

ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ИЗМЕНЕНИЯХ ИОННОГО И ГАЗОВОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД: ОБЗОР МИРОВЫХ ДАННЫХ

© 2022 г. Г. Н. Копылова^а*, С. В. Болдина^а, Ю. К. Серафимова^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, Камчатский филиал, б-р Пишпа, 9, Петропавловск-Камчатский, Камчатский край, 683023 Россия

*e-mail: gala@emsd.ru

Поступила в редакцию 29.12.2021 г.

После доработки 24.01.2022 г.

Принята к публикации 03.02.2022 г.

Рассматриваются аномалии в изменениях ионного и газового состава подземных вод перед землетрясениями (гидрогеохимические предвестники, далее ГГХП) по данным регулярных наблюдений в 10 самоизливающихся скважинах и источниках в сейсмоактивных районах России (полуостров Камчатка), Узбекистана, Японии и Исландии. С использованием расширенного набора параметров землетрясений показано, что ГГХП проявлялись в течение 1–9 месяцев в ближней и средней зонах очагов землетрясений с $M_w = 5.3–7.8$. Такие свойства гидрогеохимических предвестников позволяют их использовать для оценки магнитуды, удаленности, времени и воздействия ожидаемого сейсмического события в районе наблюдений. Представлена модель зарегистрированного предвестника в изменениях ионного состава подземной воды из самоизливающейся скважины, построенная по данным наблюдений за концентрациями анионов и катионов и математической модели смешивания двух контрастных по составу вод в зоне повышенной водопроницаемости. На примере одной из скважин выполнены расчеты химического состава смешивающихся вод в водоносной системе и в стволе скважины. С использованием этой модели и данных наблюдений оценены параметры возмущенного состояния системы скважина – водовмещающая порода при подготовке землетрясения – время релаксации импульсов давления воды (t_0) и время движения смешанной воды (τ_0). Морфология и продолжительность ГГХП в изменениях ионного состава воды из скважины определяются соотношением параметров t_0 и τ_0 . Для развития исследований ГГХП и их использования в прогнозировании землетрясений необходима техническая реконструкция системы гидрогеохимических наблюдений и создание моделей формирования ГГХП в отдельных скважинах.

Ключевые слова: скважина, химический состав подземной воды, землетрясение, магнитуда, гидрогеохимические предвестники, система скважина – водовмещающая порода, концептуальная модель, прогноз землетрясений

DOI: 10.31857/S0016752522100053

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний интерес к изучению аномальных изменений ионно-солевого, изотопного и газового состава подземных вод перед землетрясениями (далее гидрогеохимические предвестники или ГГХП) обусловлен возрастанием опасности сильных сейсмических событий для населения и инфраструктуры урбанизированных территорий. Прогнозирование землетрясений рассматривается как один из способов уменьшения негативных последствий таких событий, поэтому детальным мониторинговым исследованиям предвестников землетрясений в изменениях полей Земли отводится особая роль в оценках места и времени будущих сейсмических событий (Jordan et al., 2011).

Перспективы решения задачи надежного прогнозирования землетрясений связываются с использованием больших массивов данных наземных и космических наблюдений для диагностики сигналов в изменениях коррелированности различных природных процессов, предшествующих крупным землетрясениям (Martinelli et al., 2020a). Вместе с тем, такой подход может реализовываться лишь в совокупности с изучением механизмов образования и пространственно-временных закономерностей проявления различных видов предвестников в зависимости от параметров последующих землетрясений, их магнитуд и удаленности от районов наблюдений.

Гидрогеохимические предвестники или ГГХП относятся к классу геохимических предвестников

землетрясений, объединяющих совокупность изменений химического состава вод и газов атмосферы, поверхностных и подземных вод в процессе подготовки землетрясений (Thomas, 1988; Cicerone et al., 2009; Wang, Manga, 2010, 2021). Генетическая связь ГГХП с изменениями физико-химического состояния подземных вод, их давлением, температурой и водопроницаемыми свойствами водовмещающих пород в процессе подготовки землетрясений также обуславливает их принадлежность к гидрогеологическим предвестникам землетрясений (Барсуков и др., 1979; Киссин и др., 1982).

Обобщение данных о ГГХП, полученных в различных районах Мира при проведении наблюдений за ионным и, в отдельных случаях, изотопным и газовым составом подземных вод из самоизливающихся скважин и каптированных источников, дает возможность оценить характерные времена проявления ГГХП перед землетрясениями и их связи с параметрами сейсмических событий — величинами магнитуды, эпицентрального расстояния и воздействием в районах проявления ГГХП. Не менее важной задачей является построение адекватных моделей формирования ГГХП в системах наблюдательная скважина — водовмещающая порода для дальнейшего развития исследований аномальных изменений химического состава подземной воды при подготовке землетрясений.

Краткая история исследования ГГХП

Впервые на необходимость наблюдений за химическим составом подземных вод и газов для обнаружения признаков подготовки землетрясений указывалось в работе (Уломов, Мавашев, 1967). В дальнейшем наблюдения за химическим составом подземных вод традиционно включались в национальные программы по прогнозу землетрясений в бывшем СССР, США, Китае, Японии и других странах (Рикитакэ, 1979).

В СССР в последней четверти XX в. на специально созданных сейсмопрогностических полигонах в районах Средней Азии, Кавказа, Сибири и Дальнего Востока проводились наблюдения за физико-химическими параметрами подземных вод на скважинах и источниках. Сведения об эффектах сейсмичности, в т.ч. описание предполагаемых ГГХП, представлены в коллективной монографии (Гидрогеохимические, 1985). С конца 90-х гг. XX в. гидрогеохимические наблюдения на сейсмопрогностических полигонах были прекращены или проводились эпизодически. Непрерывные наблюдения на сети из нескольких скважин продолжались лишь на полуострове Камчатка, где были получены уникальные данные о предвестниках в изменениях ионного, газового состава и уровня подземных вод перед землетря-

сениями с магнитудами $M_w = 6.5-7.8$, и впервые были предложены эмпирические алгоритмы прогнозирования времени таких событий по данным текущих наблюдений (Копылова и др., 1994; Хаткевич, 1994; Копылова, 2001; Хаткевич, Рябинин, 2004). Указанные работы были опубликованы на русском языке и были малоизвестны в мире. В работах (Wang, Manga, 2010, 2021), обобщающих мировые материалы по эффектам сейсмичности в природных системах подземных и поверхностных вод, приводится лишь краткая информация по гидрогеохимическим наблюдениям на полуострове Камчатка по публикациям (Bella et al., 1998; Biagi et al., 2000, 2000a, 2000b, 2001; Kingsley et al., 2001). Более полное изложение результатов изучения гидрогеохимических предвестников на полуострове Камчатка приводится в работах (Копылова, Болдина, 2019; Kopylova, Boldina, 2020, 2021).

Наблюдения за химическим составом подземных вод и газов для поиска и изучения ГГХП также проводились в Японии (Tsunogai, Wakita, 1995), Китае (Zhou et al., 2020), Исландии (Skelton et al., 2014, 2019), Индии (Reddy et al., 2011), Италии (Barberio et al., 2017; Boschetti et al., 2019; Chiodini et al., 2020; Martinelli et al., 2020), в других странах (Юсупов и др., 2014; Копылова и др., 2020). В работах (Thomas, 1988; Wang, Manga, 2010, 2021; Martinelli, 2020; Ingebritsen, Manga, 2014) приводятся наиболее известные мировые данные о геохимических предвестниках, включая данные о ГГХП, и показано, что таких данных сравнительно немного для однозначных выводов об их практической ценности для прогноза землетрясений. Поэтому в качестве первоочередной задачи выдвигалось получение новых достоверных данных о геохимических предвестниках и их последующее обобщение.

В настоящей работе проводится обобщение всех относительно надежных данных о ГГХП, полученных за последние десятилетия, при уточнении и расширении перечня параметров землетрясений, которым они предшествовали. Это позволяет сделать оценки характерных продолжительности и заблаговременности проявления ГГХП до землетрясений и их связей с параметрами будущих землетрясений. Получение таких оценок является первоочередной задачей в обеспечении научного базиса применения ГГХП при прогнозировании землетрясений в режиме реального времени. Кроме этого, детальные данные по изменениям концентраций главных ионов (анионов и катионов) в составе подземной воды при развитии ГГХП в скважинах с естественным режимом самоизлива могут использоваться для определения механизмов формирования ГГХП и построения их концептуальных моделей, расширяя тем самым теоретические представления о процессах в флюидонасыщенной среде сейсмоактивных регионов на стадиях подготовки сильных землетря-

сений. В работах (Копылова, Болдина, 2012; Kopylova, Boldina, 2019, 2021) продемонстрированы примеры таких моделей для зарегистрированных ГГХП с получением количественных оценок возмущенного состояния водоносной системы – времени релаксации импульсов давления и времени движения смешанной воды на стадии подготовки землетрясения. В этих работах полагалось, что определяющими условиями формирования ГГХП являются наличие вод с различным химическим составом в водоносной системе скважины и изменение условий их смешивания в процессе подготовки землетрясения. Аналогичные взгляды на ведущий механизм образования ГГХП в изменениях ионного, изотопного и газового состава воды из скважин и источников приводились в работах других исследователей (Киссин, Стклянин, 1985; Юсупов и др., 2014; Skelton et al., 2019, Wang et al., 2004 и др.).

Отличием настоящей работы от более ранних обзоров по геохимическим эффектам землетрясений (Барсуков и др., 1979; Thomas, 1988; Wang, Manga, 2010, 2021) является то, что в ней не рассматриваются материалы, полученные при наблюдениях за режимом гейзеров, пароводяных скважин на геотермальных месторождениях, грязевых вулканов, рек, ручьев и прочих видов разгрузок высокотемпературных гидротермальных систем. Это обусловлено значительной изменчивостью во времени таких гидрогеологических объектов под влиянием природных и техногенных факторов (Ingebritsen et al., 2001) и недостаточной детальностью наблюдений на них для надежного выделения ГГХП перед отдельными сейсмическими событиями.

В работе также не рассматриваются данные наблюдений за радиоактивным газом радоном, растворенным в подземной воде и содержащемся в почвенном воздухе. Это обусловлено особенностями миграции радона, как радиоактивного газа с небольшой величиной времени полураспада (наиболее стабильный изотоп ^{222}Rn имеет период полураспада 3.8 сут). Кроме этого, по радоновым предвестникам землетрясений имеется большое число публикаций (см., например, монографию (Фирстов, Макаров, 2018) и список литературы к ней), в отличие от небольшого числа работ, посвященных предвестникам землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод по наблюдениям в самоизливающихся скважинах и постоянно действующих (каптированных) источниках. Нами также не рассматривались предвестниковые эффекты в изменениях концентраций отдельных газов, таких как углекислый газ или водород, вследствие отсутствия данных по изменениям концентраций всей совокупности газов в пробах, отобранных из самоизливающихся скважин.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГГХП

Основу рассматриваемых в обзоре материалов о ГГХП составляют опубликованные данные регулярных наблюдений на скважинах (каптированных источниках), включающих отбор проб воды и газа для определения в них в лабораторных условиях параметров ионного состава воды и газа в подземных водах с температурой 10–94°C и минерализацией 0.24–12 г/л (табл. 1). Продолжительность таких наблюдений составляла не менее первых лет при периодичности отбора проб воды и газа от 3 сут до двух недель. Лишь при таких условиях проведения наблюдений могут выделяться эффекты землетрясений, соответствующие ГГХП перед землетрясениями, как проявление процессов их подготовки, и постсейсмические изменения, вызванные динамическим воздействием сейсмических волн на водоносные системы наблюдательных скважин и источников (Копылова, 2006). С использованием указанных критериев для 9 скважин и одного источника (всего для 10 режимных водопроявлений), расположенных в сейсмоактивных районах полуострова Камчатка, Японии, Республики Узбекистан и Исландии, были рассмотрены данные наблюдений за ионным составом подземных вод и составом газов, в изменениях которых проявлялись ГГХП перед землетрясениями.

