

Научные статьи

УДК 556.3+550.34

DOI: 10.31431/1816-5524-2020-4-48-5-20

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНОВ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА, РОССИЯ, И РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН)

© 2020 Г.Н. Копылова¹, Ш.С. Юсупов², Ю.К. Серафимова¹, Л.Ю. Шин², С.В. Болдина¹

¹Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: gala@emsd.ru

²Институт сейсмологии АН РУз, Ташкент, Республика Узбекистан, 100128; e-mail: shuhrat-1951@mail.ru

Рассматриваются гидрогеохимические предвестники землетрясений (ГГХП) в изменениях ионно-солевого и газового состава подземных вод из самоизливающихся скважин и источников на территории Петропавловск-Камчатского полигона, полуостров Камчатка, Россия и Ташкентского полигона, Республика Узбекистан. Проанализирована связь ГГХП с параметрами землетрясений — соотношением магнитуд и эпицентральных расстояний, а также с величинами удельной плотности сейсмической энергии в волне, интенсивности сотрясений и другими показателями воздействия землетрясений в районах наблюдений. В камчатских скважинах ГГХП проявлялись при подготовке землетрясений с $M_w = 6.5-7.8$ на эпицентральных расстояниях $d_e = 100-310$ км при сравнительно узких диапазонах величин плотности сейсмической энергии в волне ($0.1-0.3$ Дж/м³), объемной косейсмической деформации водовмещающих пород (единицы — десятки 10^{-9}) и максимальной скорости сейсмических волн ($3.5-7.7$ см/с). ГГХП проявлялись в зонах с интенсивностью сотрясений не менее 4–6 баллов по шкале MSK-64 и были приурочены к промежуточным зонам очагов будущих землетрясений. Длительность развития ГГХП и заблаговременность их проявления перед последующими землетрясениями составляют 1–9 месяцев, что позволяет использовать такие предвестники для прогноза времени сильных землетрясений.

Ключевые слова: скважина, химический состав подземной воды, землетрясение, магнитуда, предвестник.

ВВЕДЕНИЕ

Со второй половины XX в. в науках о Земле развивается новое направление на стыке гидрогеологии и сейсмологии, названное гидрогеосейсмологией. Ее содержанием является изучение влияния сейсмичности и процессов подготовки землетрясений на подземные воды, поиск гидрогеологических предвестников землетрясений и разработка на их основе методов сейсмического прогнозирования (Киссин, Ясько, 1982). Зарождение гидрогеосейсмологии связано с принятием в 1970-х гг. национальных программ по прогнозу землетрясений в бывшем СССР, США, Китае и Японии, в которые включались наблюдения за подземными водами и газами (Рикитакэ, 1979).

В Республике Узбекистан поиски гидрогеохимических предвестников землетрясений (ГГХП) в изменениях химического состава подземных вод и газов проводятся более 60-ти лет, и такие работы являлись пионерскими в мире (Мавлянов и др., 1973; Поиски..., 1976; Султанходжаев и др., 1976, 1983; Уломов, Мавашев, 1967; Юсупов, 1994). В последней четверти XX в., на территории бывшего СССР в сейсмоактивных районах Средней Азии, Кавказа, Сибири и Дальнего Востока также были организованы регулярные наблюдения за физико-химическими параметрами подземных вод на скважинах и источниках. Сведения об эффектах сейсмичности в изменениях параметров подземных вод представлены в работе (Гидрогеохимические..., 1985).

С 1990-х гг. гидрогеохимические наблюдения на территории бывшего СССР были прекращены, либо проводились эпизодически. Непрерывные наблюдения продолжались на сети из нескольких скважин лишь на полуострове Камчатка, где были получены уникальные данные по аномальным изменениям химического состава и уровня подземных вод перед землетрясениями с магнитудами $M_w = 6.5-7.8$ (Копылова, Болдина, 2019; Копылова и др., 1994; Biagi et al., 2000a, 2000b).

В настоящей работе рассматриваются данные о ГГХП, полученные при проведении детальных наблюдений (с периодичностью 2–4 суток) за химическим и газовым составом подземных вод в сейсмоактивных районах полуострова Камчатка, Россия и Республики Узбекистан с участием авторов.

ГГХП представляют аномальные изменения ионно-солевого, изотопного и газового состава подземных вод перед землетрясениями (Барсуков и др., 1979; Киссин, Ясько, 1982; Юсупов, 2017). Они рассматриваются в качестве составляющей геохимических предвестников землетрясений, объединяющих совокупность изменений химического состава вод и газов атмосферы, поверхностной и подземной гидросферы Земли в процессе подготовки землетрясений (Thomas, 1988; Wang, Manga, 2010). Генетическая связь ГГХП с изменениями физико-химического состояния подземных вод, вариациями их давления, температуры и водопроницаемых свойств водовмещающих пород обуславливает принадлежность ГГХП, совместно с гидрогеодинамическими и гидрогеотермическими предвестниками, к классу гидрогеологических предвестников (Киссин, Ясько, 1982).

