. В случае Кроноцкого землетрясения уровень воды понижался с амплитудой 11 см. Перед Жупановским землетрясением уровень повышался с амплитудой около 30 см относительно среднесуточного сезонного тренда (см. рис. 1а В).

Гидрогеохимические предвестники и постсейсмические эффекты в изменениях ионно-солевого и газового состава воды из скважин ГК-1, М-1 и Г-1 в связи с землетрясениями 1987–1997 гг. представлены на рис. 2 [Kopylova, Boldina, 2021]. В скважине ГК-1 снижение концентрации ионов хлорида наблюдалось в течение одного-девяти месяцев перед семью землетрясениями (табл. 2, рис. 2а, левая диаграмма). Перед землетрясениями 01.01.1996 г., 05.12.1997 г. и 30.01.2016 г. понижение концентрации ионов хлора сменялось резкими повышением продолжительностью 4–5 мес. [Рябинин, Полетаев, 2021]. Увеличение дисперсии и изменение средних концентраций свободных газов наблюдалось в течение двух месяцев до землетрясения 02.03.1992 г. (рис. 2а, правая диаграмма) [Копылова и др., 1994].

В скважине М-1 концентрация бикарбонат-иона уменьшалась перед пятью землетрясениями (табл. 2, рис. 2б). В четырех случаях одновременно увеличивалась концентрация сульфат-иона, кальция и натрия. За месяц до землетрясения 02.03.1992 г. минерализация воды увеличилась на 25%, а гидрогеохимический тип воды изменился за счет увеличения концентрации сульфат-иона и снижения концентрации бикарбонат-иона [Копылова и др., 1994; 2022].

В скважине Г-1 перед землетрясениями 01.01.1996 г. и 05.12.1997 г. наблюдались аномальные изменения концентраций хлорид-иона, сульфат-иона, гидрокарбонат-иона, натрия и кальция (рис. 2в) [Хаткевич, Рябинин, 2004, Рябинин, Хаткевич, 2009].

На рис. 3 демонстрируется зависимость между проявлениями ГП в нескольких скважинах от параметров последующих землетрясений – величин их магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e (км) с учетом расчетной величины удельной плотности сейсмической энергии e , Дж/м³ в районе наблюдений [Wang, 2007; Wang, Manga, 2010; 2021; Копылова, Болдина, 2020; Kopylova, Boldina, 2020; 2021; Копылова и др., 2022]. В табл. 2 также представлены величины интенсивности сотрясений по 12-бальной шкале *MSK-64* в районе г. Петропавловска-Камчатского при всех семи рассматриваемых землетрясениях.

Из рис. 3 следует, что гидрогеологические предвестники в нескольких скважинах наблюдались перед землетрясениями с $M_w = 6.5-7.8$ на эпицентральных расстояниях $d_e = 80-300$ км. Эти землетрясения сопровождалась сотрясениями $I_{MSK-64} = 4-6$ баллов. Плотность сейсмической энергии e во время этих событий в районе скважин составляла от 0.1 до 4.5 Дж/м³. Гидрогеологические предвестники наблюдались в ближней и промежуточной зонах очагов землетрясений, для которых соотношение между эпицентральным расстоянием d_e , (км) и максимальным линейным размером очага землетрясения L (км) $d_e/L = 0.9-3.7$.

Длительности и заблаговременности проявления гидрогеологических предвестников перед землетрясениями в отдельных скважинах (T_1 и T_2) представлены в табл. 2. Они составляли от 1 до 9 мес. (рис. 4). Следует отметить отсутствие связи между длительностью предвестника T_1 с величинами магнитуд последующих землетрясений (рис. 4а). Вместе с тем, для скважины М-1 прослеживается тенденция увеличения заблаговременности гидрогеохимической аномалии T_2 в диапазоне 1–5 мес. при увеличении магнитуды последующего землетрясения (рис. 4б).

Гипотетические механизмы гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников в наблюдательных скважинах полуострова Камчат-