При проведении долговременных наблюдений, ориентированных на поиск ГГХП, желательно, чтобы режим наблюдательных скважин был естественным, т.е. не нарушенным эксплуатацией и другими техногенными возмущениями режима подземных вод, гидравлически связанных со скважиной. Такие условия соблюдались в 1986–1998 гг. для трех скважин полуострова Камчатка, в которых ГГХП проявлялись неоднократно. Из публикаций о ГГХП в других регионах следует, что вода из большинства скважин, одновременно с проведением наблюдений, использовалась для водо- и теплоснабжения или в бальнеологии (табл. 1). В таких случаях для выделения ГГХП авторами применялись различные методы одномерного и многомерного статистического анализа временных рядов гидрогеохимических параметров (Копылова и др., 1994; Копылова, Таранова, 2013; Юсупов и др., 2014; Хаткевич, Рябинин, 2004; Biagi et al., 2000, 2000a, 2000b, 2001; Kingsly et al., 2001; Skelton et al., 2019). В настоящей работе в качестве ГГХП рассматриваются визуально выделяемые перед землетрясениями аномалии в изменениях временных рядов гидрогеохимических параметров с учетом имеющейся информации о природных и техногенных воздействиях на режим наблюдательных скважин. Аномалии во временных рядах гидрогеохимических параметров, выделяемые статистическими методами, привлека-

Таблица 1. Данные о режимных водопроявлениях

Название скважины	Координаты	Глубина, м Открытый интервал, м	Водовмещающие породы: возраст, состав	Характеристика режима; скорость разгрузки, л/с	Температура воды, °С	Минерализация, г/л	Химический состав воды*	Газ, состав**	Период наблюдений, периодичность	Ссылка
<i>Полуостров Камчатка, Петропавловск-Камчатский полигон</i>										
ГК-1	53.28° N 158.40° E	$\frac{1261}{400-1261}$	Q, N, K ₂ , туфы, алевролиты, сланцы	Естественный самоизлив; 0.1	16	10	Cl/Na–Ca	Свободный, CH ₄ –N ₂	1977–1998 гг., 1 раз в 3 дня	(Копылова и др., 2020; Копылова, Boldina, 2020)
М-1	53.18° N 158.28° E	$\frac{600}{310-313; 407-410; 553-556}$	N, туфы	Естественный самоизлив; 1.5	16	0.25	SO ₄ /Ca–Na	Растворенный, N ₂		
Г-1	53.05° N 158.66° E	$\frac{2500}{1710-1719; 1750-1754; 1790-1799; 2415-2424}$	Q, диориты K ₂ , сланцы	Естественный самоизлив; < 0.001	10	12	Cl/Na	Свободный, CH ₄ –N ₂		
<i>Республика Узбекистан, Ташкентский полигон</i>										
Чаткал	41.57° N 69.79° E	$\frac{1400}{1107-1190}$	K ₂ , конгломераты, песчаники, алевролиты, глины, известняки	Откачка насосом для бальнеологического использования	46	1.0	HCO ₃ –SO ₄ /Na	Растворенный, N ₂ –CO ₂ –O ₂	Август 2010 – ноябрь 2013 гг., 1 раз в 2–4 сутки	(Копылова и др., 2020)
Минора	41.55° N 69.68° E	$\frac{90}{68-75}$	N–Q, пески, гравий, глина	Откачка насосом для водоснабжения	15.5	0.8	н.д.	Растворенный, N ₂ –O ₂ –CO ₂		
ДАН (Озодбаш)	41.53° N 69.65° E	$\frac{85}{59-68}$	N–Q, пески, гравий, глина	Откачка насосом для водоснабжения	15.2	0.8	н.д.	Растворенный, N ₂ –O ₂ –CO ₂		
Озодбаш родник	41.53° N 69.65° E	Свободный самоизлив	PZ, песчаники, галечники, известняки	Естественный самоизлив; 0.08	18	0.9	н.д.	Растворенный, N ₂ –O ₂ –CO ₂		
<i>Япония</i>										
ROK	34.67° N 135.20° E	100	Граниты	Откачка: розлив питьевой воды	н.д.	0.15	HCO ₃ –Cl–SO ₄ /Ca–Na	н.д.	Июнь 1993 – апрель 1995 гг., 59 проб	(Tsunogai, Wakita, 1995)
<i>Исландия</i>										
Húsavík (HU01)	66.05° N 17.34° W	$\frac{1500}{175-1500}$	Метаморфизованные базальтовые породы	Промышленная откачка воды; 0.5	94	3.0	н.д.	н.д.	2002–2018 гг., 1 раз в неделю	(Skelton et al., 2019)
Hafnalekur (HA01)	65.87° N 17.45° W	$\frac{100}{35-100}$	Базальтовые лавы, базальтовые породы	Промышленная откачка воды; 7.7	71–76	0.24	SO ₄ /Cl–Na	н.д.	2008–2018 гг., 1 раз в неделю	

* Указаны анионы/катионы с содержанием ≥20% ммоль/л; ** указаны газы с содержанием ≥10 об. %.

лись как полезное подтверждение наличия предвестников перед отдельными землетрясениями.

Данные о землетрясениях, которым предшествовали ГГХП в рассматриваемых скважинах (табл. 1), авторами цитируемых публикаций изначально брались из различных источников, в основном из региональных каталогов землетрясений. Это создавало сложность при сравнении энергетических и других параметров землетрясений из различных регионов.

В настоящей работе при характеристике землетрясений, которым предшествовали ГГХП, используются их параметры по данным мирового каталога USGS [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>] с расширением набора параметров за счет включения данных о механизмах очагов (по мировому каталогу GlobalCMT [<https://www.globalcmt.org/>]), величин максимальных линейных размеров очагов землетрясений по (Ризниченко, 1976) и параметров воздействия землетрясений в районах наблюдательных скважин: интенсивности сотрясений по шкале MSK-64 (Медведев и др., 1965), удельной плотности сейсмической энергии e (Wang, 2007) и объемной косейсмической деформации водовмещающих пород (Okada, 1985; Копылова и др., 2010).

Данные об 11-ти землетрясениях, перед которыми проявлялись ГГХП, представлены в табл. 2. Это были наиболее сильные землетрясения за периоды проведения наблюдений (табл. 1). В качестве параметров землетрясений приводятся величины моментных магнитуд M_w , сейсмического момента M_0 , параметры подвижки в очаге и величины максимальных линейных размеров очагов L , км, рассчитанные по формуле $\lg L = 0.440M_w - 1.289$ (Ризниченко, 1976).

Для землетрясений района полуострова Камчатка приводятся данные о времени в очаге и величине магнитуды M_w по каталогу USGS [<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>]; определения координат и глубин гипоцентров даны по Региональному каталогу землетрясений Камчатки и Командорских о-вов КФ ФИЦ ЕГС РАН (Чебров и др., 2013) [<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>], полученному 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.gsras.ru/unu/>]. Для землетрясений Узбекистана, Японии и Исландии использовались данные USGS.

В табл. 3 приведены параметры, характеризующие воздействие землетрясений из (табл. 2) в районах наблюдательных скважин, а также даны оценки продолжительности (T_1) и заблаговременности (T_2) проявления ГГХП перед землетря-

сениями. Величина T_1 показывает максимальную продолжительность аномального изменения гидрогеохимических параметров для отдельной скважины. Величина T_2 соответствует времени от начала гидрогеохимической аномалии до землетрясения. Размерность T_1 и T_2 — месяцы.

Для характеристики воздействия землетрясений в районах скважин (табл. 3), использовались величины эпицентрального расстояния землетрясений до скважин (d_e , км), нормированные на максимальный линейный размер очага L (d_e/L); величины удельной плотности сейсмической энергии e , Дж/м³, рассчитанные по формуле $\lg d_e = 0.48M_w - 0.33\lg e(d_e) - 1.4$ (Wang, 2007; Wang, Manga, 2010); максимальные скорости сейсмических волн V , см/с по (Копылова, Болдина, 2020); величины косейсмической объемной деформации водовмещающих пород в районах скважин D , 10⁻⁹ по (Okada, 1985; Копылова и др., 2010) и интенсивность сотрясений I по шкале MSK-64 (Медведев и др., 1965) по данным макросейсмического каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН для камчатских землетрясений [<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>]. Для землетрясений Узбекистана, Японии и Исландии величины I рассчитывались по формуле (Шебалин, 1968):

$I_{MSK-64} = bM_w - v\lg(d_e^2 + H^2)^{1/2} + c$, где H — глубина очага, км; $b = 1.5$, $v = 3.5$, $c = 3.0$.

Характеристика данных о ГГХП. Использовались следующие материалы:

— временные ряды данных о ионном составе подземных вод в скважинах ГК-1, М-1 и Г-1 и составе свободного газа из скважины ГК-1 на территории Петропавловск-Камчатского полигона, полуостров Камчатка, полученные Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (КФ ФИЦ ЕГС РАН) в 1986–1998 гг. и выделенные в их изменениях аномалии перед шестью землетрясениями с $M_w = 6.5–7.8$ (Копылова и др., 1994; Копылова, Болдина, 2019; Копылова и др., 2020; Хаткевич, Рябинин, 2004; Kopylova, Boldina, 2020, 2021);

— временные ряды данных наблюдений за составом подземных вод и газов источника Озодбаш и трех скважин на территории Ташкентского полигона, Республика Узбекистан (табл. 1), полученные Сейсмологическим центром Министерства чрезвычайных ситуаций Республики Узбекистан в 2010–2013 гг. и выделенные в их изменениях аномалии перед землетрясением 24 мая 2013 г. с $M_w = 5.3$ (Юсупов и др., 2014; Копылова и др., 2019, 2020);

— опубликованные данные о гидрогеохимических предвестниках перед землетрясением 1995 г. в районе г. Кобе, Япония ($M_w = 6.9$) в скважине ROK (Tsunogai, Wakita, 1995) и в скважинах HU01

Таблица 2. Данные о землетрясениях (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>, <https://www.globalcmt.org/>)

Дата	Положение эпицентра		H , км	M_w	M_0^* , $H \times m \times 10^{20}$	L^{**} , км	Механизм очага			
							азимут прости- рания, °	угол падения, °	угол подвижки, °	диаграмма
<i>Полуостров Камчатка, Петропавловск-Камчатский полигон</i>										
6 окт. 1987	52.86° N	160.23° E	33	6.5	0.06	37	208/33	32/58	86/92	
2 марта 1992	52.76° N	160.20° E	20	6.9	0.23	56	213/40	28/62	84/93	
8 июня 1993	51.20° N	157.80° E	40	7.5	2.02	103	207/39	29/61	79/96	
13 нояб. 1993	51.79° N	158.83° E	40	7.0	0.40	62	206/34	31/59	83/94	
1 янв. 1996	53.88° N	159.44° E	0	6.6	н.д.	41	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
5 дек. 1997	54.64° N	162.55° E	10	7.8	5.3	139	202/39	23/68	74/97	
<i>Республика Узбекистан, Ташкентский полигон</i>										
24 мая 2013	40.91° N	69.17° E	19	5.3	0.001	11	177/69	76/40	53/157	
<i>Япония, скважина ROK</i>										
16 янв. 1995	34.58° N	135.02° E	22	6.9	0.24	56	324/230	70/79	12/160	
<i>Исландия</i>										
16 сент. 2002	66.94° N	18.46° W	10	5.8	0.006	18	207/302	63/80	-11/-153	
21 окт. 2012	66.31° N	18.67° W	10	5.5	0.003	14	182/322	39/58	-57/-114	
2 апр. 2013	66.43° N	17.60° W	10	5.3	0.001	11	205/305	66/69	-24/-154	

*Сейсмический момент; **максимальный линейный размер очага землетрясения по (Ризниченко, 1976).

и НА01 на севере Исландии перед тремя землетрясениями 2002, 2012 и 2013 гг. с $M_w = 5.8, 5.5$ и 5.3 (Skelton et al., 2014, 2019; Wästeby et al., 2014).