В работах (Барсуков и др., 1979; Копылова и др., 1994; Пиннекер, 1982; Уломов, Мавашев, 1967; Thomas, 1988; Wang, Manga, 2010) указывалось на недостаточную изученность ГГХП экспериментальными методами и отсутствие надежного теоретического базиса для их практического использования в сейсмическом прогнозе. Вместе с тем, в указанных работах ГГХП рассматриваются как полезные предвестники при прогнозировании времени сильных землетрясений.

По нашему мнению, данные по химическому составу подземных вод и газов из скважин и источников, полученные в сейсмоактивных районах Земли, значительно различаются по набору параметров, а также по продолжительности и частоте наблюдений. Кроме этого, временные ряды гидрогеохимических параметров анализировались с использованием данных о землетрясениях из различных каталогов, в основном, региональных. Это приводит к неопределенности в обеспечении достоверных данных о продолжительности, формах ГГХП и их связи с параметрами

последующих землетрясений. Мы считаем, что получение достоверных сведений о ГГХП может основываться на данных гидрогеохимических наблюдений с периодичностью не реже нескольких суток и продолжительностью не менее первых лет (Копылова, Болдина, 2012). Лишь при таких условиях наблюдений, при проявлении аномальных изменений гидрогео-химических параметров в периоды сильных землетрясений могут быть выделены гидрогеосейсмические эффекты, 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).

В настоящей работе для характеристики землетрясений, которым предшествовали ГГХП, использовался уточненный и расширенный набор их параметров в соответствии с международными каталогами землетрясений, а также расчетные и макросейсмические параметры воздействия землетрясений в районах наблюдательных скважин.

Выделение ГГХП в изменениях временных рядов гидрогеохимических параметров представляет непростую задачу из-за воздействия комплекса несейсмических факторов на режим водопроявлений. К таким факторам относятся природные и техногенные воздействия на режим скважин, условия пробоотбора, точности (ошибки) аналитического определения отдельных компонентов состава подземных вод и газов, а также возможность наложения эффектов динамического воздействия сейсмических волн на проявления ГГХП. Набор таких факторов-помех является индивидуальным для каждой скважины.

В идеальной ситуации долговременных гидрогеохимических наблюдений, режим наблюдательных скважин должен быть естественным, т. е. не нарушенным эксплуатацией и другими возмущениями гидродинамического режима подземных вод, гидравлически связанных со скважиной. Такие условия соблюдались в 1986–1998 гг. для трех скважин полуострова Камчатка, в которых ГГХП проявлялись неоднократно. Это обстоятельство определяет особое значение данных, полученных на полуострове Камчатка, в вопросе о реальности возникновения ГГХП при подготовке сильных землетрясений.

В качестве ГГХП нами рассматриваются визуально выделяемые перед землетрясениями аномалии в изменениях временных рядов гидрогеохимических данных с учетом информации о природных и техногенных воздействиях на режим наблюдательных скважин. Аномалии в изменениях временных рядов, выделяемые статистическими методами, привлекаются лишь как допол-

нительное, но не определяющее подтверждение наличия ГГХП. Такой подход обусловлен тем, что рассмотрение ГГХП, как природного явления, предполагает, в первую очередь, использование методов, принятых в гидрогеологии и гидрогеохимии с привлечением актуальной информации о последующих землетрясениях, процессах их подготовки и реализации.

В обобщающих работах (Thomas, 1988; Wang, Manga, 2010) приводятся наиболее известные данные о геохимических предвестниках и показано, что таких данных, включая данные о ГГХП, сравнительно немного для однозначных выводов об их практической ценности. Поэтому обобщение данных о ГГХП из различных сейсмоактивных регионов при уточнении и расширении перечня параметров землетрясений позволяет рассматривать закономерности связи ГГХП с параметрами будущих землетрясений и заблаговременность их проявления перед сейсмическими событиями, а также оценивать ожидаемые последствия таких землетрясений в районах гидрогеохимических наблюдений. Получение таких оценок является первоочередной задачей в обеспечении научного базиса использования ГГХП для прогнозирования землетрясений и их ожидаемых последствий. Кроме этого, наличие детальных гидрогеохимических данных о ГГХП в скважинах с естественным режимом самоизлива подземной воды позволяет анализировать механизмы формирования ГГХП, расширяя тем самым научный базис гидрогеосейсмологических исследований и теоретические представления о процессах в флюидонасыщенной среде сейсмоактивных регионов (Копылова, Болдина, 2012; Юсупов, 2017).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использовались следующие материалы:

– временные ряды данных о химическом составе подземных вод в трех скважинах на территории Петропавловск-Камчатского полигона (ПКП), полуостров Камчатка (табл. 1, рис. 1–3), полученные Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) в 1986–1998 гг. (Копылова, Болдина, 2019; Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004);

– временные ряды данных наблюдений за составом подземных вод и газов источника Озодбаш и скважин ДАН, Минора и Чаткал на территории Ташкентского полигона (ТП), Республика Узбекистан (табл. 1, рис. 4, 5), полученные Комплексной экспедицией Института сейсмологии АН РУз в 2010–2013 гг. (в настоящее время Сейсмопрогностический мониторинговый центр МЧС Республики Узбекистан).