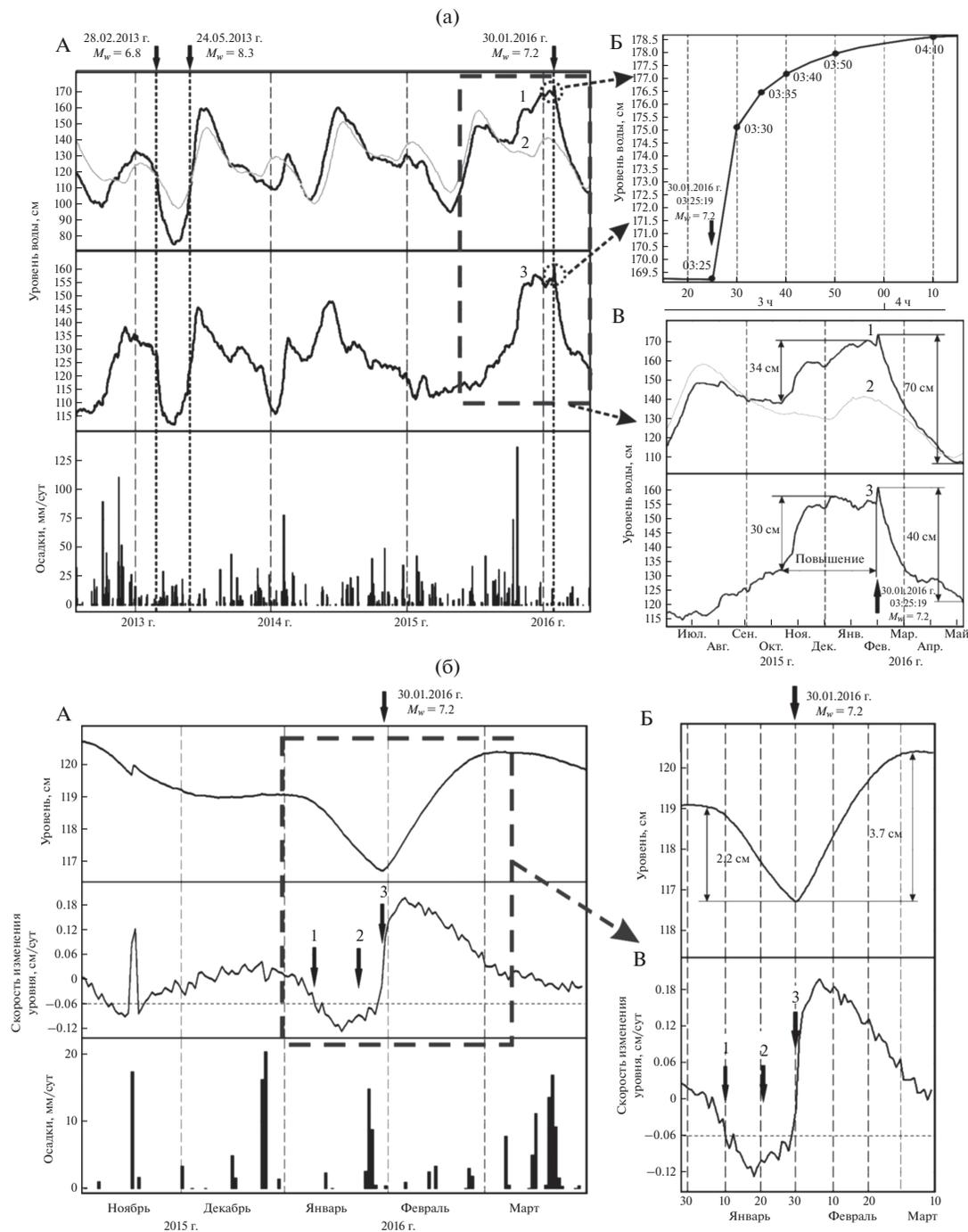


Рис. 1. Изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5 (а) и Е-1 (б) в связи с Жупановским землетрясением 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, ниже ЖЗ (табл. 2). Вариации уровня воды в скважине ЮЗ-5: А – изменения уровня воды в июле 2012–мае 2016 гг. в сопоставлении с осадками и землетрясениями с $M_w \geq 6.5$ (показаны стрелками): 1 – среднечасовые данные наблюдений с компенсированными баровариациями; 2 – сезонные вариации уровня воды; 3 – остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда; жирным пунктиром обозначен фрагмент графиков в период ЖЗ, см. рис. В); Б – косейсмическое повышение уровня воды после вступления сейсмических волн (03:25); В – предвестниковые и постсейсмические изменения уровня воды. Изменения уровня воды и его среднесуточной скорости в скв. Е-1: А – с ноября 2015 по март 2016 гг. в сопоставлении с атмосферными осадками; ЖЗ показано стрелкой. На графике среднесуточной скорости изменения уровня воды цифрами показаны: 1 – 10 января – начало проявления гидрогеодинамического предвестника; 2 – 21 января – дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС о возможности сильного землетрясения; 3 – 30 января – ЖЗ; пунктирной линией показано пороговое значение скорости понижения уровня воды -0.06 см/сут; жирной пунктирной линией выделен фрагмент изменений уровня воды, представленный на рисунках: Б – изменения уровня воды с 30 декабря 2015 по 10 марта 2016 гг., включающие гидрогеодинамический предвестник и постсейсмическое повышение; В – изменение среднесуточной скорости вариаций уровня воды в сопоставлении с ее пороговой величиной -0.06 см/сут (по работе [Болдина, Копылова, 2017]).

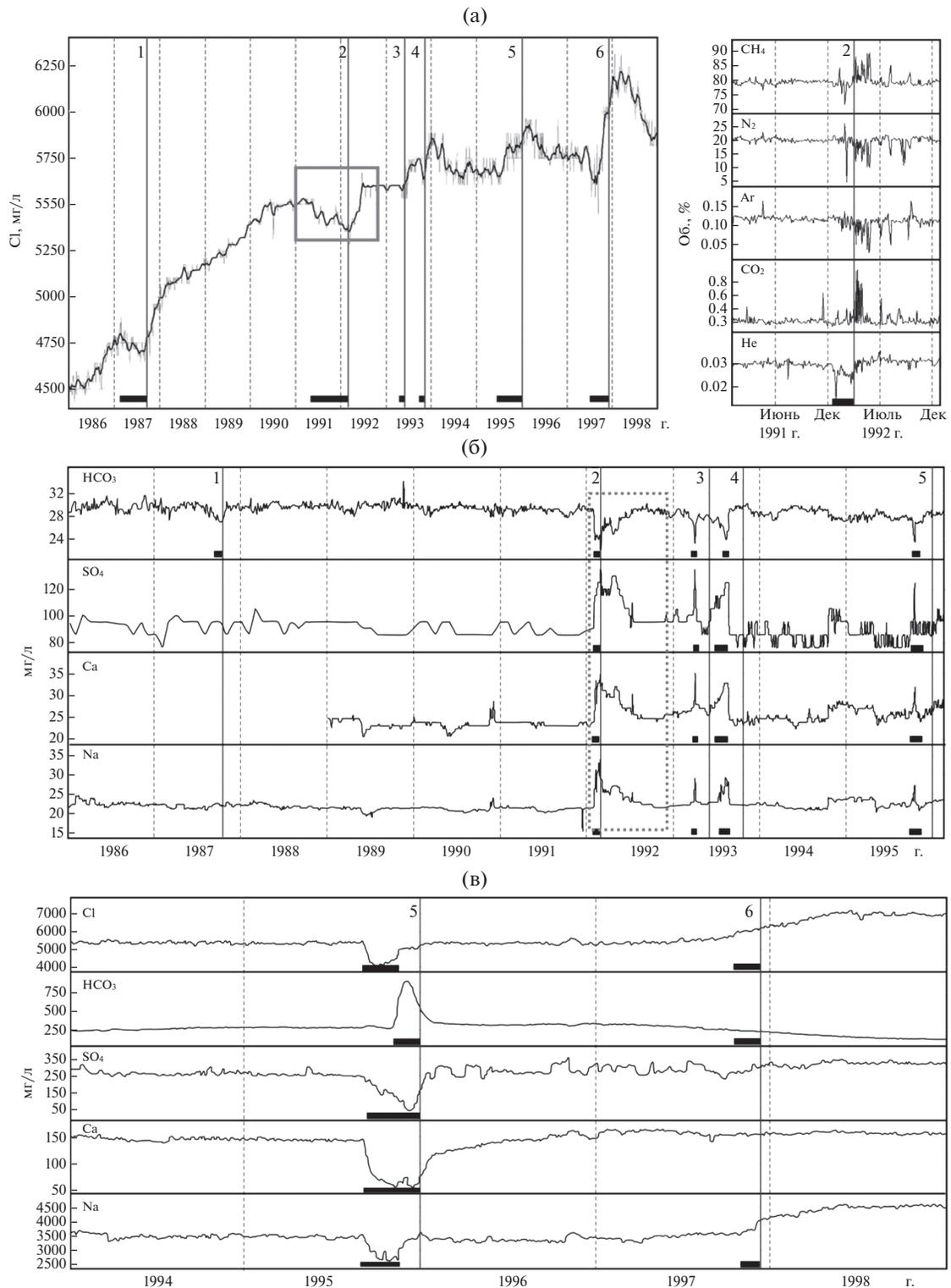


Рис. 2. Аномальные изменения перед землетрясениями (выделены жирными горизонтальными линиями) параметров ионного и газового состава подземных вод из скважин: (а) ГК-1, (б) М-1, (в) Г-1. Вертикальными линиями показаны землетрясения 1987–1997 гг., номера землетрясений соответствуют табл. 2. Серым прямоугольником выделены изменения концентрации Cl^- в воде скважины ГК-1, серым пунктирным прямоугольником выделены изменения HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и концентрации Na^+ в воде скважины М-1 в связи с землетрясением 2 марта 1992 г. (табл. 2) (по работам [Копылова, Boldina, 2020; 2021; Копылова и др., 2022]).