Методика гидрогеохимических наблюдений и описание ГХП

Полуостров Камчатка, Петропавловск-Камчатский полигон (ПКП). На территории ПКП в 1986–1998 гг. проводились наблюдения за химическим составом подземных вод из самоизливающихся скважин ГК-1, М-1, Г-1 с периодичностью один раз в три дня. Определялись физико-хими-

ческие параметры подземных вод – скорость разгрузки, температура воды, рН, концентрации главных анионов и катионов в составе воды. На газифицирующей скважине ГК-1 отбирались пробы свободного газа для определения его состава хроматографическим методом. Описание аналитических методов определения гидрогеохимических параметров приводится в (Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004). Относительные ошибки аналитического определения концентраций отдельных ионов и газов составляли 2–10%. В результате таких наблюдений были получены однородные временные ряды параметров подзем-

Таблица 3. Характеристика воздействия землетрясений (табл. 1) в районах скважин

Дата	M_W	d_e^* , км	Косейсмическая объемная деформация D^{**} , 10^{-9}	d_e/L	Удельная плотность сейсмической энергии, e , Дж/м ³	Скорость сейсмической волны, V , см/с	Интенсивность сотрясений I по шкале MSK-64***	T_1/T_2 , месяцы
<i>Полуостров Камчатка, Петропавловск-Камчатский полигон</i>								
6 окт. 1987	6.5	130 ¹⁾ ; 134 ²⁾	+(11 ¹⁾ ; 9.8 ²⁾	3.5 ¹⁾ ; 3.6 ²⁾	0.1 ¹⁾ , 2)	3.7 ¹⁾ ; 3.5 ²⁾	5	7/7 ¹⁾ ; 1/1 ²⁾
2 марта 1992	6.9	133 ¹⁾ ; 136 ²⁾	+(57 ¹⁾ ; 50 ²⁾	2.4 ¹⁾ , 2)	0.2 ¹⁾ , 2)	6.6 ¹⁾ ; 6.4 ²⁾	5–6	9/9 ¹⁾ ; 1/1 ²⁾
8 июня 1993	7.5	233 ¹⁾ ; 220 ²⁾	+(3.6 ¹⁾ ; 7.5 ²⁾	2.3 ¹⁾ ; 2.1 ²⁾	0.3 ¹⁾ , 2)	7.1 ¹⁾ ; 7.7 ²⁾	5	1/1 ¹⁾ ; 1/5 ²⁾
13 нояб. 1993	7.0	167 ¹⁾ ; 157 ²⁾	+(12 ¹⁾ ; 17 ²⁾	2.7 ¹⁾ ; 2.5 ²⁾	0.1 ¹⁾ ; 0.2 ²⁾	5.5 ¹⁾ ; 6.0 ²⁾	5–6	1/1 ¹⁾ ; 1/4 ²⁾
1 янв. 1996	6.6	95 ¹⁾ ; 108 ²⁾ ; 105 ³⁾	н.д.	2.3 ¹⁾ ; 2.6 ²⁾ ; 2.5 ³⁾	0.2 ¹⁾ , 3) 0.1 ²⁾	6.9 ¹⁾ ; 5.7 ²⁾ ; 6.0 ³⁾	4–5	7/7 ¹⁾ ; 1/3 ²⁾ ; 5/5 ³⁾
5 дек. 1997	7.8	308 ¹⁾ , 3)	+(12 ¹⁾ ; 1.0 ³⁾	2.2 ¹⁾ , 3)	0.3 ¹⁾ , 3)	7.4 ¹⁾ , 3)	5–6	5/5 ¹⁾ ; 3/3 ³⁾
<i>Узбекистан</i>								
24 мая 2013	5.3	82 ⁴⁾ ; 79 ⁵⁾ ; 89 ⁶⁾	–(0.24 ⁴⁾ ; 0.26 ⁵⁾ ; 0.2 ⁶⁾	7.4 ⁴⁾ ; 7.2 ⁵⁾ ; 8.1 ⁶⁾	0.004 ⁴⁾ ; 0.005 ⁵⁾ ; 0.003 ⁶⁾	1.1 ⁴⁾ ; 1.2 ⁵⁾ ; 1.0 ⁶⁾	4	(2-6)/9
<i>Япония, скважина ROK</i>								
16 янв. 1995	6.9	20	–137	0.4	66.5	74.6	8	5/5
<i>Исландия</i>								
16 сент. 2002	5.8	110 ⁷⁾	+2.8 ⁷⁾	6.0 ⁷⁾	0.01 ⁷⁾	1.6 ⁷⁾	4–5	≥0.2/≥0. 2
21 окт. 2012	5.5	66 ⁷⁾ ; 73 ⁸⁾	+0.28 ⁷⁾ ; –1.1 ⁸⁾	4.9 ⁷⁾ ; 5.4 ⁸⁾	0.02 ⁷⁾ ; 0.01 ⁸⁾	2.2 ⁷⁾ ; 1.9 ⁸⁾	4–5	≥2/≥2
2 апр. 2013	5.3	44 ⁷⁾ ; 62 ⁸⁾	+(4.1 ⁷⁾ , 1.6 ⁸⁾	4.0 ⁷⁾ ; 5.6 ⁸⁾	0.03 ⁷⁾ ; 0.01 ⁸⁾	3.0 ⁷⁾ ; 1.7 ⁸⁾	5 ⁷⁾ ; 4–5 ⁸⁾	≥2/≥2

* Эпицентральное расстояние землетрясений до скважин: полуостров Камчатка: 1) – скважина ГК-1; 2) – скважина М-1; 3) – скважина Г-1; Узбекистан: 4) – скважина Минора; 5) – скважина ДАН и родник Озодбаш; 6) – скважина Чаткал; Исландия: 7) – скважина Húsavík; 8) – скважина Nafralækur;

** Оценки косейсмической объемной деформации в районах скважин D получены авторами по методике, описанной в (Копылова и др., 2010), с использованием алгоритма (Okada, 1985); знаки перед числами обозначают “+” – расширение, “–” – сжатие;

*** Интенсивность сотрясений I_{MSK-64} для скважин полуострова Камчатка приводится по данным макросейсмического каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН (Чеброва и др., 2020) (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/macrosei.php>); для других районов величины I_{MSK-64} рассчитаны по формуле из (Шебалин, 1968) (см. текст).

ных вод, в которых проявились аномальные изменения перед шестью землетрясениями 1987–1997 гг. (табл. 2). Исходные временные ряды и описание гидрогеохимических предвестников представлены в (Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004; Копылова и др., 2018; Копылова, Болдина, 2019; Korylova, Boldina, 2020, 2021).

В скважине ГК-1 (табл. 1) предвестник проявлялся в понижении концентрации хлорид-иона в течение 1–9 мес. перед всеми шестью землетрясениями (табл. 2, 3). В работе (Копылова и др., 1994) регулярное понижение концентрации Cl^- в воде из скважины перед землетрясениями и повышение после землетрясений объяснялось разбавлением глубинных минерализованных вод пресными водами из приповерхностных горизонтов на стадиях подготовки землетрясений и увеличением притока минерализованных вод на постсейсмической стадии. Перед землетрясением 02.03.1992 г. (табл. 2, 3) также наблюдалось увеличение дисперсии и изменение средних концентраций свободных газов в течение двух месяцев, свидетельствующее об увеличении доли газов воздушного происхождения – азота и аргона и уменьшении доли газов “глубинного” генезиса – метана, гелия и углекислого газа.

В скважине М-1 ГГХП проявлялся в уменьшении концентраций гидрокарбонат-иона и в увеличении концентраций сульфат-иона, натрия, кальция. В скважине Г-1 перед землетрясениями 01.01.1996 г. наблюдалось понижение концентрации хлорид-иона, сульфат-иона, натрия и кальция при повышении концентрации гидрокарбонат-иона, а перед землетрясением 05.12.1997 г. произошло повышение концентраций хлорид-иона и натрия и понижение концентрации гидрокарбонат-иона (Хаткевич, Рябинин, 2004; Korylova, Boldina, 2020, 2021).

Землетрясения, которым предшествовали ГГХП, происходили на эпицентральных расстояниях $d_e = 95–308$ км, имели величины $M_w = 6.5–7.8$ и сопровождалась сотрясениями интенсивностью $I_{\text{МСК-64}} = 4–6$ баллов (табл. 2, 3). По механизмам очагов пять из шести землетрясений являются типичными субдукционными взбросами с небольшими сдвиговыми компонентами. Площадки разрывов в очагах были ориентированы вдоль простирания полуострова Камчатка и по ним происходили субвертикальные смещения северо-западных висячих крыльев. Расчетные величины объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районах скважин при таких землетрясениях составляли от первых единиц до $(50–60) \times 10^{-9}$, характер деформации соответствовал объемному расширению. Время и заблаговременность проявления ГГХП в различных скважинах изменялись от менее одного месяца до 9 месяцев (табл. 3).

Гидрогеохимические наблюдения в Республике Узбекистан, Ташкентский полигон. Изучение гидрогеохимических предвестников в Узбекистане проводятся более 60-ти лет и являются пионерскими в мире (Уломов, Мавашев, 1967). В работе используются данные наблюдений в августе 2010–ноябре 2013 гг. (табл. 1) на трех скважинах и источнике Озодбаш на территории Приташкентского артезианского бассейна. Отбор проб воды и лабораторное определение содержаний в воде хлорид- и гидрокарбонат-ионов, величин рН, Eh и хроматографический анализ растворенных в воде газов (гелий, водород, азот, кислород и углекислый газ) проводился с периодичностью 2 раза в неделю. Данные наблюдений представлены в (Копылова и др., 2020).

24 мая 2013 г. вблизи Ташкентского полигона произошло землетрясение с $M_w = 5.3$, $d_e = 80–90$ км (табл. 2, 3). Перед этим землетрясением проявились аномальные повышения концентраций углекислого газа, гелия, водорода и понижения концентраций азота и кислорода, превышающие диапазон их фоновой изменчивости за многолетний период. Длительности аномалий по различным параметрам (T_1) изменялись от 2 до 5.5 мес. при величинах экстремальных амплитуд до 150–800% по отношению к фоновым вариациям; заблаговременность проявления аномалий (T_2) перед землетрясением составляла около девяти месяцев (Юсупов и др., 2014). Такие проявления предвестников были обусловлены увеличением в газовой разгрузке доли гелия, водорода и углекислого газа, поступающих из изолированных пустот в минеральном скелете водовмещающих пород при развитии микротрещиноватости, и уменьшением доли воздушных газов кислорода и азота (Юсупов и др., 2014; Копылова и др., 2019, 2020).

Япония (по Tsunogai, Wakita, 1995). После разрушительного землетрясения 16.01.1995 г в г. Кобе (табл. 2, 3) сотрудниками лаборатории химии землетрясений Токийского университета осуществлялся сбор из торговой сети бутылок питьевой воды из скважины ROK (табл. 1), расположенной в 20 км от эпицентра. Всего было собрано и проанализировано 72 одиночных и двойных проб воды, включающих 59 проб с различными датами за период с 5 июня 1993 по 13 января 1995 гг., предшествующий землетрясению. В изменениях концентрации хлорид-иона, измеренного с высокой точностью (случайные ошибки определения менее 0.3%, точность 3%), обнаружено монотонное повышение в течение августа 1994 – первой половины января 1995 г. с максимумом 13 января 1995 г.

Продолжительность и заблаговременность аномального повышения концентраций хлорид- и сульфат-ионов в воде скважины ROK перед землетрясением 16.01.1995 г. составила 5 мес. Ав-

торы (Tsunogai, Wakita, 1995) объясняют ГГХП внедрением в грунтовые воды, вскрытые скважиной, трещинных вод из нижележащего водоносного горизонта с подземной водой, обогащенной хлоридно-сульфатной составляющей. В качестве механизма такого процесса рассматривается увеличение проницаемости водовмещающих пород за счет развития в них микротрещиноватости на стадии подготовки землетрясения.

Исландия (по Skelton et al., 2019). Коллективом шведских и исландских исследователей проведены гидрогеохимические наблюдения в скважинах Северной Исландии HU01 и HA01 в течение 16 и 10 лет (табл. 1). Отбор проб воды производился с периодичностью один раз в неделю. Перед и в процессе отбора водных проб из стволов скважин промышленный водоотбор из них останавливался на некоторое время для стабилизации гидродинамического и гидрогеохимического режима. В пробах воды определялись изотопы кислорода $\delta^{18}\text{O}$, водорода $\delta^2\text{H}$ и концентрации широкого набора анионов и катионов. Исследование отличается высокой точностью аналитического определения компонентов состава воды в течение всего времени наблюдений; ошибки анализов составляли $\pm 0.6\%$ для определений $\delta^2\text{H}$, $\pm 0.1\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 2\%$ для анионов и катионов.