Ранее описание ГГХП в скважинах ПКП в связи с отдельными землетрясениями было дано в работах (Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004). В работах (Копылова и др., 2019; Юсупов и др., 2014) рассматривались изменения состава воды и газа источника Озодбаш на территории ТП в связи с землетрясениями 2013 г. Данные наблюдений на скважинах ДАН, Минора и Чаткал (табл. 1, рис. 4, 5б-з) демонстрируются впервые.

Приведенные примеры ГГХП (рис. 3, 5) имеют ярко выраженный аномальный характер в изменениях временных рядов гидрогеохимических параметров. Для всех водопоявлений ПКП и ТП аномальный характер ГГХП ранее был подтвержден комплексом статистических методов обработки временных рядов (Копылова и др., 1994; Копылова, Таранова, 2013; Юсупов и др., 2014; Biagi et al., 2000a, 2000b).

ДАнные О ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Для характеристики землетрясений, перед которыми проявлялись ГГХП (табл. 2), использовался комплекс параметров, в т. ч. величины моментных магнитуд M_w , сейсмического момента M_0 , параметры очагов землетрясений и величины максимальных линейных размеров очагов L , км, рассчитанные по формуле $\lg L = 0.440 \cdot M_w - 1.289$ (Ризниченко, 1976). Для всех землетрясений величины M_w приводятся по каталогу NEIC USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>). Определения координат и глубин гипоцентров землетрясений района полуострова Камчатка даны по Региональному каталогу землетрясений Камчатки и Командорских о-вов КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>). Величины M_0 и параметры очагов землетрясений даны по каталогу СМТ (<https://www.globalcmt.org/>).

В качестве параметров воздействия землетрясений в районах скважин (табл. 3) нами были использованы величины удельной плотности сейсмической энергии в волне (e), рассчитанные по формуле $\lg d_e = 0.48 M_w - 0.33$ $\lg e - 1.4$ (Копылова, Болдина, 2020; Wang, 2007; Wang, Manga, 2010); максимальные скорости сейсмических волн V , рассчитанные по (Копылова, Болдина, 2020); величины косейсмической объемной деформации водовмещающих пород в районах скважин D , рассчитанные по (Болдина, Копылова, 2016; Копылова и др., 2010; Okada, 1985); интенсивность сотрясений I_{MSK-64} по 12-бальной шкале MSK-64 (Медведев и др., 1965) по данным макросейсмического каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН для камчатских землетрясений (<http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/macrosei.php>).

Таблица 1. Данные о скважинах и источниках.
Table 1. Data on wells and water shows.

Название скважины/источника	Координаты		Глубина, м Открытый интервал, м	Возраст / состав водовмещающих пород	Характеристика режима; скорость разгрузки, дм ³ /с	Температура воды, °С	Минерализация, г/дм ³	Химический состав воды*	Газ, состав**	Период наблюдений, периодичность
	°с.ш.	°в.д.								
<i>Полуостров Камчатка, Петропавловск-Камчатский полигон</i>										
ГК-1	53.28	158.40	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
М-1	53.18	158.28	600 ----- -310–313; 407–410; 553–556	N / туфы	естественный самоизлив; 1.5	16	0.25	SO ₄ –HCO ₃ / Ca–Na	растворенный, N ₂	
Г-1	53.05	158.66	2542 ----- 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	69.79	1400 ----- 1107–1190	K ₂ / конгломераты, песчаники, алевролиты, глины, известняки	откачка насосом: бальнеологическое использование	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
Минора	41.55	69.68	90 ----- 68–75	N–Q / пески, гравий, глина	откачка насосом: водоснабжение	15.5	0.8	н.д.	растворенный, N ₂ –O ₂ –CO ₂	
ДАН	41.53	69.65	85 ----- 59–68	N–Q / пески, гравий, глина	откачка насосом: водоснабжение	15.2	0.8	н.д.	растворенный, N ₂ –O ₂ –CO ₂	
Источник Озодбаш	41.53	69.65	свободный самоизлив	PZ / песчаники, галечники, известняки	естественный самоизлив; 0.08	18	0.9	н.д.	растворенный, N ₂ –O ₂ –CO ₂	

Примечание. (*) — указаны анионы/катионы с содержанием ≥ 20 %-экв.; (**) — указаны газы с содержанием ≥ 10 об. %.
Note. (*) — anions/cations with content of ≥ 20 %-equivalents are indicated; (**) — gases with content of 10 vol. %.