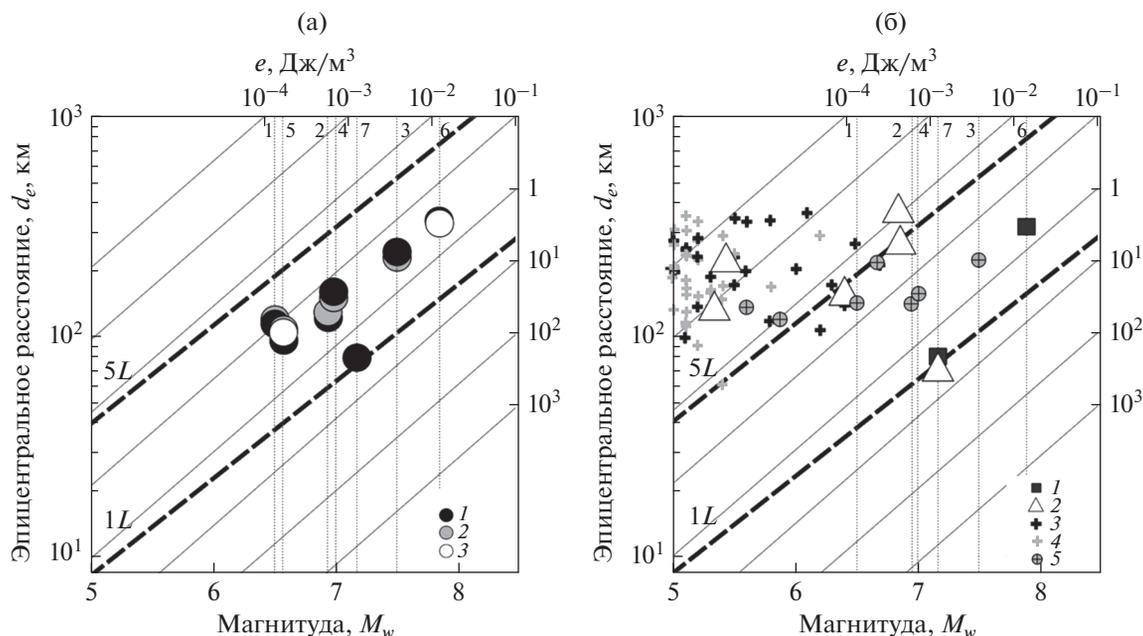


Рис. 3. Распределение гидрогеологических предвестников в наблюдательных скважинах в зависимости от магнитуды M_w , эпицентрального расстояния d_e землетрясений и удельной плотности сейсмической энергии e : (а) – гидрогеохимические предвестники в изменениях ионно-солевого и газового состава подземной воды из самоизливающихся скважин: 1 – ГК-1; 2 – М-1; 3 – Г-1; (б) – гидрогеодинамические предвестники в изменениях уровня воды в пьезометрических скважинах: 1 – ЮЗ-5; 2–5 – Е-1: 2 – предвестники выделены в реальном времени с выдачей заключения о возможном землетрясении для КФ РЭС, 3 – предвестники перед землетрясениями с $M \geq 5$, $d_e \leq 350$ км выделены ретроспективно, 4 – предвестники перед землетрясениями с $M \geq 5$, $d_e \leq 350$ км не проявлялись; 5 – предвестники перед землетрясениями 1987–1996 гг. выделены ретроспективно [Копылова, 2001]. Тонкими вертикальными пунктирными линиями показаны землетрясения 1–7 (табл. 2). Линии 1L, 5L показывают по вертикальной оси один и пять максимальных линейных размеров очага землетрясения по работе [Ризниченко, 1976] в зависимости от величины магнитуды.

ка рассматривались в работах [Копылова, Болдина, 2012; 2020; Kopylova, Boldina, 2020; 2021; Копылова и др., 2022]. В частности, для объяснения аномальных изменений уровня воды в скважине ЮЗ-5 перед Кроноцким и Жупановским землетрясениями привлекался механизм квазиупругого деформирования водовмещающих пород при развитии предшествующих землетрясениям асейсмических движений в области очагов. С использованием величины приливной чувствительности уровня воды по отношению к теоретической объемной деформации на глубине 500 м (середины открытой части ствола скважины) $A_v = 0.161 \text{ см}/10^{-9}$ [Копылова и др., 2010] были оценены амплитуды деформации объемного расширения водовмещающих пород при понижении уровня воды перед Кроноцким землетрясением в -0.7×10^{-7} ($-11 \text{ см}/0.161 \text{ см}/10^{-9}$) и объемного сжатия в 1.9×10^{-7} ($30 \text{ см}/0.161 \text{ см}/10^{-9}$) перед Жупановским землетрясением.

Единообразное проявление гидрогеодинамического предвестника в форме понижений уровня воды в скважине Е-1 с повышенной скоростью не находит объяснения в рамках представлений о квазиупругом деформировании водовмещающих

пород. В случае этой скважины более правдоподобным представляется механизм развития трещинной дилатансии на стадиях подготовки землетрясений, сопряженный с увеличением емкости водовмещающих пород и понижением гидростатического напора. С учетом присутствия газа метаново-азотного состава в подземной воде (табл. 1), можно также предполагать роль фазовых изменений в состоянии газа на стадиях подготовки землетрясений в сторону уменьшения объема свободного газа, поступающего в ствол скважины, увеличения плотности подземной воды и уменьшения высоты водной колонны. При этом, в результате сейсмических сотрясений, можно предполагать увеличение объема свободного газа в стволе скважины и рост высоты водной колонны (см. рис. 1б – повышение уровня воды с амплитудой 3.7 см в течение примерно 30 сут после Жупановского землетрясения).

Механизм образования гидрогеохимических предвестников в самоизливающихся скважинах рассмотрен в работах [Копылова, Болдина, 2021; Копылова, Болдина, 2022]. На примере землетрясения 02.03.1992 г. (№ 2 в табл. 2 и на рис. 2а, 2б) показано, что аномалии-предвестники в скважинах ГК-1 и М-1 образовались в результате изменения