В связи с тремя землетрясениями (табл. 2, 3) были обнаружены гидрогеохимические аномалии, подтвержденные статистическими методами. Авторами работы (Skelton et al., 2019) описаны три вида гидрогеохимических аномалий, в т.ч. монотонные предсейсмические изменения концентраций Na, Si, K, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, выделенные в гидрогеохимические предвестники, а также скачкообразные и длительные монотонные изменения химического состава воды после землетрясений. Предсейсмические изменения (ГГХП) проявились в течение времени более 2 месяцев. Были предложены механизмы гидрогеохимических эффектов в процессе подготовки и реализации землетрясений за счет различной скорости и интенсивности смешивания вод из различных источников при развитии микротрещинообразования в водовмещающих породах. Также отмечалась возможность влияния вторичного минералообразования при изменениях взаимодействия в системе вода–порода.

СВЯЗЬ ГГХП С ПАРАМЕТРАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Представленные в табл. 1–3 данные о гидрогеохимических предвестниках в отдельных наблюдательных скважинах и унифицированный набор параметров последующих землетрясений позволяют рассмотреть связь проявлений ГГХП с величинами магнитуд M_w , эпицентральных рас-

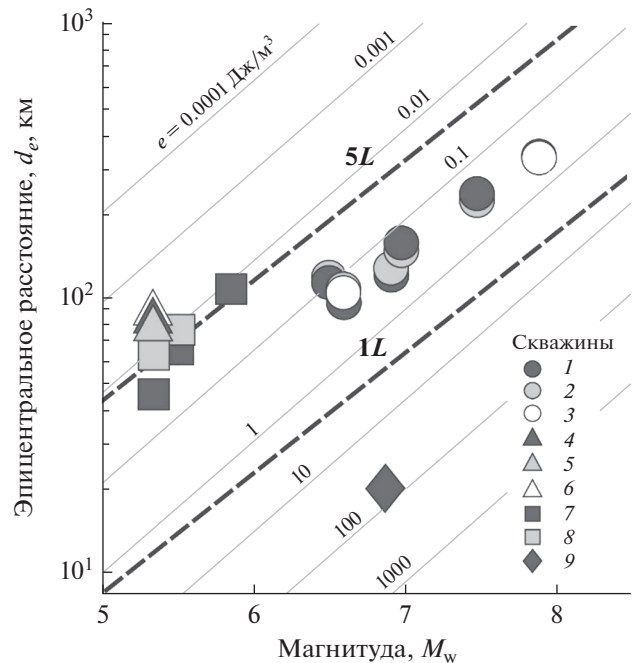


Рис. 1. Распределение гидрогеохимических предвестников землетрясений в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e последующих землетрясений (табл. 2, 3): 1–3 – скважины полуострова Камчатка: 1 – скважина ГК-1, 2 – скважина М-1, 3 – скважина Г-1; 4–6 – водопроявления Ташкентского полигона, Узбекистан: 4 – источник Озодбаш и скважина ДАН, 5 – скважина Минора, 6 – скважина Чаткал; 7–8 – скважины Исландии: 7 – Húsavík (HU01), 8 – Nafralækur (HA01); 9 – скважина ROK, Япония. Наклонными тонкими линиями показаны расчетные величины удельной плотности сейсмической энергии (e) в зависимости от величины магнитуды и эпицентрального расстояния землетрясений. Жирными прерывистыми линиями показаны величины одного (1L) и пяти (5L) максимальных линейных размеров очагов землетрясений по (Ризниченко, 1976).

стояний землетрясений до скважин d_e с учетом интенсивности сейсмического воздействия по величине удельной плотности сейсмической энергии e в районах наблюдений. Соответствующая диаграмма представлена на рис. 1.

При построении диаграммы (рис. 1) использовались примеры подобных диаграмм из работ (Wang, 2007; Wang, Manga, 2010), с помощью которых авторами анализировались явления разжижения водонасыщенных осадочных пород, ко- и постсейсмические процессы в поверхностных и подземных водах при воздействии сейсмических волн, излучаемых из очага землетрясения. Было показано, что величина e может использоваться в качестве метрической характеристики возникновения некоторых постсейсмических флюидодинамических процессов. В частности, разжижение

осадочных отложений, инициация нестационарной фильтрации подземных вод и проявления устойчивых (“sustained”) смещений уровня воды в скважинах в результате землетрясений контролируются определенными диапазонами величин e .

На рис. 1 проводится сопоставление проявлений гидрогеохимических предвестников в четырех сейсмоактивных регионах с параметрами последующих землетрясений M_w и d_e и их воздействием в районах наблюдений по величине e . Такой способ представления связи между ГГХП и параметрами землетрясений позволяет давать оценки величин магнитуды и удаленности ожидаемого землетрясения по данным о гидрогеохимическом предвестнике, а также интенсивности ожидаемого землетрясения в районах наблюдения гидрогеохимических аномалий. Ранее аналогичные по построению диаграммы приводились в работах (Копылова, Boldina, 2020, 2021) для оценки связи гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников землетрясений по данным наблюдений в скважинах на территории полуострова Камчатка. Диаграмма на рис. 1 представлена впервые для совокупности данных о ГГХП в четырех регионах с учетом особенностей их проявления в отдельных наблюдательных скважинах.

В работах (Tsunogai, Wakita, 1995; Wang, 2007; Wang, Manga, 2010, 2021 и др.) при оценке области проявления различных видов предвестников и постсейсмических эффектов используются понятия ближней (near), промежуточной (intermediate) и дальней (far) зоны очагов землетрясений. В работе (Копылова и др., 2020) эти понятия были конкретизированы и было принято, что расстояние (в км), отсчитываемое от эпицентра землетрясения и равное одному максимальному линейному размеру его очага ($1L$) ограничивает ближнюю область очага землетрясения, а расстояние $1L < d_e < (5-10)L$ ограничивает промежуточную область очага землетрясения. Соответственно, районы, расположенные на эпицентральных расстояниях $d_e > 10L$, находятся в дальней зоне очага землетрясения. Такое определение ближней, промежуточной и дальней зоны очагов землетрясений находится в соответствии с их качественными оценками (зона очага, несколько длин очага и более нескольких длин очага), данными в цитируемых работах. На рис. 1 показаны размеры областей, соответствующих одному ($1L$) и пяти ($5L$) линейным размерам очагов землетрясений, в зависимости от величины магнитуды землетрясения по (Ризниченко, 1976). По данным о ГГХП, приведенным в табл. 3 и на рис. 1, их проявления приурочены к ближней и средней зонам очагов землетрясений для которых величина $d_e/L = 0.4-8.1$.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАБЛЮДЕННЫХ ГГХП

Результаты анализа гидрогеохимических предвестников в четырех сейсмоактивных районах демонстрируют их связь с наиболее сильными землетрясениями (рис. 1), а также индивидуальные особенности проявлений ГГХП в отдельных скважинах. Последнее обстоятельство обуславливает необходимость создания моделей формирования гидрогеохимических предвестников для каждой наблюдательной скважины, в которой они проявлялись. Разработка таких моделей, названных концептуальными моделями формирования наблюдательных ГГХП, включает представление о ведущем механизме образования гидрогеохимического предвестника в водоносной системе и стволе наблюдательной скважины и описание процесса его формирования с использованием данных наблюдений (Копылова, Boldina, 2019, 2020, 2021).

В работе (Thomas, 1988) были рассмотрены пять гипотетических механизмов образования геохимических аномалий, возникающих при подготовке землетрясений. С привлечением данных лабораторных экспериментов и полевых наблюдений, автор пришел к заключению, что модель смешивания вод различного химического состава в подземных водоносных системах, гидравлически связанных со скважиной, является наиболее универсальной для объяснения гидрогеохимических аномалий в составе подземных вод. Авторы публикаций, в которых описываются ГГХП, также отводят этому процессу первостепенную роль. В частности, в работе (Skelton et al., 2019) с использованием геохимических методов, были обоснованы источники смешивания вод различного состава при образовании ГГХП в воде из скважин НУ01 и НА01 (табл. 1). В качестве таких источников рассматриваются метеорные воды, морские воды и изменение состава смешанных вод при взаимодействии с новообразованными (свежими) поверхностями в горных породах в результате микротрещинообразования на стадиях подготовки землетрясений.

Ниже рассматриваются примеры построения моделей, зарегистрированных ГГХП в скважинах М-1 и ГК-1 (табл. 1), которые функционировали в 1987–1998 гг. в условиях естественного самоизлива, и в которых однотипные ГГХП были зарегистрированы неоднократно (Копылова и др., 2020; Копылова, Boldina, 2020) (табл. 3).

Механизм и условия образования ГГХП. Образование аномалий химического состава воды и газа из скважин перед землетрясениями (табл. 2, 3) происходит в результате изменения условий смешивания вод разного состава в водоносной системе, питающей скважину. Причинами этого могут быть изменения гидродинамических условий в водоносной системе или изменения трещинно-

поровой емкости водовмещающих пород при развитии в них микротрещиноватости, а также возникновение других факторов, изменяющих физико-химическое взаимодействие подземных вод, газов и водовмещающих пород.

При создании модели гидрогеохимических аномалий, развивающихся в реальном времени, необходимо учитывать локальные геолого-гидрогеологические условия и технические особенности наблюдений (Корюлова, Boldina, 2019, 2021). Для каждой скважины необходимо оценить объем воды в ее стволе (V , м³) и время его разгрузки при свободном самоизливе ($T = 0.001V/Q$, с, здесь Q – дебит, дм³/с). Объем воды в стволе скважины обычно составляет от единиц до десятков м³, расход воды – от $n \times 0.01$ до $n \times 0.1$ дм³/с, здесь $n = 1, 2...9$. Таким образом, время полного водообмена в стволе скважины T может составлять от нескольких часов до первых лет. Величину T необходимо учитывать при оценке длительности развития гидрогеохимической аномалии в водоносной системе скважины, поскольку такая длительность может быть равной или превышающей величину T .

Для скважин М-1 и ГК-1 величины $V = 7.3$ и 16.2 м³ и $T = 1.0$ – 1.6 ч и 1.9 сут соответственно (Копылова, Болдина, 2012), и для них при построении модели гидрогеохимического предвестника, развивающегося в течение суток–десятков суток, временем полного водообмена в стволе скважины можно пренебречь. В то же время для скважин с временем полного водообмена T , равного первым годам, построение модели ГГХП за счет смешивания вод контрастного состава в водоносной системе является более сложным вопросом.

При создании модели аномальных изменений концентраций ионов в составе воды необходимо учитывать интервал отбора проб (Δt), относительную погрешность химического анализа отдельных компонентов состава воды – (Δ_i) и погрешность химического анализа состава воды в отобранных пробах (O).

Пусть x_i – аналитически определенная концентрация i -го компонента состава воды, мг/л; Δ_i – относительная погрешность определения x_i , %. В этом случае концентрация компонента X_i может принимать множество значений в диапазоне

$$X_i = x_i \pm 0.01\Delta_i x_i. \quad (1)$$

Вода в пробах из скважин представляет собой слабоминерализованный раствор, состоящий из воды и положительно и отрицательно заряженных ионов (катионов K^+ и анионов A^-). Когда концентрации A^- и K^+ выражены в ммоль/л, условие электрической нейтральности раствора выражается как

$$\Sigma K_i^+ = \Sigma A_j^-. \quad (2)$$

Формула (2) обычно служит критерием правильности определения ионного состава воды в отобранных пробах. Погрешность химического анализа ионного состава воды определяется соотношением $O = |\Sigma K^+ - \Sigma A^-| / (\Sigma K^+ + \Sigma A^-) \times 100\%$. Химический анализ считается правильным и может быть использован по назначению при $O \leq 5$ – 10% в зависимости от минерализации и сложности химического состава воды (Лаптев, Соколов, 1962).