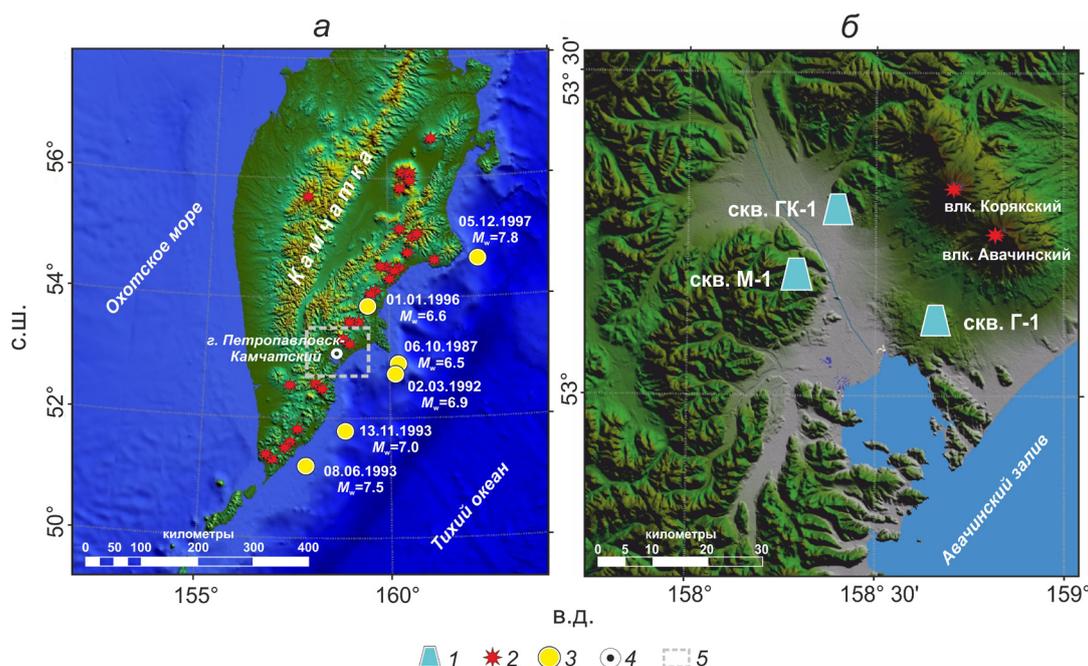


Рис. 1. Схема расположения наблюдательных скважин (табл. 1, рис. 2) и эпицентров землетрясений, перед которыми проявлялись гидрогеохимические предвестники (табл. 2), полуостров Камчатка: *а* — Петропавловск-Камчатский полигон (ПКП) и эпицентры землетрясений (указаны даты землетрясений в формате дд.мм.гггг и величины магнитуд M_w); *б* — расположение самоизливающихся скважин ГК-1, М-1, Г-1 на территории ПКП, в которых были зарегистрированы гидрогеохимические предвестники. 1 — наблюдательные скважины; 2 — действующие вулканы; 3 — эпицентры землетрясений (табл. 2); 4 — г. Петропавловск-Камчатский; 5 — территория ПКП на рис. 1а.

Fig. 1. Location of observation wells (Table 1, Fig. 2) and epicenters of the earthquakes, before which hydrogeochemical precursors appeared (Table 2), Kamchatka Peninsula: *a* — Petropavlovsk-Kamchatsky test site (PKTS) and earthquake epicenters (M_w and dates in the format dd.mm.yyyy are indicated); *b* — location of the self-discharging wells GK-1, M-1, G-1, in which hydrogeochemical precursors were recorded. 1 — observation wells; 2 — active volcanoes; 3 — earthquake epicenters (Table 2); 4 — the city of Petropavlovsk-Kamchatsky; 5 — the PKTS territory in Fig. 1a.

Для землетрясения в Узбекистане величина I была рассчитана по формуле:

$$I_{MSK-64} = bM - \nu \lg \sqrt{d_c^2 + H^2} + c,$$

где H — глубина очага; $b = 1.5$, $\nu = 3.5$, $c = 3.0$ (Шебалин, 1968).

В таблице 3 также приводятся величины эпицентральных расстояний землетрясений до скважин, нормированных на максимальные линейные размеры очагов L из таблицы 2 (de/L), а также максимальные времена развития ГГХП ($T1$) и максимальные времена их проявления до землетрясений в отдельных скважинах ($T2$).

О СВЯЗИ ГГХП С ПАРАМЕТРАМИ ПОСЛЕДУЮЩИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Район полуострова Камчатка (рис. 1а) характеризуется высокой сейсмичностью вследствие его расположения в области субдукции Тихоокеанской океанической плиты под Евразийскую и Северо-Американскую плиты континентального типа. По долгосрочному сейсмическому прогнозу в течение ближайших лет – десятилетий в районе полуострова Камчатка возможно силь-

нейшее землетрясение с сотрясениями $I = 7-9$ баллов в континентальных районах (Федотов, Соломатин, 2019).

На территории ПКП в 1977–1992 гг. были организованы наблюдения за химическим составом подземных вод на четырех станциях, состоящих из 7 самоизливающихся скважин и четырех источников (Копылова, Болдина, 2019; Копылова и др., 2018; Хаткевич, Рябинин, 2004). При проведении наблюдений предполагалось, что получаемые данные должны характеризовать естественный режим самоизлива подземных вод и включать определения их основных физико-химических параметров — скорости разгрузки и температуры воды, pH , концентраций главных анионов и катионов, отдельных мезо- и микрокомпонентов в составе воды, а также состава газа. Набор определяемых параметров для каждого водопрооявления определялся индивидуально с учетом состава воды. На газлирующей скважине ГК-1 (рис. 1б, 2а) отбирались пробы свободного газа для определения его состава хроматографическим методом. Периодичность наблюдений составляла один раз в три дня. В работе (Копылова и др., 2018) приводится гидрогеологическая