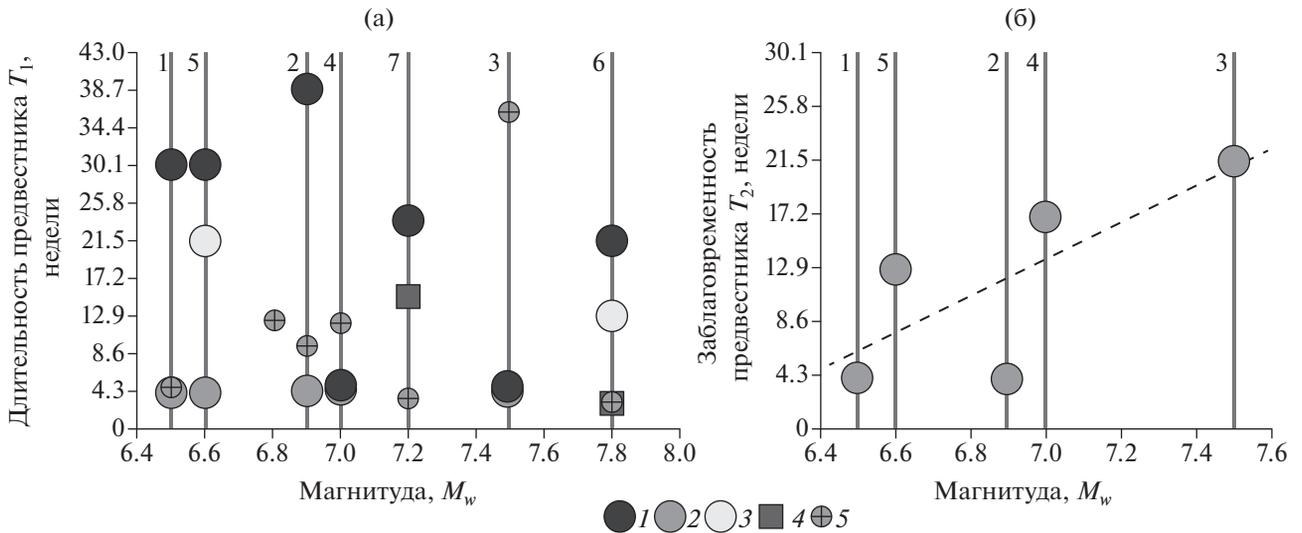


Рис. 4. (а) – Распределение длительности предвестника T_1 в наблюдательных скважинах: 1 – ГК-1; 2 – М-1; 3 – Г-1; 4 – ЮЗ-5; 5 – Е-1 в зависимости от величины магнитуды M_w землетрясений № 1–7 в табл. 2; землетрясения показаны серыми вертикальными линиями; (б) – распределение заблаговременности T_2 гидрогеохимического предвестника в скважине М-1 (рис. 2б) в зависимости от магнитуды M_w землетрясений № 1–5 (коэффициент линейной корреляции 0.74).

гидродинамических условий смешивания вод с различным химическим составом, присутствующих в водоносных системах обеих скважин. Наиболее вероятным триггером такого процесса являлось неравномерное развитие трещинной дилатансии в водовмещающих породах с различной проницаемостью, нарушение гидродинамических условий водообмена и изменение химического состава воды, изливающейся из скважин. Главными параметрами такого процесса, определяющими форму и продолжительность гидрогеохимических аномалий, являются время релаксации импульсов давления подземной воды при инициации дилатансионного процесса в водовмещающих породах и время движения смешанной воды аномального состава в водоносной системе и в стволе скважины.

Результаты анализа проявлений гидрогеологических предвестников в пяти скважинах ПКП также показывают, что все рассматриваемые наблюдательные скважины являются информативными для их обнаружения перед сильными местными землетрясениями при условии обеспечения их естественного режима, не нарушенного техногенными воздействиями. Повышенная чувствительность давления подземной воды в скважине Е-1 к процессам подготовки землетрясений (рис. 3б), установленная по данным прецизионных уровнемерных наблюдений, по-видимому, обусловлена локальными гидрогеологическими условиями, включающими низкую пористость (5%) и водообильность (водопроницаемость $0.004 \text{ м}^2/\text{сут}$) водовмещающих пород и присутствие газа мета-

ново-азотного состава в подземной воде [Копылова и др., 2012].

Исследование проявлений гидрогеологических предвестников на территории ПКП показывает, что оперативная диагностика аномальных изменений параметров подземных вод в рассмотренных наблюдательных скважинах по данным текущих наблюдений дает возможность их использования в комплексе с другими сейсмопрогностическими данными для средне-краткосрочного прогнозирования наиболее сильных землетрясений в Камчатском крае с упреждением в первые месяцы – сутки.

С 2002 г. авторами в сотрудничестве с Камчатским филиалом Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС) проводится эксперимент по использованию гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 для прогнозирования землетрясений в реальном времени путем составления еженедельных заключений о наличии/отсутствии гидрогеодинамических предвестников по текущим данным наблюдений [Чебров и др., 2011]. По заключениям КФ РЭС в 2002–2016 гг. были успешно спрогнозированы по уровнемерным данным место, магнитуда и время шести землетрясений с $M = 5.3–7.2$, из которых четыре события имели величины магнитуд $6.4–7.2$ (рис. 3б). Перед землетрясением 16 марта 2021 г., $M_w = 6.6$, $d_e = 350 \text{ км}$ в изменениях давления воды в скважине Е-1 гидрогеодинамический предвестник также был выявлен в реальном времени [Болдина и др., 2022].

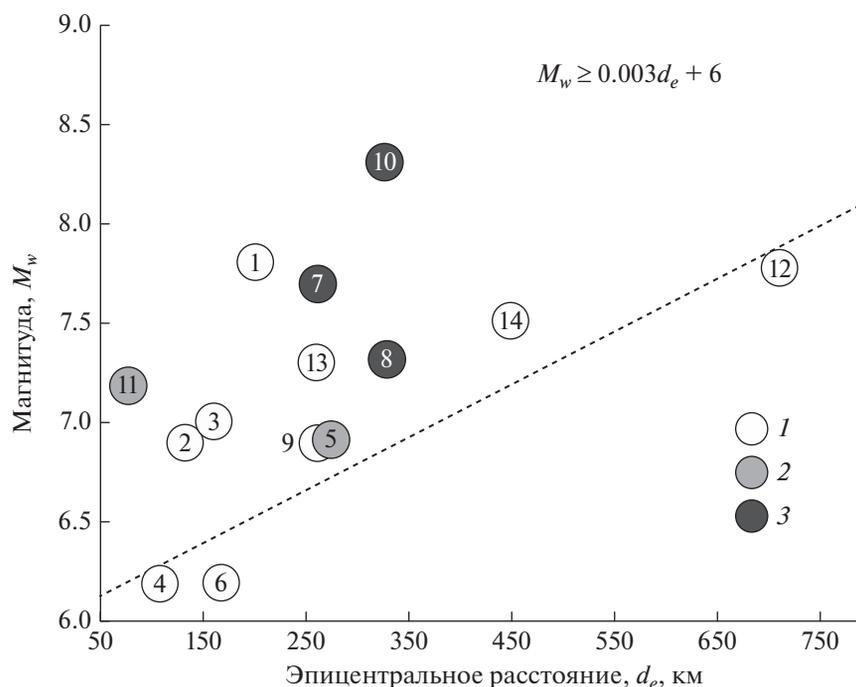


Рис. 5. Распределение косейсмических скачков уровня (давления) воды в скважине ЮЗ-5 в 1997–2020 гг. в зависимости от параметров землетрясений – соотношения величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e . 1–3 – глубина гипоцентров землетрясений: 1 – $H = 1–70$ км; 2 – $H = 70–300$ км; 3 – $H = 500–600$ км. Цифры в кружках – номера землетрясений из табл. 3.

Ко- и постсейсмические эффекты

Эффекты косейсмической деформации водовмещающих пород

Скачки повышения или понижения давления подземной воды при изменении статического напряженного состояния водовмещающих пород вследствие образования разрывов в очагах землетрясений неоднократно проявлялись в скважине ЮЗ-5. Описание 14-ти случаев их проявления с амплитудами от 0.2 до 12.0 см водяного столба, зарегистрированных в течение 5–12 мин после инструментального времени землетрясения в очаге, дано в работах [Копылова и др., 2010; Болдина, Копылова, 2016; 2017; Копылова, Болдина, 2019].