Математическая модель. Гидродинамический анализ смешивания двух вод разного состава в зоне повышенной проницаемости (проводимости) в водовмещающих породах для фоновых и возмущенных условий впервые был рассмотрен в работе (Wang et al., 2004), в которой разработанный подход был применен для объяснения постсейсмического понижения электропроводности воды из скважины КАТ в Грузии. В работе (Копылова, Воробаев, 2006), предложенная в работе (Wang et al., 2004) математическая модель была адаптирована для анализа постсейсмических повышений концентрации хлорид-иона в воде Пиначевского источника на полуострове Камчатка. В указанных публикациях было показано, что в возмущенных условиях изменение величины индикаторного показателя химического состава воды (ИП), в частности, электропроводности или концентрации хлорид-иона в смешанной воде из скважины или источника, можно описать зависимостью:

$$\delta\sigma(t) = \pm\delta\sigma_0 \frac{e^{(-t/t_0)} - e^{(-t/\tau_0)}}{(1 - \tau_0/t_0)(\tau_0/t_0)^{\tau_0/(t_0 - \tau_0)}}, \quad (3)$$

где $\delta\sigma(t)$ – изменение величины ИП во времени (для ионов – концентрация, мг/л); $\pm\delta\sigma_0$ – амплитуда изменения ИП во время развития аномалии, “+” – при увеличении ИП, “положительная аномалия”, “–” – при уменьшении ИП, “отрицательная аномалия”; t_0 – продолжительность релаксации импульса давления в водоносной системе, сут; τ_0 – продолжительность течения смешанной воды в водоносной системе и в стволе скважины, сут.

Параметры t_0 и τ_0 характеризуют нарушенное гидродинамическое состояние водоносной системы, гидравлически связанной со скважиной, как при подготовке землетрясения, так и на постсейсмической стадии после динамического воздействия сейсмических волн. При этом величины t_0 и τ_0 могут принимать разные значения на пред- и постсейсмической стадиях.

При проявлении гидрогеохимической аномалии в изменениях нескольких показателей ионного состава воды из скважины величины $\delta\sigma_0$ для каждого аниона и катиона оцениваются по данным наблюдений. Величины t_0 и τ_0 определяются подбором при минимальном расхождении между

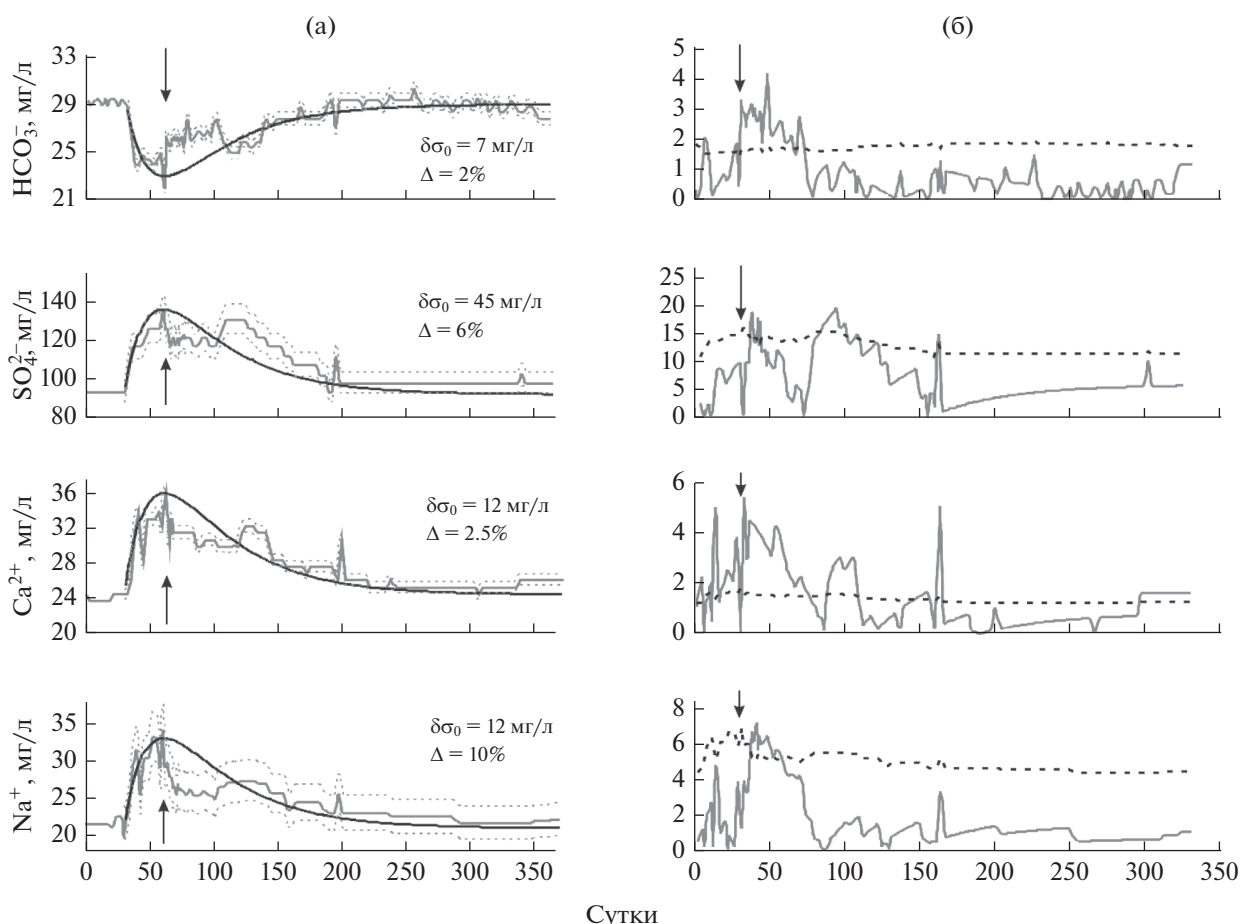


Рис. 2. Скважина М-1. (а) – изменения концентраций ионов HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ в воде из скважины при подготовке и реализации землетрясения 2 марта 1992 г. (вертикальная стрелка) и результаты расчетов проявления ГХП в изменениях отдельных ионов по (3) при $t_0 = 20$ дней и $\tau_0 = 50$ дней. Серые линии – данные наблюдений, серые пунктирные линии – границы интервалов концентраций с учетом относительной ошибки определения Δ_i по (1), черные линии – расчетные концентрации; $\delta\sigma_0$ – максимальная амплитуда изменения концентрации на стадии подготовки землетрясения, Δ – относительная ошибка аналитического определения концентрации иона. (б) – изменения абсолютных значений разности между измеренными и расчетными величинами концентраций (сплошные линии) в сравнении с двойной ошибкой определения Δ_i при определении каждой величины концентрации (пунктирная линия).

расчетными и наблюдаемыми значениями для всех ИП, например, для всех анионов и катионов в случае проявления аномалий в изменениях их концентраций перед землетрясением или после воздействия сейсмических волн.

Ниже с использованием изложенного подхода и формулы (3) рассматриваются концептуальные модели образования аномалий ионного состава воды из скважин М-1 (рис. 2) и ГК-1 (рис. 3) в период землетрясения 2 марта 1992 г., $M_w = 6.9$ (табл. 2, 3). Данные о локальных гидрогеологических условиях и химическом составе воды из этих скважин приводятся в табл. 1 и более подробно в работах (Копылова, Болдина, 2012; Копылова, Болдина, 2021).

Скважина М-1 глубиной 600 м вскрывает трещинно-жильные подземные воды в туфах миоценового возраста в интервалах 310–313, 407–410 и

553–556 м (табл. 1). Водовмещающие породы характеризуются повсеместной пропилитизацией и трещиноватостью.

Гидрогеохимическая аномалия перед землетрясением 2 марта 1992 г. (табл. 2, 3) проявилась в увеличении минерализации на 30% и в изменении гидрогеохимического типа воды из скважины за счет увеличения концентрации сульфат-иона и уменьшения концентрации гидрокарбонат-иона (рис. 2). Химический состав воды из скважины соответствовал формулам $M_{0.19}(\text{SO}_4 78 \text{HCO}_3 20) / (\text{Ca} 56 \text{Na} 44)$ – в фоновых условиях, т.е. до проявления предвестниковой аномалии; $M_{0.25}(\text{SO}_4 87 \text{HCO}_3 11) / (\text{Ca} 55 \text{Na} 45)$ – на экстремальной стадии предвестниковой аномалии; концентрации анионов и катионов выражены в % ммоль/л, $M_{0.19}$ – минерализация воды, г/л. Ошибки химического анализа отдельных проб

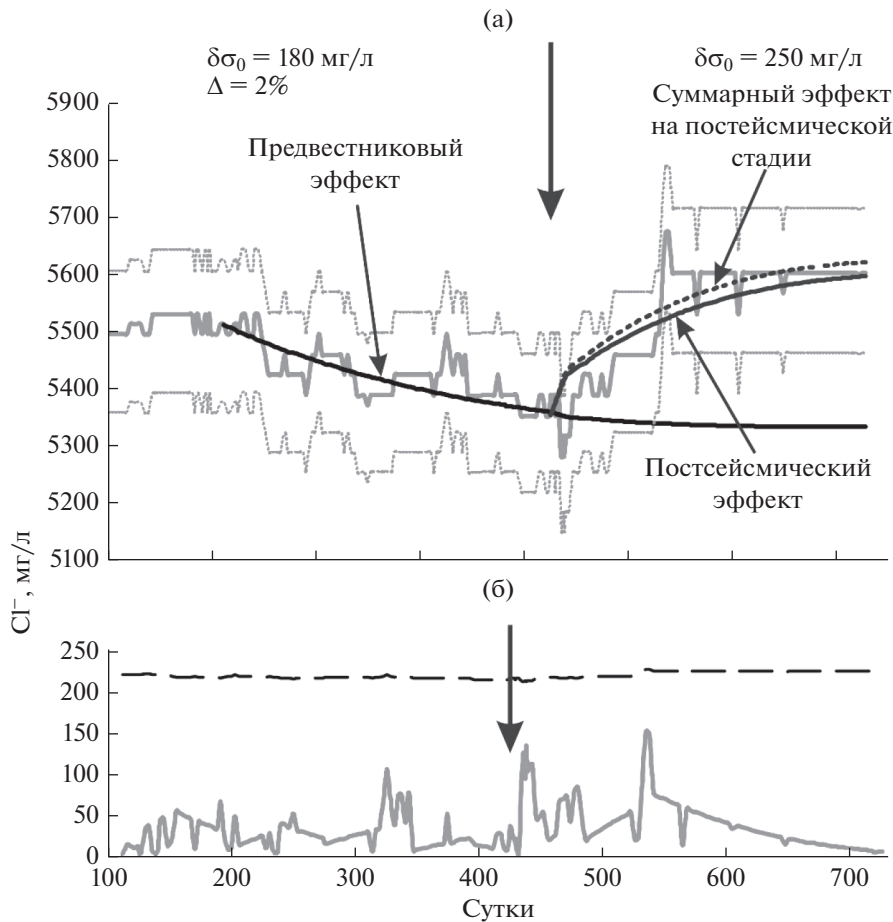


Рис. 3. Скважина ГК-1. (а) — изменение концентрации SiO_2 в воде из скважины на пред- и постсейсмической стадиях землетрясения 2 марта 1992 г. (черная вертикальная стрелка) и результаты расчетов предвестникового эффекта ($t_0 = 120$ дней, $\tau_0 = 350$ дней) и постсейсмического эффекта ($t_0 = 90$ дней, $\tau_0 = 200$ дней) по (3); серая сплошная линия — данные наблюдений, серая прерывистая линия — границы интервала концентраций SiO_2 с учетом относительной ошибки определения Δ_i по (1); черные сплошные линии — расчетные изменения концентрации SiO_2 на предвестниковой и постсейсмической стадиях; черная прерывистая линия — суммарный эффект двух процессов на постсейсмической стадии. (б) — изменение абсолютных величин разности между измеренными концентрациями SiO_2 и расчетными значениями (сплошная линия) в сопоставлении с двойной ошибкой определения каждого значения концентрации SiO_2 (прерывистая линия).

воды составляли $O = 1-6\%$. Относительные ошибки определения концентраций отдельных ионов $\Delta_i = 2-10\%$ (Хаткевич, Рябинин, 2004).

На рис. 2а представлены изменения концентраций четырех главных ионов в составе воды и результаты расчета по (3) с учетом относительных ошибок химического анализа каждого иона в отдельных пробах по (1). Удовлетворительное соответствие между расчетными и наблюдаемыми данными по четырем ИП было получено для значений $t_0 = 20$ сут и $\tau_0 = 50$ сут.