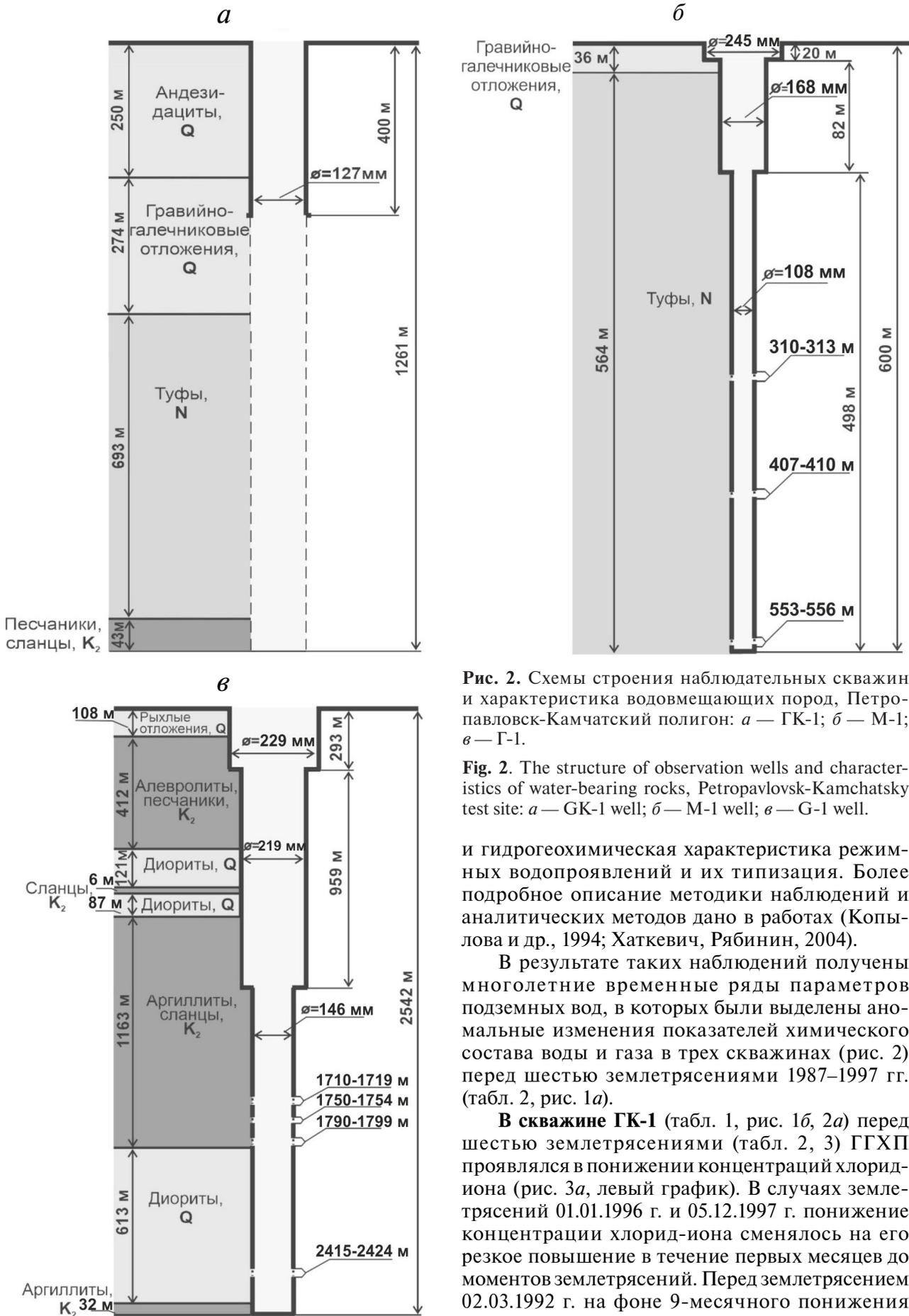


Рис. 2. Схемы строения наблюдательных скважин и характеристика водовмещающих пород, Петропавловск-Камчатский полигон: *а* — ГК-1; *б* — М-1; *в* — Г-1.

Fig. 2. The structure of observation wells and characteristics of water-bearing rocks, Petropavlovsk-Kamchatsky test site: *a* — GK-1 well; *б* — M-1 well; *в* — G-1 well.

и гидрогеохимическая характеристика режимных водопроявлений и их типизация. Более подробное описание методики наблюдений и аналитических методов дано в работах (Копылова и др., 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004).

В результате таких наблюдений получены многолетние временные ряды параметров подземных вод, в которых были выделены аномальные изменения показателей химического состава воды и газа в трех скважинах (рис. 2) перед шестью землетрясениями 1987–1997 гг. (табл. 2, рис. 1а).