В табл. 3 приводятся данные о землетрясениях, при которых были зарегистрированы такие косейсмические скачки повышения или понижения давления в скважине ЮЗ-5. На рис. 5 представлено распределение косейсмических скачков давления в зависимости от параметров землетрясений – соотношения величин их магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e в км. В первом приближении, проявление косейсмических скачков давления описывается зависимостью $M_w \geq 0.003d_e + 6.0$ (линия, ограничивающая область землетрясений, сопровождающихся косейсмическими скачками уровня воды на рис. 5).

По косейсмическим скачкам давления подземной воды можно получать точечные оценки характера и величины объемной косейсмической деформации водовмещающих пород с амплитудами $\geq \text{ед.} \times 10^{-9}$ [Копылова и др., 2010]. Как правило, оцененные по амплитудам скачков давления и по их направлению величины и характер (сжатие или расширение) объемной косейсмической деформации на средней глубине вскрытой толщи водовмещающих пород 500 м соответствуют объемной косейсмической деформации в пределах одного порядка по модели дислокационного источника [Okada, 1985] при использовании параметров механизмов очагов соответствующих землетрясений (табл. 3).

Эффекты вибрационного воздействия сейсмических волн

Результаты исследования ко- и постсейсмических откликов давления воды в скважине ЮЗ-5 на прохождение сейсмических волн от 19 землетрясений с $M_w = 6.8–9.1$ на эпицентральных расстояниях $d_e = 80–14600$ км представлены в работе [Копылова, Болдина, 2020]. В ней по морфологическим особенностям и по продолжительности вариаций уровня воды были выделены четыре типа таких эффектов: колебания (I тип), наложение

Таблица 3. Данные о местных землетрясениях (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>, <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>), которые сопровождались косейсмическими скачками уровня воды в скважине ЮЗ-5

№	Гипоцентр				M_w	Эпицентральное расстояние, d_e , км/интенсивность сотрясений по шкале MSK-64	Амплитуда косейсмического скачка уровня/давления воды ^{***} , Δh , см	Объемная косейсмическая деформация в районе скважины ЮЗ-5, 10^{-9}		ссылка [†]
	дата дд.мм.гггг	время чч:мм	координаты, град					по модели дислокационного источника [Okada, 1985], D_2	по косейсмическим скачкам уровня, D_1 ^{****}	
			с.ш.	в.д.						
1	05.12.1997*	11:27	54.0**	162.3**	25	200**/5-6	-12.0	75	40	[Копылова и др., 2010 (с уточнением)]
2	01.06.1998	05:34	52.81	160.37	31	136/3-4	-1.0	6.3	1.0	
3	08.03.1999	12:26	51.93	159.72	7	162/5	-1.7	10.6	16.4	
4	20.12.2000	09:20	53.31	160.06	65	110/4	0.6	-3.8	-1.4	
5	16.06.2003	22:08	55.30	160.34	190	266/2-3	-0.3	1.9	0.6	
6	20.03.2004	08:53	53.74	160.76	31	167/4-5	0.25	-1.6	-0.5	
7	05.07.2008	02:12	53.82	153.53	610	253/3-4	0.3	-1.9	-3.4	****
8	24.11.2008	09:02	53.77	154.69	564	328/3	0.2	-1.2	-3.7	****
9	28.02.2013	14:06	50.67	157.77	61	260/4-5	0.6	-3.7	-1.5	[Болдина, Копылова, 2016]
10	24.05.2013	05:45	54.76	153.79	630	348/4	6.0	-37.3	-62.0	
11	30.01.2016*	03:25	53.85	159.04	180	80/5	7.3	-45	-46.0	[Болдина, Копылова, 2017]
12	17.07.2017	23:34	54.35	168.90	7	700/2-3	2.0	-12.4	-10	****
13	20.12.2018	17:02	54.95	164.85	17	260/3-4	≈3.2	≈-19.9	-1.8	****
14	25.03.2020	02:49	49.09	157.85	53	451/4-5	0.65	-4.0	-2.6	****

Примечания: * – землетрясения, перед которыми выделены аномальные изменения уровня воды; ** – координаты центра очаговой области по aftershock первым суток и соответствующее расстояние до скважины; *** – “+” – повышение уровня; “-” – понижение уровня; **** – $D_1 = -\Delta h/A_v$, где A_v – приливная чувствительность уровня воды $0.161 \text{ см}/10^{-9}$ [Копылова и др., 2010]; ***** – неопубликованные данные авторов; MSK-64 – 12-балльная шкала макросейсмической интенсивности Медведя–Шпонхойера–Карника [Медведев и др., 1965].

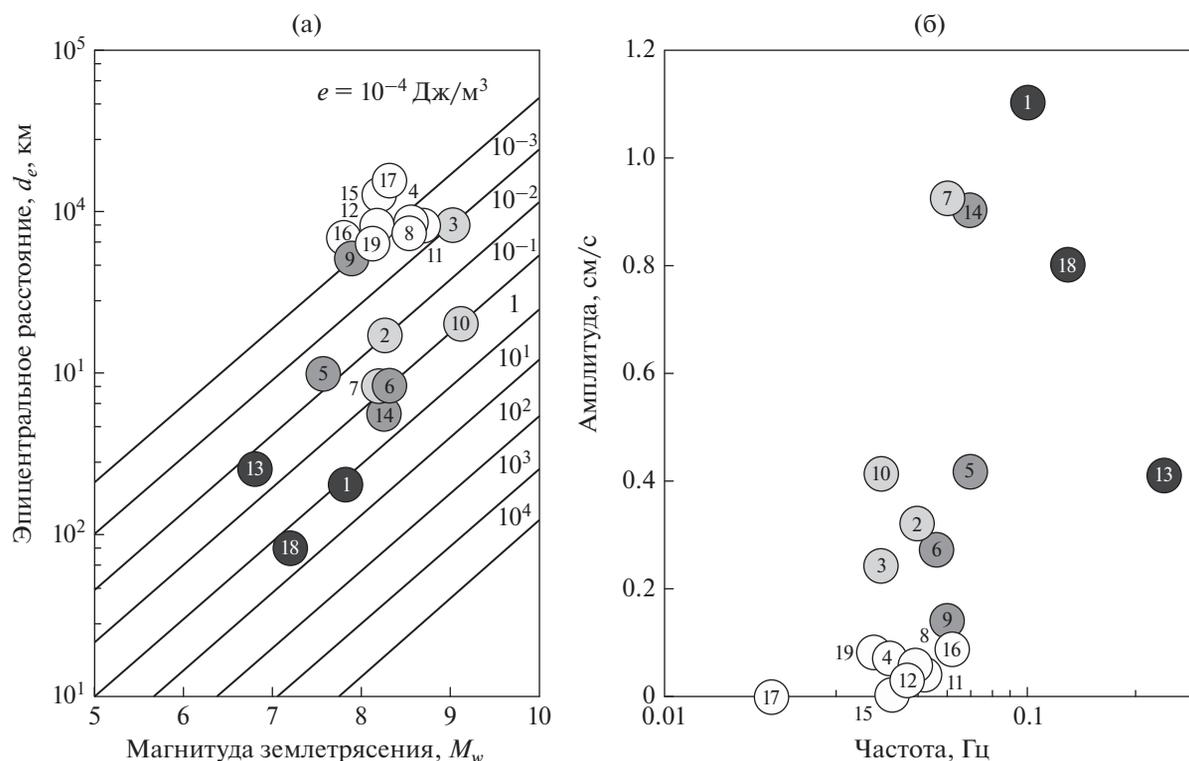


Рис. 6. Распределение четырех типов эффектов вибрационного воздействия сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 (тип I – белые кружки, тип II – серые, тип III – темно-серые, тип IV – черные) в зависимости: (а) от параметров землетрясений M_w и d_e , величины плотности сейсмической энергии e в волне и (б) от амплитудно-частотного состава максимальных фаз скорости сейсмических волн на канале ВНЗ, с/ст. РЕТ. Цифры в кружках – номера землетрясений из табл. 1, табл. 2 (в работе [Копылова, Болдина, 2020]).