Как видно на рис. 2б, имеется некоторое расхождение между расчетными и наблюдаемыми величинами концентраций четырех ионов в течение первых десятков суток после землетрясения. Причиной такого эффекта является наложение воздействия сейсмических сотрясений интенсив-

ностью $I_{MSK-64} = 5-6$ баллов при землетрясении 2 марта 1992 г. (табл. 3) на развитие гидрогеохимической аномалии, вызванной подготовкой землетрясения. Сейсмические сотрясения вызвали относительное увеличение концентрации HCO_3^- и уменьшение концентраций SO_4^{2-} , Ca^{2+} и Na^+ (рис. 2а), по сравнению с развитием предвестникового эффекта в их изменениях. Это показывает, что эволюция ионного состава воды в скважине М-1 на постсейсмической стадии была противоположной, по сравнению с предвестниковым эффектом.

Скважина ГК-1 вскрывает минерализованные воды в диапазоне глубин 400–1261 м в слаботрециноватых плиоценовых андези-базальтовых туфах и позднемиловых алевролитах и сланцах



Рис. 4. Скважина М-1. Схема формирования ионного состава воды. (а) – строение скважины и ее водоносной системы: пунктирные линии – границы участков перфорации ствола; горизонтальные стрелки – направление поступления смешанной воды в ствол скважины; С – концентрация ионов в воде из скважины. (б) – фрагмент водоносной системы в среде с двойной пористостью: C_1 – концентрация индикаторного показателя в воде из “трещин”, C_2 – из “блоков”.

(табл. 1). Химический состав воды из скважины соответствовал формуле $M_{10}Cl_{98}/(Na_{68} Ca_{27})$.

На стадии подготовки землетрясения аномалия проявлялась в понижении концентрации Cl^- на 180 мг/л (рис. 3а) или на 3% по отношению к

фоновой концентрации. После землетрясения, концентрация Cl^- повышалась.

В изменениях концентраций Na^+ и Ca^{2+} эффект подготовки землетрясения был выражен слабо и это не позволяло использовать в расчетах данные по катионам. Поэтому расчет ГГХП по (3) проводился только по изменениям концентрации Cl^- , отдельно для предвестникового и постсейсмического эффектов (рис. 3а). В случае скважины ГК-1 слабое изменение концентраций катионов Na^+ и Ca^{2+} на стадии подготовки землетрясения понижает достоверность результатов расчетов величин t_0 и τ_0 для этой скважины по сравнению со скважиной М-1.

Оценка ионного состава смешивающихся вод в водоносной системе скважины М-1

Наличие данных наблюдений по проявлению гидрогеохимического предвестника в изменениях концентраций всех четырех главных компонентов ионного состава воды из скважины М-1 (рис. 2а) позволило оценить составы смешивающихся воды в водоносной системе скважины на стадии подготовки землетрясения 2 марта 1992 г. (Копылова, Болдина, 2012; Копылова, Boldina, 2021). Для обоснования источников контрастных по составу вод в водоносной системе скважины использовалось представление о ее водоносной системе, как о среде с двойной пористостью (Баренблатт, Желтов, 1960) (рис. 4). В такой среде основной поток подземной воды сосредоточен в крупных взаимосвязанных трещинах, которые разделяют слабопроницаемые блоки, содержащие воду с другим ионным составом и повышенной минерализацией (рис. 4б).

В фоновых условиях химический состав смешанной воды из скважины (С) является стабильным вследствие стационарного режима водообмена между трещинами и блоками. При подготовке землетрясения гидродинамические условия в водоносной системе изменяются и стационарный режим водообмена нарушается. Изменение гидродинамических условий сопровождается изменением в соотношении смешивающихся вод в водоносной системе и, соответственно, изменением ионного состава смешанной воды, изливающейся из скважины (рис. 2а).

Для расчета составов двух смешивающихся вод принимались линейные условия смешивания в водоносной системе: $C = nC_1 + mC_2$, $n + m = 1$, где С – концентрация ИП в смешанной воде (рис. 4а), C_1 – концентрация ИП в “трещинах”, C_2 – концентрация ИП в “блоках” (рис. 4б), n и m – доли воды из “трещин” и “блоков” в смешанной воде. Фоновый режим водообмена соответствует условию $n > m$.

Таблица 4. Составы смешивающихся вод в водоносной системе, скважина М-1 (см. рис. 2, 4 и текст)

Соотношение долей смешивающихся вод в фоновых условиях $n : m$	C_1 , химический состав воды из “трещин”	C_2 , химический состав воды из “блоков”	Соотношение долей смешивающихся вод на стадии проявления гидрогеохимического предвестника $n' : m'$
0.9 : 0.1	$M_{0.17}(\text{SO}_4 72 \text{ HCO}_3 25) / (\text{Ca} 53 \text{ Na} 46)$	$M_{0.37}(\text{SO}_4 97 \text{ HCO}_3 2) / (\text{Ca} 66 \text{ Na} 34)$	0.6 : 0.4
0.87 : 0.13	$M_{0.17}(\text{SO}_4 71 \text{ HCO}_3 25) / (\text{Ca} 57 \text{ Na} 42)$	$M_{0.34}(\text{SO}_4 96 \text{ HCO}_3 3) / (\text{Ca} 53 \text{ Na} 46)$	0.5 : 0.5
0.8 : 0.2	$M_{0.16}(\text{SO}_4 71 \text{ HCO}_3 26) / (\text{Ca} 56 \text{ Na} 43)$	$M_{0.32}(\text{SO}_4 90 \text{ HCO}_3 8) / (\text{Ca} 54 \text{ Na} 45)$	0.2 : 0.8
0.7 : 0.3	$M_{0.14}(\text{SO}_4 65 \text{ HCO}_3 31) / (\text{Ca} 56 \text{ Na} 43)$	$M_{0.30}(\text{SO}_4 90 \text{ HCO}_3 8) / (\text{Ca} 55 \text{ Na} 44)$	0.2 : 0.8

Граничные величины концентраций C_1 и C_2 (в мг/л) в смешанной воде оценивались по данным наблюдений. Использовались следующие величины: для $\text{HCO}_3^- - C_1 > 31.2$ и $C_2 < 22$, для $\text{SO}_4^{2-} - C_1 < 77$ и $C_2 > 134.5$, для $\text{Na}^+ - C_1 < 21$ и $C_2 > 34.2$, для $\text{Ca}_2^+ - C_1 < 23$ и $C_2 > 36$ (рис. 2 а). Также принималось условие электрической нейтральности всех трех вод (2) и ошибки химического анализа $O \leq 6\%$. Полученные при таких ограничениях расчетные составы смешивающихся вод приведены в табл. 4.

Оценки долей смешивающихся вод при стационарном режиме водообмена были получены для значений n в диапазоне 0.9–0.7 и $m = 0.1–0.3$. Для возмущенных условий доли смешивающихся вод составили $n' : m' = (0.6–0.2) : (0.4–0.8)$. Выполненные расчеты (табл. 4) показывают, что в “трещинах” присутствует гидрокарбонатно-сульфатная натриево-кальциевая вода с минерализацией 0.14–0.17 г/л, а в “блоках” – сульфатная натриево-кальциевая вода с минерализацией 0.30–0.37 г/л. Гидрогеохимический предвестник в воде из скважины М-1 (рис. 2а) образовался в результате увеличения в ней доли воды из “блоков” и уменьшения доли воды из “трещин”. Сейсмические сотрясения при землетрясении 2 марта 1992 г. вызвали относительное увеличение доли воды из “трещин”, которые наложились на развитие предвестниковой аномалии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

О связи ГГХП с параметрами землетрясений. При введенных выше ограничениях по методу получения данных о ГГХП (периодичность наблюдений, определение комплекса параметров состава воды) в научной литературе обнаружено весьма немного примеров проявлений ГГХП в изменениях ионного и газового состава подземных вод. Если рассматривать работу (Thomas, 1988) в качестве первого обобщения мировых сведений о геохимических предвестниках, то в течение последующих примерно тридцати лет сохраняется ситуа-

ция с недостаточным фактологическим обеспечением исследований гидрогеохимических предвестников, их связи с параметрами землетрясений и использованием для сейсмического прогнозирования. Опубликованные в последнее время работы по Китаю, Корею и Италии (https://www.mdpi.com/journal/water/special_issues/earthquakes_groundwater) не проясняют вопрос значимости гидрогеохимических предвестников для прогнозирования землетрясений, т. к. посвящены, в основном, описаниям сейсмических, гидрогеологических и гидрогеохимических условий в районах тектонических разломов и намерениям проводить режимные гидрогеохимические наблюдения в таких районах в целях поиска предвестников землетрясений.

Рассмотренные примеры проявления ГГХП из четырех сейсмоактивных регионов с использованием уточненных и унифицированных данных о параметрах землетрясений показали, что такие предвестники проявлялись в течение времени от менее одного до девяти месяцев перед землетрясениями с $M_w = 5.3–7.8$ на эпицентральных расстояниях $d_e = 20–300$ км (табл. 2, 3, рис. 1). Такие землетрясения были наиболее сильными сейсмическими событиями и сопровождалась сотрясениями интенсивностью от 4 до 8 баллов по шкале MSK-64. В районах проявления ГГХП плотность сейсмической энергии при последующих землетрясениях изменялась в пределах пяти порядков $e = 0.003–66$ Дж/м³, расчетные величины максимальной скорости сейсмических волн составляли $V = 1–75$ см/с, объемная косейсмическая деформация водовмещающих пород – $(0.2–137) \times 10^{-9}$ (табл. 3). Гидрогеохимические предвестники проявлялись в скважинах, расположенных в ближней и промежуточных зонах очагов землетрясений, для которых отношение эпицентрального расстояния к максимальному линейному размеру очага $d_e/L = 0.4–8.1$ (табл. 3, рис. 1)

Представленные данные могут использоваться в сейсмопрогностических целях при проявлениях гидрогеохимических предвестников, а также в исследованиях поведения природных гидрогео-

логических и гидрогеохимических систем при подготовке и реализации землетрясений, а также других полей Земли, связанных с изменениями в водонасыщенной среде сейсмоактивных регионов.

О практическом применении концептуальных моделей ГГХП. По развитию наблюдаемой аномалии в изменениях концентраций ионов в воде из скважины и с использованием формулы (3) могут оцениваться параметры возмущенного гидродинамического состояния водоносной системы, питающей скважину, на стадии подготовки землетрясения: t_0 — время релаксации импульса давления подземных вод и τ_0 — время движения смешанной воды аномального состава в водовмещающих породах и в стволе скважины. Морфология (форма) и продолжительность развития ГГХП в изменениях состава воды из наблюдательной скважины определяются соотношением параметров t_0 и τ_0 . С использованием совокупности данных режимных наблюдений, данных о строении скважин, локальных гидрогеологических и гидрогеохимических условиях и формулы (3) были построены модели предвестников и постсейсмических эффектов землетрясения 2 марта 1992 г. для скважин М-1 (рис. 2) и ГК-1 (рис. 3). Было обнаружено, что параметры t_0 и τ_0 могут значительно отличаться для различных скважин даже при подготовке одного и того же землетрясения.

Продемонстрированные модели зарегистрированных ГГХП на примере двух скважин (рис. 2, 3), также как и ранее созданные модели постсейсмических эффектов в изменениях электропроводности (Wang et al., 2004) и концентрации хлорид-иона (Копылова, Воропаев, 2006) в подземной воде, показывают широкие возможности механизма смешивания вод с контрастным химическим составом и математической модели (3) для объяснения гидрогеохимических предвестников и других эффектов сейсмичности в изменениях состава подземной воды из скважин и источников.

Рассмотрим изменения во времени индикаторного показателя (ИП) по (3) для различных величин t_0 и τ_0 (рис. 5). По вертикальной оси показаны величины ИП в долях максимальной амплитуды аномалии $|\delta\sigma_0|$, взятой за единицу. Из приведенных графиков следует, что при малых значениях t_0 , τ_0 (рис. 5а) и относительно большой периодичности наблюдений Δt гидрогеохимический предвестник зарегистрирован не будет или представление о его форме будет искажено. Например, гидрогеохимическая аномалия в скважине М-1 (рис. 2а) по морфологическим признакам ранее классифицировалась как “импульсная” (Копылова и др., 1994) или “скачкообразная” (Рябинин, Хаткевич, 2009). Причиной неверных суждений была относительно “большая” периодичность наблюдений $\Delta t = 3$ сут, которая не позволяла корректно оценить форму аномалии по

временным рядам данных. В то же время, такая периодичность наблюдений оказалась достаточной для оценки нормальной “бухтообразной” формы предвестниковой и постсейсмической аномалий в изменениях хлорид-иона в воде скважины ГК-1 (рис. 3а), а также постсейсмических аномалий в изменениях хлорид-иона в воде Пиначевского источника (Копылова, Воропаев, 2006).