В скважине ГК-1 (табл. 1, рис. 1б, 2а) перед шестью землетрясениями (табл. 2, 3) ГГХП проявлялся в понижении концентраций хлорид-иона (рис. 3а, левый график). В случаях землетрясений 01.01.1996 г. и 05.12.1997 г. понижение концентрации хлорид-иона сменялось на его резкое повышение в течение первых месяцев до моментов землетрясений. Перед землетрясением 02.03.1992 г. на фоне 9-месячного понижения

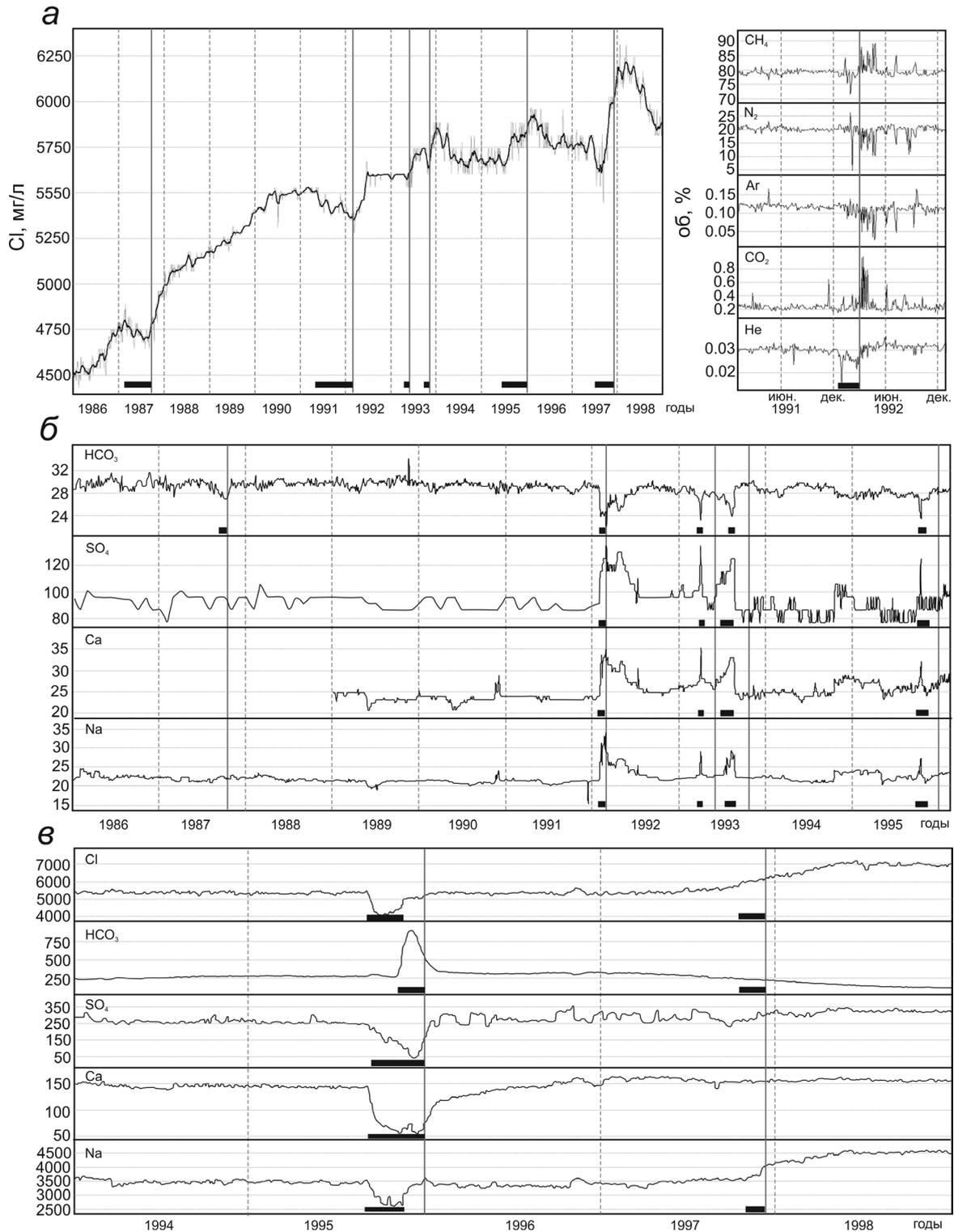


Рис. 3. Проявления гидрогеохимических предвестников в скважинах Петропавловск-Камчатского полигона (показаны жирными горизонтальными линиями): *а* — скважина ГК-1: изменения концентрации хлорид-иона (слева), вариации состава свободного газа (справа); *б* — скважина М-1: изменения концентраций гидрокарбонат- и сульфат-ионов, кальция и натрия; *в* — скважина Г-1: изменения концентраций хлорид-, гидрокарбонат- и сульфат-ионов, кальция и натрия. На рис. 3б и 3в концентрации катионов и анионов даны в мг/л. Вертикальные линии — землетрясения (табл. 2, рис. 1а).

Fig. 3. Manifestations of hydrogeochemical precursors (shown in bold horizontal lines) in the wells of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site: *a* — GK-1 well: changes in the concentration of chloride ion (left), variations in the composition of free gas (right); *б* — M-1 well: changes in the concentrations of bicarbonate and sulfate ions, calcium and sodium; *в* — G-1 well: changes in the concentrations of chloride, bicarbonate and sulfate ions, calcium and sodium. The cation/anion concentrations are given in mg/l in fig. 3б and 3в. Earthquakes (Table 2, Fig. 1a) are marked with vertical lines.