на колебания кратковременных (до десятков часов) повышений уровня воды (II тип), кратковременные повышения уровня воды (III тип) и длительные (1.5–3 мес.) понижения уровня воды (IV тип).

Максимальная амплитуда колебаний уровня воды (типы I и II) определяется вариациями давления в системе “скважина–водовмещающая порода”, вызванными прохождением поверхностных сейсмических волн с периодами, соответствующими резонансной частоте скважины [Копылова, Болдина, 2007]. Повышение уровня в течение десятков минут-часов (типы II и III) после вступления сейсмических волн могут быть обусловлены увеличением давления при нарушении стационарных условий течения воды в окколоскважинном пространстве. Местные сильные землетрясения интенсивностью $I_{msk-64} \geq 5$ баллов сопровождались монотонными понижениями уровня воды в скважине с амплитудами 0.3–1 м (тип IV) вследствие увеличения проницаемости водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях и падения давления.

На рис. 6 представлены зависимости проявления выделенных типов вибрационных эффектов сейсмических волн I–IV от параметров землетря-

сений (рис. 6а) и амплитудно-частотного состава максимальных фаз скорости сейсмических волн на ближайшей сейсмостанции Петропавловск (РЕТ) (рис. 6б).

Таким образом, различные типы вибрационных эффектов сейсмических волн в изменениях уровня воды отражают совокупные изменения давления подземных вод при динамической деформации водовмещающих пород и сопутствующих фильтрационных процессах, обусловленных изменением свойств водовмещающих пород, главным образом, их проницаемости [Копылова, Болдина, 2007; Wang, Manga, 2010]. В качестве гипотетических механизмов изменения проницаемости при прохождении сейсмических волн ранее рассматривались развитие в водовмещающих породах трещинной дилатансии, дегазация подземной воды, декольматация трещинно-порового пространства, эффекты кумулятивного накопления межблоковых деформаций и др. На примере скважины ЮЗ-5 было обнаружено, что в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия и амплитудно-частотного состава сейсмических волн могут инициироваться и закономерно проявляться различные типы вариаций

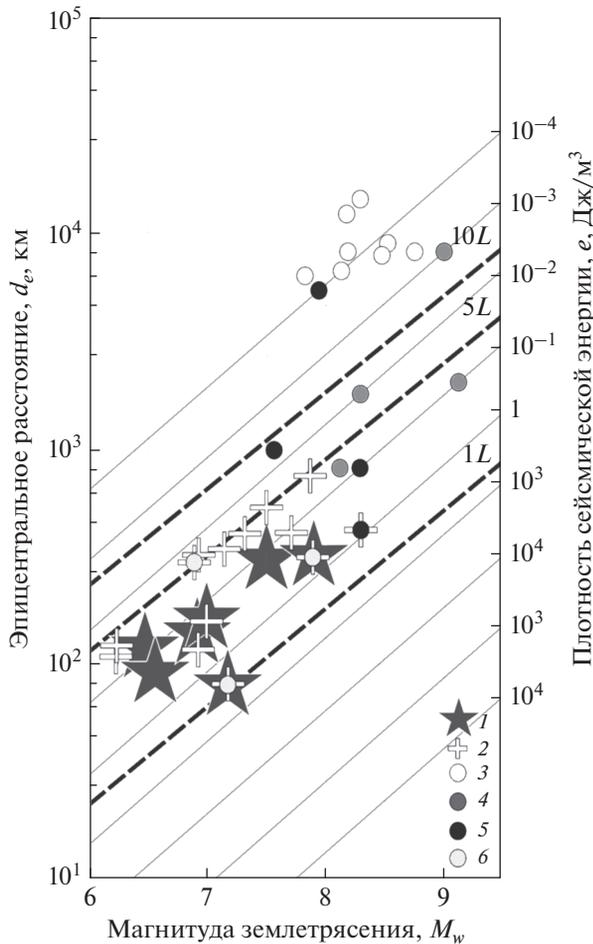


Рис. 7. Распределение проявлений гидрогеологических предвестников в нескольких ($n = 2-4$) скважинах ПКП (1); косейсмических скачков давления воды (2) и различных типов вибрационных эффектов сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 (3-6): 3 – тип I; 4 – тип II; 5 – тип III; 6 – тип IV, в зависимости от соотношения магнитуды M_w , эпицентрального расстояния d_e землетрясений и величины плотности сейсмической энергии e . 1L, 5L и 10L показывают один, пять и десять максимальных линейных размеров очага землетрясения [Ризниченко, 1976] в зависимости от величины магнитуды.

уровня воды, обусловленные возникновением и развитием специфических гидрогеодинамических процессов в системе “скважина–водоносная порода”. К таким процессам относятся гармонические вариации давления подземных вод на частотах в десятки Гц при прохождении поверхностных волн и их усиление на резонансной частоте скважины, импульсы локального увеличения напора в водоносных породах околоскважинного пространства, увеличение проницаемости водоносных пород при сей-

смических сотрясениях, сопровождающееся понижением давления подземных вод.

О СВЯЗИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СЕЙСМОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ С ПАРАМЕТРАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В работе рассмотрены три вида сейсмогеологических эффектов в изменениях режима наблюдательных скважин ПКП: 1) – гидрогеодинамические и гидрогеохимические предвестники отдельных землетрясений, проявляющихся в нескольких ($n \geq 2$) скважинах; 2) – косейсмические скачки давления, зарегистрированные при 14 местных землетрясениях; 3) – четыре типа вибрационных эффектов сейсмических волн в изменениях уровня воды при землетрясениях в широком диапазоне магнитуд и эпицентральных расстояний. На рис. 7 представлена диаграмма распределения таких видов сейсмогеологических эффектов в зависимости от параметров землетрясений и интенсивности сейсмического воздействия в районах наблюдений.