Соотношение между амплитудой аномалии $\delta\sigma_0$ и ошибкой химического анализа Δ_i также необходимо учитывать при выделении гидрогеохимических предвестников в изменениях отдельно-го компонента ионного состава воды.

Если

$$\delta\sigma_0 \leq |(\sigma_2 \pm 0.01\Delta_i \times \sigma_2) - (\sigma_1 \pm 0.01\Delta_i \times \sigma_1)|, \quad (4)$$

где σ_1 — аналитически определенная концентрация иона в фоновых условиях, σ_2 — экстремальная (максимальная или минимальная) его концентрация на стадии аномалии, то выделение такой аномалии является невозможным.

В случае

$$\delta\sigma_0 > |(\sigma_2 \pm 0.01\Delta_i \times \sigma_2) - (\sigma_1 \pm 0.01\Delta_i \times \sigma_1)|, \quad (5)$$

гидрогеохимическая аномалия может быть идентифицирована во временном ряду при достаточной периодичности наблюдений Δt .

Предположим, что периодичность наблюдений составляет $\Delta t = 3-10$ сут и условие (5) выполняется при величине $|\delta\sigma| \geq 0.7$. В этом случае большая часть аномалий на рис. 5а, 5б не будет зарегистрирована или будет проявляться во временных рядах в виде отдельных всплесков значений. И только при величинах параметров t_0 и τ_0 , соответствующих рис. 5в, аномалии в изменениях концентраций ионов могут быть адекватно выделены во временных рядах при периодичности наблюдений $\Delta t = 3-10$ сут.

Приведенные выше оценки развития ГГХП (рис. 5) в зависимости от параметров времени возмущенного гидродинамического состояния водоносной системы (t_0 , τ_0) с наличием источников контрастных по химическому составу подземных вод, а также разнообразие гидрогеологических обстановок формирования ГГХП и технических условий проведения наблюдений, показывают необходимость совершенствования методологии исследований, направленных на регистрацию и изучение гидрогеохимических эффектов сейсмичности в подземных водах. Для этого необходимо внедрять автоматизированные системы наблюдений на скважинах и источниках для прецизионной регистрации концентраций отдельных компонентов химического состава воды и газа, а также интегральных показателей химического состава воды, таких как соленость и электропроводность, с частотой не менее одного измерения в час.

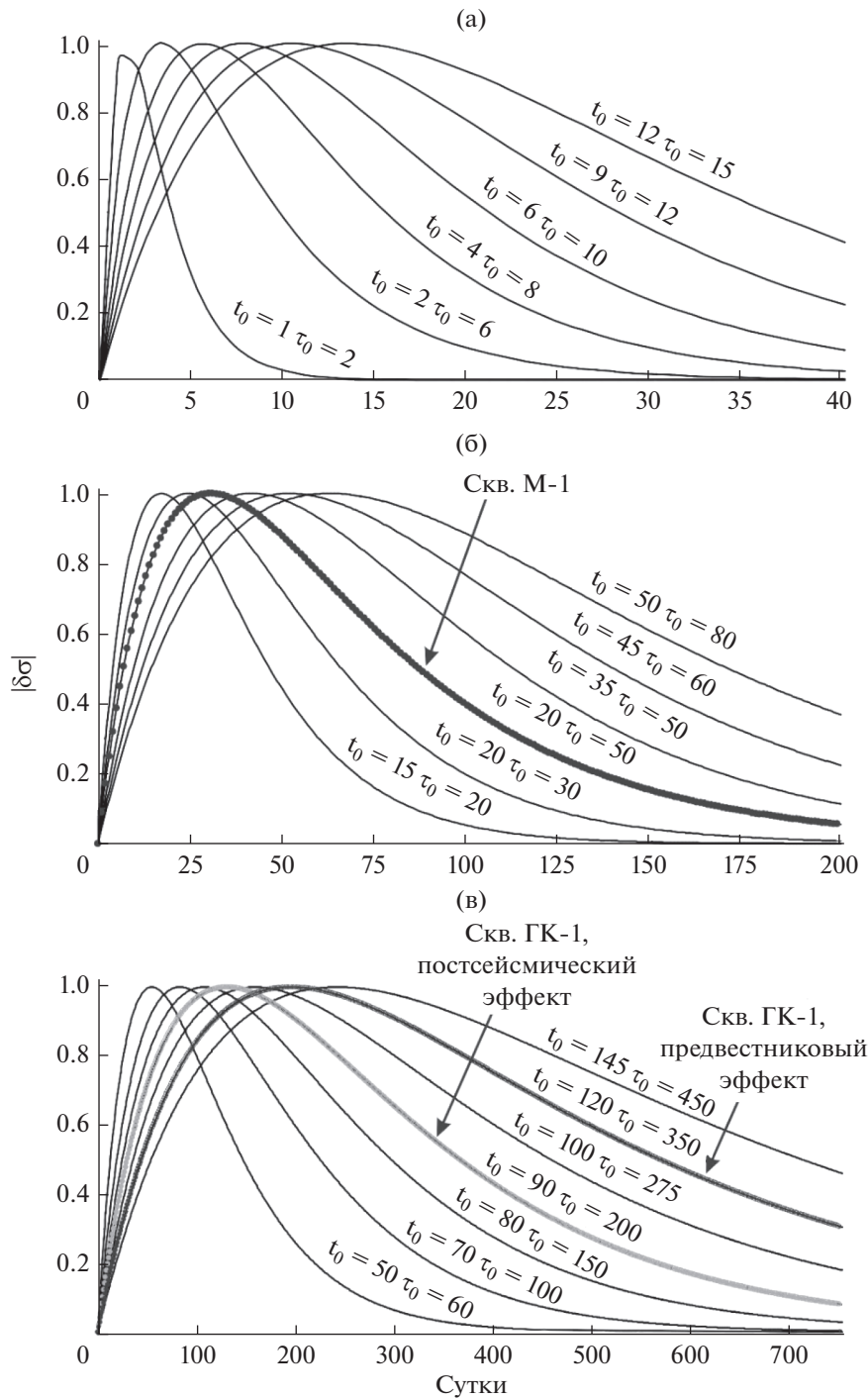


Рис. 5. Изменение концентрации индикаторного показателя в воде при проявлении ГТП, рассчитанное по зависимости (3) при величине $|\delta\sigma_0| = 1$ для разных значений параметров t_0 и τ_0 : $t_0 = 1-12$ сут, $\tau_0 = 2-15$ сут (а); $t_0 = 15-50$ сут, $\tau_0 = 20-80$ сут (б); $t_0 = 50-145$ сут, $\tau_0 = 60-450$ сут (в).

Отметим очевидные трудности экспериментальной и теоретической проверки гипотетических предположений о механизмах образования гидрогеохимических предвестников из-за недостаточного обеспечения полного комплекса данных о физико-химических параметрах подзем-

ных вод при проведении режимных наблюдений. Для построения адекватных моделей необходимо учитывать данные по всем компонентам ионного состава воды, состава газов, рН, температуре и гидродинамическим параметрам для оценки влияния вариаций давления и разгрузки подземных

вод на изменения гидрогеохимических показателей под влиянием землетрясений. В условиях неполноты набора физико-химических параметров подземных вод будет иметь место неопределенность в поведении гидрогеохимической системы во время подготовки землетрясения. Не менее значимую роль в изучении гидрогеохимических предвестников имеют условия проведения наблюдений. В случае скважин с нарушенным (техногенным) режимом функционирования могут возникать неопределенности в разделении вариаций гидрогеохимических параметров, связанных с эксплуатацией подземных вод, и вариаций, вызванных процессом подготовки землетрясения.

Гидрогеохимические предвестники землетрясения 2 марта 1992 г., $M_w = 6.9$ в изменениях химического состава воды и газа в скважинах М-1 и ГК-1 являются одним из наиболее изученных и достоверных примеров их проявления. Они описаны во множестве работ (Копылова и др., 1994; Хаткевич и др., 1994, 2004; Bella et al., 1998; Biagi et al., 2000, 2000a, 2000b, 2001; Kingsley et al., 2001; Корулова, Boldina, 2020, 2021). Землетрясение 2 марта 1992 г. было одним из наиболее сильных сейсмических событий в районе Петропавловск-Камчатского полигона по своему воздействию в районах наблюдательных скважин М-1 и ГК-1 (табл. 3).

На примере скважины М-1 (рис. 2), с использованием данных наблюдений, продемонстрирована возможность построения концептуальной модели зарегистрированного гидрогеохимического предвестника этого землетрясения. В данном случае, предвестниковая аномалия объясняется изменением в смешивании двух вод с различным химическим составом, содержащихся в крупных взаимосвязанных трещинах и в относительно слабопроницаемых блоках водовмещающих пород (рис. 4). Благодаря выполненной оценке химических составов смешивающихся вод (табл. 4), было обнаружено, что при подготовке землетрясения в смешанной воде из скважины примерно в течение одного месяца происходило увеличение доли воды сульфатного состава с повышенной минерализацией из слабопроницаемых блоков и понижение доли воды сульфатно-гидрокарбонатного состава с пониженной минерализацией из системы трещин. Наиболее вероятным механизмом такого процесса является улучшение гидравлической связи системы трещин со слабопроницаемыми блоками за счет развития микротрещиноватости в плотных неогеновых туфах, слагающих “блоки”. Альтернативным механизмом изменения условий смешивания двух вод может быть неравномерное (локализованное) распределение вариаций флюидного давления в “трещинах” и “блоках” на стадии подготовки землетрясения и соответствующее перераспределение расходов взаимодействующих потоков подземных вод в сторону увеличения поступле-

ния в ствол скважины воды из “блоков”. В этом случае соотношение между смешивающимися водами также может нарушаться, и будет происходить изменение химического состава изливающейся воды.

В случае скважины М-1 предвестниковая аномалия отчетливо проявлялась в изменениях всех четырех макрокомпонентов ионного состава воды (рис. 2). Именно это обстоятельство позволило оценить составы смешивающихся вод в водоносной системе скважины. Создание концептуальной модели зарегистрированного ГГХП в данном случае оказалось возможным из-за благоприятного сочетания между периодичностью наблюдений $\Delta t = 3$ сут и продолжительностью гидрогеохимической аномалии в изменениях временных рядов концентраций главных анионов и катионов (примерно 26 суток, 8 измерений).

Воздействие сейсмических волн при землетрясении 2 марта 1992 г. сопровождалось сотрясениями земной поверхности интенсивностью $I_{MSK-64} = 5-6$ баллов в районе скважины и динамическими вариациями давления подземных вод. В результате произошло увеличение поступления слабоминерализованной воды из трещин в ствол скважины, который является зоной пониженного давления из-за постоянной разгрузки трещинно-жильных вод. К сожалению, при периодичности наблюдений $\Delta t = 3$ сут, расчет параметров постсейсмического эффекта в изменении ионного состава воды из скважины М-1 не представляется возможными. Попытки расчета кратковременных предвестниковых эффектов в ионном составе воды из этой скважины до землетрясений 1987–1996 гг. с $M_w = 6.5-7.5$ (табл. 3) также не увенчались успехом из-за очевидного технического недостатка системы наблюдения – слишком большой периодичности наблюдений в трое суток. Вместе с тем, общий характер предвестниковых аномалий во всех пяти случаях их проявления в скважине М-1 был одинаковым – увеличение концентраций сульфат-иона, натрия и кальция и уменьшение концентрации гидрокарбонат-иона. Это позволяет утверждать, что на стадиях подготовки всех пяти землетрясений в скважине М-1 проявлялся единый механизм инициации гидрогеохимического предвестника за счет увеличения притока сульфатных вод с повышенной минерализацией из слабопроницаемых блоков в трещинную систему.