Таблица 2. Данные о землетрясениях

Table 2. Earthquake Data

Дата	Положение эпицентра	H , км	M_w	M_0 , $H \cdot M \cdot 10^{20}$	L , км	Азимут простирания, (°)	Угол падения, (°)	Угол подвижки, (°)	
<i>Полуостров Камчатка, Петропавловск-Камчатский полигон</i>									
6 окт. 1987	52.86°с.ш. 160.23°в.д.	33	6.5	0.06	37	208/33	32/58	86/92	
2 марта 1992	52.76°с.ш. 160.20°в.д.	20	6.9	0.23	56	213/40	28/62	84/93	
8 июня 1993	51.20°с.ш. 157.80°в.д.	40	7.5	2.02	103	207/39	29/61	79/96	
13 нояб. 1993	51.79°с.ш. 158.83°в.д.	40	7.0	0.40	62	206/34	31/59	83/94	
1 янв. 1996	53.88°с.ш. 159.44°в.д.	0	6.6	н.д.	41	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
5 дек. 1997	54.64°с.ш. 162.55°в.д.	10	7.8	5.3	139	202/39	23/68	74/97	
<i>Республика Узбекистан, Ташкентский полигон</i>									
24 мая 2013	40.91°с.ш. 69.17°в.д.	19	5.3	0.001	11	177/69	76/40	53/157	

Примечание. H — глубина гипоцентра; M_w — «моментная» магнитуда землетрясения или магнитуда по Канамори; M_0 — сейсмический момент землетрясения; L — максимальный линейный размер очага землетрясения по (Ризниченко, 1976).

Note. H — hypocenter depth; M_w — moment earthquake magnitude or magnitude according to Kanamori; M_0 — seismic moment of an earthquake; L — the maximum linear size of the earthquake source according to (Riznichenko, 1976).



Рис. 4. Схема расположения водопроявлений (табл. 1) на территории Ташкентского полигона: 1 — скважины и источник; 2 — эпицентр землетрясения (табл. 2); 3 — территория г. Ташкент; 4 — государственная граница.

Fig. 4. Location of water shows in Tashkent test site: 1 — wells and spring; 2 — earthquake epicenter (Table 2); 3 — the territory of Tashkent city; 4 — state border.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