На Камчатке гидрогеологические предвестники наблюдались в трех самоизливающихся и двух пьезометрических скважинах в течение времени от одного до девяти месяцев перед семью землетрясениями с $M_w = 6.5-7.8$ на эпицентральных расстояниях $d_e = 80-300$ км (рис. 3, рис. 7, табл. 2). Эти землетрясения были наиболее мощными сейсмическими событиями за время наблюдений и сопровождались сотрясениями интенсивностью от четырех до шести баллов по шкале MSK-64. Плотность сейсмической энергии при этих событиях в районе скважин $e = 0.1-0.4$ Дж/м. Гидрогеологические предвестники были выделены в условиях ненарушенного (естественного) режима функционирования наблюдательных скважин и носили ярко выраженный аномальный характер. По отношению к инструментальному эпицентру землетрясений гидрогеологические предвестники наблюдались в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений ($d_e/L = 1-3.7$) (табл. 2, рис. 7).

Оперативная диагностика гидрогеологических аномалий по данным текущих наблюдений позволяет их использовать в комплексе с другими сейсмопрогностическими данными для среднесрочного прогнозирования сильных землетрясений в Камчатском крае [Корюлова, Boldina, 2020].

Результаты анализа проявлений ГП в пяти скважинах Петропавловск-Камчатского полигона также показывают, что все наблюдательные скважины являются информативными для обнаружения предвестников перед сильными землетрясениями при условии обеспечения их есте-

ственного режима, не нарушенного техногенными воздействиями.

На рис. 5 и рис. 7 в координатах магнитуда M_w – эпицентрального расстояния d_e приводится распределение Камчатских землетрясений с $M_w \geq 6.2$, сопровождающихся косейсмическим скачками уровня (давления) воды в скважине ЮЗ-5 (табл. 3). Косейсмические скачки (табл. 3, рис. 7, белые кресты) также как и гидрогеологические предвестники (табл. 2, рис. 7, серые звезды) наблюдались, в основном, в ближней и средней зонах очагов землетрясений ($d_e/L = 1-5$).

Особенностью района исследований является то, что сильные землетрясения, сопровождающиеся косейсмическим скачками уровня (давления) воды, происходили, в основном, в пределах Камчатской сейсмофокальной зоны на эпицентральных расстояниях до 450 км от скважины (табл. 3, № 1–11, 13). Максимальное эпицентрального расстояния землетрясения, сопровождавшееся косейсмическим скачком давления в скважине ЮЗ-5, отмечено для Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017 г., произошедшего в Командорском сегменте Алеутской островной дуги [Чебров и др., 2019]. Его эпицентрального расстояния $d_e = 700$ км (табл. 3, № 12) превышало в 1.5 и более раз расстояния других землетрясений, сопровождавшихся косейсмическими скачками уровня воды в этой скважине.

Из рис. 6 и рис. 7 следует, что распределение четырех типов эффектов вибрационного воздействия сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 зависит от параметров землетрясений – соотношения магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e землетрясений, а также величин удельной плотности сейсмической энергии e и амплитудно-частотных характеристик сейсмических волн (рис. 6б). Такая совокупность количественных характеристик землетрясения может рассматриваться в качестве комплексного показателя интенсивности воздействия сейсмических волн, излучаемых из очага, на наблюдательную скважину. При возникновении сильного землетрясения на расстояниях до тысяч км от скважины, с использованием величин M_w , d_e , e и др. можно оценивать характер развития вариаций уровня воды и сопряженных гидрогеодинамических процессов в системе “скважина ЮЗ-5 – водовмещающие породы”, а также в других скважинах-аналогах, расширяя тем самым возможности метода уровневых наблюдений в системе геофизического мониторинга сейсмоактивных районов.

ВЫВОДЫ

1. Получены оценки параметров землетрясений и интенсивности их воздействия при прояв-

лении гидрогеологических предвестников в нескольких ($n = 2-4$) скважинах Петропавловск-Камчатского полигона: $M_w = 6.5-7.8$, $d_e = 80-300$ км, $e \geq 0.1$ Дж/м³, $I_{MSK-64} \geq 4-6$ баллов.

Время и заблаговременность проявления ГП перед такими землетрясениями составляли от 1 до 9 мес.

Скважины, в которых проявлялись ГП, расположены в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений, для которых величины $d_e/L = 1-3.5$, где d_e – эпицентрального расстояния до скважины в км и L – максимальный линейный размер очага землетрясения, км.

Полученные данные по гидрогеологическим предвестникам и другим видам сейсмогидрогеологических эффектов на Камчатке и установленные связи их проявлений с параметрами землетрясений (рис. 7) могут использоваться в исследованиях поведения природных гидрогеологических систем при подготовке и реализации землетрясений, а также других полей Земли, связанных с изменениями в водонасыщенной среде сейсмоактивных регионов.

2. С 2002 г. авторами в сотрудничестве с Камчатским филиалом Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС) проводится эксперимент по использованию гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 для прогнозирования землетрясений в реальном времени путем составления еженедельных заключений о наличии/отсутствии ГП по текущим данным наблюдений. По заключениям КФ РЭС, в 2002–2016 гг. были успешно спрогнозированы, в основном, по данным наблюдений за изменениями уровня воды в скважине Е-1, шесть землетрясений с $M = 5.3-7.2$, из которых четыре события имели величины магнитуд 6.4–7.2 (рис. 3б). Перед землетрясением 16 марта 2021 г., $M_w = 6.6$, $d_e = 350$ км в изменениях давления воды в скважине Е-1 предвестник также был выявлен в реальном времени [Болдина и др., 2022].

Результаты наблюдений на скважине Е-1 указывает на определенную связь между изменениями в гидрогеодинамическом состоянии наблюдательной системы “скважина–водовмещающая порода” с процессами подготовки местных сильных сейсмических событий и дают возможность использования данных текущих наблюдений в системе сейсмического прогнозирования в Камчатском крае. Вместе с тем, разработка представления о механизмах такой связи имеет преимущественно гипотетический характер и является предметом дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gs-gas.ru/unu/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* О возможности получения оценок упругих параметров водовмещающих пород по данным равномерных наблюдений в пьезометрических скважинах // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Т. 22. № 2. С. 231–243.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Косейсмические эффекты сильных камчатских землетрясений 2013г. в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. Т. 30. № 2. С. 66–76.
- 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.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н., Кобзев В.А.* Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Геодинамика и Тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. С. 0594.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканонология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканонология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканонология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17–28.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г., $M = 9$ // Вулканонология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39–48.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w = 7.8$ // Тихоокеанская геология. 2012. № 5. С. 104–114.
- 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 // Вулканонология и сейсмология. 2012а. № 5. С. 41–54.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканонология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122.
- Копылова Г.Н., Воропаев П.В.* Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканонология и сейсмология. 2006. № 5. С. 42–48.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Серафимова Ю.К.* Предвестники землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод: обзор мировых данных // Геохимия. 2022. Т. 67. № 10. С. 921–941.
- Копылова Г.Н., Иванов В.Ю., Касимова В.А.* Разработка элементов информационной системы комплексных геофизических наблюдений на территории Камчатки // Российский журн. наук о Земле. 2009. Т. 11. RE2002.
- Копылова Г.Н., Латыпов Е.Р., Пантюхин Е.А.* Информационная система “Полигон”: комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений. Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Материалы международной геофизической конференции. Новосибирск: изд-во СО РАН. 2003. С. 393–399.
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М.* Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканонология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–37.
- 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. С. 43–56.
- Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В.* Химический состав подземных вод режимных водопроводов Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканонология и сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62.
- 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.
- Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В.* Гидрогеохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия, и Республики Узбекистан) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. Т. 48. № 4. С. 5–20.
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР. 1965. 11 с.
- Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.
- Рябинин Г.В., Полетаев В.А.* Изменения ионно-солевого состава термоминеральных вод в связи с сильнейшими землетрясениями ($M_L \geq 7.0$) юго-востока полуострова Камчатка. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 26 сентября–2