В скважине ГК-1 при подготовке землетрясения 2 марта 1992 г. наблюдалось уменьшение концентрации хлорид-иона в течение девяти месяцев. В результате воздействия сейсмических волн произошло повышение концентрации хлорид-иона (рис. 3).

Концентрация хлорид-иона в составе воды составляет более 50% от ее общей минерализации,

поэтому можно полагать, что перед землетрясением 2 марта 1992 г., также, как и перед другими сильными землетрясениями (табл. 3), вблизи ствола скважины на глубинах ниже 400 м происходило разбавление минерализованных хлоридных натриево-кальциевых вод относительно низкоминерализованными водами с пониженной концентрацией хлорид-иона (Хаткевич, Рябинин, 2004; Копылова и др., 2018). Кроме этого, в течение двух месяцев перед землетрясением 2 марта 1992 г. проявилась аномалия в составе свободного газа из скважины ГК-1 в увеличении доли газов воздушного происхождения и в уменьшении доли “глубинных” газов – метана, гелия и углекислого газа (Копылова и др., 1994, 2020; Kopylova, Boldina, 2020). Характер аномалии в составе свободного газа и совокупность данных по вариациям хлорид-иона в воде из скважины позволяют предполагать, что на стадии подготовки землетрясения происходил рост проницаемости приповерхностной толщи горных пород и увеличение в воде из скважины доли низкоминерализованных преимущественно гидрокарбонатных вод из приповерхностных водоносных горизонтов. Динамическая деформация водовмещающих пород и возмущение гидродинамического режима при воздействии сейсмических волн сопровождалось увеличением доли глубинной минерализованной воды хлоридного состава в воде из скважины ГК-1.

Сопоставление времени развития гидрогеохимических предвестников землетрясения 2 марта 1992 г. в скважинах М-1 (рис. 2) и ГК-1 (рис. 3) по величинам t_0 и τ_0 показывает их существенное различие и указывает на очевидные особенности процессов формирования гидрогеохимических предвестников в двух скважинах. Это также является важным аргументом для разработки концептуальных моделей ГГХП для отдельных наблюдаемых скважин.

Работа выполнена по проекту РФФИ № 20-15-50082_Экспансия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П. (1960) Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. *ДАН СССР*. **132**(3), 545-548.
- Барсуков В.Л., Серебренников В.С., Варшал Г.М., Гаранин А.В. (1979) Геохимические методы прогноза землетрясений. *Геохимия*. (3), 323-337.
- Гидрогеохимические предвестники землетрясений (1985). М.: Наука, 286 с.
- Киссин И.Г., Пиннекер Е.В., Ясько В.Г. (1982) *Подземная гидросфера и сейсмические процессы. Основы гидрогеологии. 4. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах*. Новосибирск: Наука, 57-78.
- Киссин И.Г., Стклянин Ю.И. (1985) *О формировании гидрогеохимических предвестников землетрясений. Гидрогеохимические предвестники землетрясений*. М.: Наука, 23-29.
- Копылова Г.Н. (2001) Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.). *Вулканология и сейсмология*. (2), 39-52.
- Копылова Г.Н. (2006) Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод. *Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле*. **7**(1), 50-66.
- Копылова Г.Н., Воропаев П.В. (2006) Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод. *Вулканология и сейсмология*. (5), 42-48.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В. (2012) Аномальные изменения химического состава подземных вод в связи с Камчатским землетрясением 02.03.1992 г. ($M_w = 6.9$). *Геофизические исследования*. **13**(1), 39-49.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В. (2019) Гидрогеоэсейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017. *Вулканология и сейсмология*. (2). 3-20.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В. (2020) Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели. *Физика Земли*. (4). 102-122.:
- Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В. (2018) Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений. *Вулканология и сейсмология*. (4), 43-62.
- Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. (2010) О возможности оценок косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений в скважине. *Физика Земли*. (1), 51-61.
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. (1994) Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений. *Вулканология и сейсмология*. (2), 53-37.
- Копылова Г.Н., Таранова Л.Н. (2013) Сигналы синхронизации в изменениях химического состава подземных вод Камчатки в связи с сильными ($M_w \geq 6.6$) землетрясениями. *Физика Земли*. (4), 135-144.
- Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю. (2019) Гидрогеохимические предвестники землетрясений (по данным наблюдений на полуострове Камчатка и в Узбекистане). *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. [Электронный ресурс]: Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5 октября 2019 г.* (Отв. ред. Д.В. Чебров). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 282-286.
- Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю., Болдина С.В. (2020) Гидрогеохимические предвестники землетрясений (на примере районов полуострова Камчатка, Россия, и Республики Узбекистан). *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. **48**(4), 5-20.
- Лаптев Ф.Ф., Соколов И.Ю. (1962) *Сведения по химии подземных вод. Справочник гидрогеолога. (Под ред. М.Е. Альтовского)*. М.: Госгеолтехиздат, 165-229.

- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. (1965) *Шкала сейсмической интенсивности MSK-64*. М.: МГК АН СССР, 11 с.
- Ризниченко Ю.В. (1976) *Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений*. М.: Наука, 9-27.
- Рикитакэ Т. (1979) *Предсказание землетрясений*. М.: Мир, 388 с.
- Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М. (2009) Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. **13**(1), 107-122.
- Уломов В.И., Мавашев Б.З. (1967) О предвестнике сильного тектонического землетрясения. *ДАН СССР*. **176**(2), 319-321.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О. (2018) *Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения*. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 148 с.
- Хаткевич Ю.М. (1994) О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше пяти баллов, проявляющихся в г. Петропавловске-Камчатском. *Вулканология и сейсмология*. (1), 63-67.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. (2004) Гидрогеохимические исследования на Камчатке. *Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки* (Отв. ред. Е.И. Гордеев, В.Н. Чебров). Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 96-112.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. (2013) Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. *Вулканология и сейсмология*. (1), 18-40.
- Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. (2020) Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции. *Геофизические исследования*. **21**(3), 66-91.
- Шебалин Н.В. (1968) *Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. Сейсмическое районирование СССР. (II). Гл. 6*. М.: Наука.
- Юсупов Ш.С., Нурматов У.А., Шин Л.Ю. и др. (2014) Аномальные вариации гидрогеосейсмологических параметров в период возникновения Туябугузского и Маржанбулакского землетрясений 25 и 26 мая 2013 г. *Доклады АН РУз: ФАН*. (6), 38-40.
- Barberio, M. D., Barbieri, M., Billi, A., Doglioni, C., and Petitta, M. (2017) Hydrogeochemical changes before and during the 2016 Amatrice-Norcia seismic sequence (central Italy). *Scientific Reports*. **7**(1), 11735.
- Bella F., Biagi P.F., Caputo M., Cozzi E., Della Monica G., Ermini A., Gordeev E.I., Khatkevich Y.M., Martinelli G., Plastino W., Scandone R., Sgrigna V., and Zilpimiani D. (1998) Hydrogeochemical anomalies in Kamchatka (Russia). *Phys. Chem. Earth*. **23**(9-10), 921-925.
- Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P., Khatkevich Y.M. and Gordeev E.I. (2000) Possible precursors in groundwater ions and gases content in Kamchatka (Russia). *Phys. Chem. Earth. (A)*. **25**(3), 295-305.
- Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. (2000a) Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia). *Pageoph*. **157**, 1359-1377.
- Biagi P.F., Ermini A., Cozzio E., Khatkevich Y.M. and Gordeev E.I. (2000b) Hydrogeochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988-1997. *Natural Hazard*. **21**, 263-276.
- Biagi P.F., Piccolo R., Ermini A., Fujinawa Y., Kingsley S.P., Khatkevich Y.M., and Gordeev E.I. (2001) Hydrogeochemical precursors of strong earthquakes in Kamchatka: further analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. **1**(1-2), 9-14.
- Boschetti T., Barbieri M., Barberio M.D., Billi A., Frondini S. and Petitta M. (2019). CO₂ inflow and elements desorption prior to a seismic sequence, Amatrice-Norcia 2016, Italy. *Geochem. Geophys.* **20**, 2303-2317.
- Chiodini G., Cardellini C., Di Luccio F., Selva G., Frondini F., Caliro S., Rosiello A., Beddini G. and Ventura G. (2020). Correlation between tectonic CO₂ Earth degassing and seismicity is revealed by a 10-year record in the Apennines, Italy. *Sci. Adv.* **6**, eabc2938.
- Cicerone R.D., Ebel J.E., Britton J. (2009). A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics* **476**, 371-396.
- Ingebritsen S.E., Galloway D.L., Colvard E.M., Sorey M.L., Mariner R.H. (2001) Time-variation of hydrothermal discharge at selected sites in the western United States: implications for monitoring. *J. Volcanology and Geothermal Research*. **111**, 1-23.
- Ingebritsen S., Manga M. (2014). Earthquakes: Hydrogeochemical precursors. *Nature Geoscience*. **7**(10), 697-698.
- Jordan T.H., Chen Y-T., Gasparini P., Madariaga R., Main I., Marzocchiet W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J. (2011) Operational earthquake forecasting. State of knowledge and guidelines for utilization. ICEF Final Report 30 May 2011. *Annals of Geophysics*. **54**(4), 315-391.
- Kingsley S.P., Biagi P.F., Piccolo R., Capozzi V., Ermini A., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I. (2001) Hydrogeochemical precursors of strong earthquakes: a realistic possibility in Kamchatka. *Phys. Chem. Earth (C)*. **26**(10-12), 769-774.
- Kopylova G., Boldina S. (2019) Anomalies in groundwater composition caused by earthquakes: examples and modeling issues. *E3S Web of Conferences*. **98**, 01029.
- Kopylova G. and Boldina S. (2020) Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula. *Front. Earth Sci.* **8**:576017.
- Kopylova, G., Boldina, S. (2021) Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model. *Minerals*. **11**, 731.
- Martinelli G. (2020) Previous, current, and future trends in research into earthquake precursors in geofluids. *Geosciences*. **10**(5), 189.
- Martinelli G., Facca G., Genzano N., Gherardi F., Lisi M., Pierotti L. and Tramutoli V. (2020a) Earthquake-Related Signals in Central Italy Detected by Hydrogeochemical and Satellite Techniques. *Front. Earth Sci.* **8**:584716.

- Okada Y. (1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **75**(4), 1135-1154.
- Reddy D., Nagabhushanam P., Sukhija B.S. (2011). Earthquake (M 5.1) induced hydrogeochemical and $\delta^{18}\text{O}$ changes: Validation of aquifer breaching – Mixing model in Koyana, India. *Geophysical J. International*. **184**(1), 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. (2014) Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland. *Nature Geoscience*. **7**(10), 752-756.
- Skelton A., Liljedahl-Claesson L., Wästeby N., Andrén M., Stockmann G., Sturkell E., Mörth C.-M., Stefansson A., Tollefsen E., Siegmund H., Keller N., Kjartansdóttir R., Hjartarson H., Kockum I. (2019) 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*. **124**, 2702-2720.
- Thomas D. (1988) Geochemical precursors to seismic activity. *Pure Appl. Geophys*. **126**, 241-266.
- Tsunogai U., Wakita H. (1995) Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan. *Science*. **269**(5220), 61-63.
- Wang C.-Y. (2007) Liquefaction beyond the near field. *Seismo. Res. Lett.* **78**, 512-517.
- Wang C.-Y., Manga M. (2010) *Earthquakes and Water. Lecture Notes in Earth Sciences*. **114**. Berlin: Springer, 249.
- Wang Ch.-Y., Manga M. (2021) *Water and Earthquakes. Lecture Notes in Earth System Sciences*. Cham: Springer, Switzerland, 387.
- Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. (2004) Modeling of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes. *Geophys. J. Int.* **157**, 717-726.
- Wästeby N., Skelton A., Tollefsen E., Andrén M., Stockmann G., Liljedahl L.C., Sturkell E., Mörth M. (2014) Hydrochemical monitoring, petrological observation, and geochemical modeling of fault healing after an earthquake. *J. Geophysical Research: Solid Earth*. **119**, 5727-5740.
- Zhou Z, Tian L, Zhao J, Wang H., Liu J (2020) Stress-Related Pre-Seismic Water Radon Concentration Variations in the Panjin Observation Well, China (1994–2020). *Front. Earth Sci.* 8:596283.