- октября 2021 г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН. 2021. С. 283–287.
- Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М.* Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Т. 13. № 1. С. 107–122.
- Хаткевич Ю.М.* О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше пяти баллов, проявляющихся в г. Петропавловске-Камчатском // Вулканология и сейсмология. 1994. № 1. С. 63–67.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки / Е.И. Гордеева, В.Н. Чеброва (ред). Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. 2004. С. 96–112.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 г. М.: Светоч Плюс. 2011. 304 с.
- Чебров Д.В., Кузаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Дроздина С.Я., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Титков Н.Н.* Близне-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.
- Юсупов Ш.С., Нурматов У.А., Шин Л.Ю. и др.* Аномальные вариации гидрогеосейсмологических параметров в период возникновения Туягузского и Маржанбулакского землетрясений 25 и 26 мая 2013 г. // Докл. АН РУз: ФАН. 2014. № 6. С. 38–40.
- Barberio M.D., Barbieri M., Billi A., Doglioni C., Petitta M.* Hydrogeochemical changes before and during the 2016 Amatrice-Norcia seismic sequence (central Italy) // Scientific Reports. 2017. V. 7. № 1. P. 11735.
- Boschetti T., Barbieri M., Barberio M.D., Billi A., Frondini S., Petitta M.* CO₂ inflow and elements desorption prior to a seismic sequence, Amatrice-Norcia 2016 // Italy. Geochem. Geophys. 2019. V. 20. P. 2303–2317.
- Chiodini G., Cardellini C., Di Luccio F., Selva G., Frondini F., Caliro S., Rosiello A., Beddini G., Ventura G.* Correlation between tectonic CO₂ Earth degassing and seismicity is revealed by a 10-year record in the Apennines // Italy. Sci. Adv. 2020. V. 6. P. eabc2938.
- Kitagawa Y., Koizumi N., Takahashi M., Matsumoto N., Sato T.* Changes in groundwater levels or pressures associated with the 2004 earthquake off the west coast of northern Sumatra (M9.0) // Earth Planets Space. 2006. V. 58. P. 173–179.
- Kopylova G., Boldina S.* Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula // Front. Earth Sci. 2020. V.8. P. 576017.
- Kopylova G., Boldina S.* Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // Minerals. 2021. V. 11. P. 731.
- Martinelli G.* Previous, current, and future trends in research into earthquake precursors in geofluids // Geosciences. 2020. V. 10. № 5. P. 189.
- 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.
- Reddy D., Nagabhushanam P., Sukhija B.S.* Earthquake ($M = 5.1$) induced hydrogeochemical and ¹⁸O changes: Validation of aquifer breaching – Mixing model in Koyna, India // Geophysical J. International. 2011. V. 184. № 1. P. 359–370.
- Skelton A., Andrén M., Kristmannsdóttir H., Stockmann G., Mörth C.-M., Sveinbjörnsdóttir A., Jónsson S., Sturkell E., Guðrúnardóttir H.R., Hjartarson H., Siegmund H., Kockum I.* Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland // Nature Geoscience. 2014. V. 7. № 10. P. 752–756.
- Skelton A., Liljedahl-Claesson L., Wästebý N., Andrén M., Stockmann G., Sturkell E., Mörth C.-M., Stefansson A., Tollefsen E., Siegmund H., Keller N., Kjartansdóttir R., Hjartarson H., Kockum I.* Hydrochemical changes before and after earthquakes based on long-term measurements of multiple parameters at two sites in northern Iceland – A review // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2019. V. 124. P. 2702–2720.
- Shi Zh., Wang G., Liu C.* Co-seismic groundwater level changes induced by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake in the near field // Pure Appl. Geophys. 2013. V. 170. P. 1773–1783.
- Shi Zh., Wang G., Manga M., Wang C.-Y.* Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 430. P. 66–74.
- Sun X., Wang G., Yang X.* Coseismic response of water level in Changping well, China, to the $M_w = 9.0$ Tohoku earthquake // J. Hydrology. 2015. V. 531. P. 1028–1039.
- Tsunogai U., Wakita H.* Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan // Science. 1995. V. 269. № 5220. P. 61–63.
- Zhou Z., Tian L., Zhao J., Wang H., Liu J.* Stress-Related Pre-Seismic Water Radon Concentration Variations in the Panjin Observation Well, China (1994–2020) // Front. Earth Sci. 2020. V. 8. P. 596283.
- Wakita H.* Water wells as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. V. 189. P. 553–555.
- Wang C.-Y.* Liquefaction beyond the near field // Seismol. Res. Lett. 2007. V. 78. P. 512–517.
- Wang C.-Y., Manga M.* Earthquakes and Water. Lecture Notes in Earth Sciences 114. Berlin: Springer. Germany, 2010. 249 p.
- Wang Ch.-Y., Manga M.* Water and Earthquakes. Lecture Notes in Earth System Sciences. Cham: Springer, Switzerland. 2021. 387 p.
- Wang C.-Y., Cheng L.H., Chin C.V., Yu S.B.* Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan // Geology. 2001. V. 29. № 9. P. 831–834.

Seismohydrogeological Phenomena as an Earthquakes' Trigger Impact on Groundwater (by the Example of the Wells of the Petropavlovsk-Kamchatsky Test Site, Kamchatka Peninsula)

G. N. Kopylova^{a, *} and S. V. Boldina^{a, **}

^a*Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Kamchatka Branch, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

^{*}*e-mail: gala@emsd.ru*

^{**}*e-mail: boldina@emsd.ru*

Based on the long-term observations of the wells on the Petropavlovsk-Kamchatsky Test Site, the Kamchatka Peninsula, the paper analyzes manifestations of three main types of seismohydrogeological effects – hydrogeological precursors, coseismic pressure jumps and postseismic effects of the vibrational impact of seismic waves in measurements of the pressure and chemical composition of groundwater, depending on the earthquake parameters (magnitude, epicentre distance, intensity of seismic impact in the observation areas). The paper presents data on the earthquakes that were preceded by hydrogeological precursors in several ($n = 2-4$) wells. It is discussed whether it is possible to use hydrogeological precursors to predict strong earthquakes in Kamchatka. The authors also discuss the results of their experimental use in a real-time environment with weekly reports on the current observational data for the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council. By the example of water level observations in YUZ-5 Well, the authors analyzed coseismic jumps in the groundwater pressure due to rupture formation in the sources of local $M_w > 6.0$ earthquakes and four types of effects of the vibrational impact of seismic waves during local and distant $M_w = 6.8-9.3$ earthquakes at epicentral distances from 80 to 14600 km; the study demonstrates that such effects depend on the earthquake parameters and the intensity of seismic impact in the well area.

Keywords: well, earthquake, water level, chemical composition of groundwater, hydrogeological precursor, seismic prediction