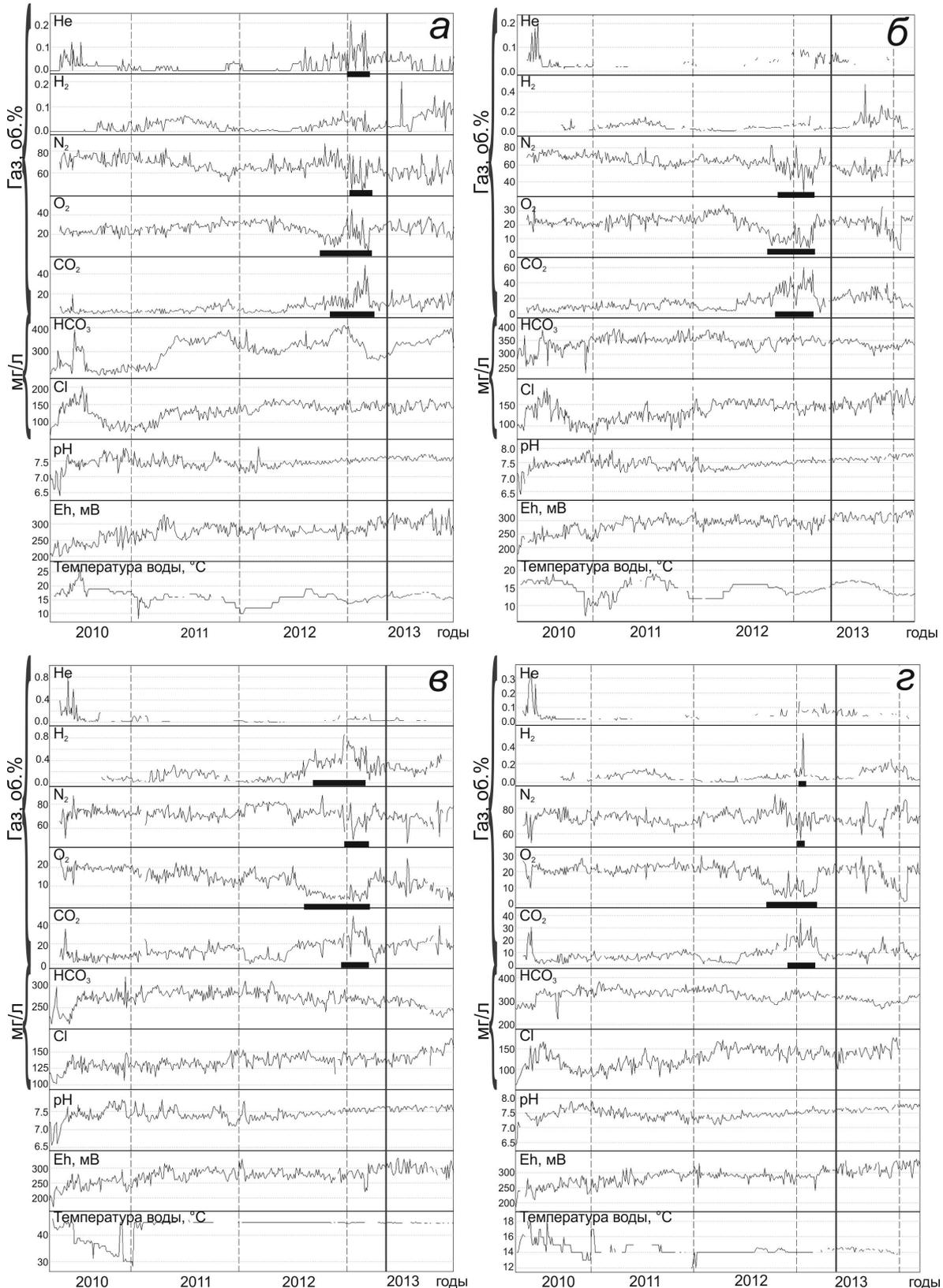


Рис. 5. Данные наблюдений за газовыми и гидрогеохимическими параметрами подземных вод на источнике Озодбаш (а), скважине ДАН (б), скважине Минора (в) и скважине Чаткал (г); жирными горизонтальными линиями обозначены времена проявления гидрогеохимических предвестников перед землетрясением 24.05.2013 г., $M_w = 5.3$ (показано вертикальной линией).

Fig. 5. Observation data on the gas and hydrogeochemical parameters of groundwater at the Ozodbash spring (a), DAN well (б), Minora well (в) and Chatkal well (г); bold horizontal lines indicate the times of hydrogeochemical precursors manifestation before the 24.05.2013 $M_w = 5.3$ earthquake (shown by a vertical line).

Таблица 3. Характеристика воздействия землетрясений (табл. 2) в районах наблюдательных скважин (табл. 1)
Table 3. The impact of earthquakes (Table 2) in the areas of observation wells (Table 1)

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***	Максимальные продолжительность ГГХП $T1$ / заблаговременность ГГХП перед землетрясением $T2$ в отдельных скважинах, 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⁾ ; 0.1 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⁾ ; 2.4 ²⁾	0.2 ¹⁾ ; 0.2 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⁾ ; 0.3 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⁾ ; 0.1 ²⁾ ; 0.2 ³⁾	6.9 ¹⁾ ; 5.7 ²⁾ ; 6.0 ³⁾	4–5	7/7 ¹⁾ ; 1/3 ²⁾ ; (2–5)/5 ³⁾
5 дек. 1997	7.8	308 ¹⁾ ; 308 ³⁾	+12 ¹⁾ ; +1.0 ³⁾	2.2 ¹⁾ ; 2.2 ³⁾	0.3 ¹⁾ ; 0.3 ³⁾	7.4 ¹⁾ ; 7.4 ³⁾	5–6	5/5 ¹⁾ ; (2–3)/3 ³⁾
<i>Республика Узбекистан, Ташкентский полигон</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	(2–5.5)/9

Примечание. d_e^* — эпицентральные расстояния землетрясений до скважин: полуостров Камчатка: ¹⁾ — скв. ГК-1; ²⁾ — скв. М-1; ³⁾ — скв. Г-1; Ташкентский полигон, Узбекистан: ⁴⁾ — скв. Минора; ⁵⁾ — скв. ДАН и родник Озодбаш; ⁶⁾ — скв. Чаткал;

** — знаки перед числами обозначают «+» — расширение, «-» — сжатие;

*** — для полуострова Камчатка интенсивность сотрясений I приводятся для района г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1а).

Note. d_e^* — epicenter distances of earthquakes to wells: Kamchatka Peninsula: ¹⁾ — GK-1 well; ²⁾ — M-1 well; ³⁾ — G-1 well; Tashkent test site, Uzbekistan: ⁴⁾ — Minora well ⁵⁾ — DAN well and Ozodbash source; ⁶⁾ — Chatkal well;

** — the signs before the numbers indicate «+» — expansion, «-» — compression;

*** — for the Kamchatka Peninsula, the intensity of shaking I are given for the Petropavlovsk-Kamchatsky city (Fig. 1a)

концентрации хлорид-иона также наблюдалось увеличение дисперсии и изменение средних концентраций свободных газов в течение двух месяцев (рис. 3а, правый график).

В скважине М-1 (табл. 1, рис. 1б, 2б) ГГХП проявлялся в уменьшении концентраций гидрокарбонат-иона и в увеличении концентраций сульфат-иона, натрия, кальция (рис. 3б). Перед землетрясением 02.03.1992 г. минерализация воды возросла на 25 % и изменился гидрогеохимический тип воды за счет относительного увеличения сульфат-иона и уменьшения гидрокарбонат-иона (Копылова, Болдина, 2012).

В скважине Г-1 (табл. 1, рис. 1б, 2в) перед землетрясениями 01.01.1996 г. и 05.12.1997 г. наблюдалось изменение концентраций хлорид-иона, сульфат-иона, гидрокарбонат-иона, натрия и кальция (рис. 3в).

Землетрясения, которым предшествовали ГГХП, имели величины $M_w = 6.5–7.8$, происходили

на эпицентральных расстояниях $d_e = 95–308$ км и сопровождалась сотрясениями интенсивностью $I_{MSK-64} = 4–6$ 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 по-ва Камчатка и по ним происходили субвертикальные смещения северо-западных крыльев. Расчетные величины объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районах скважин при таких землетрясениях составляли от первых единиц до $(50–60) \cdot 10^{-9}$, характер деформации соответствовал объемному расширению. Продолжительности развития ГГХП ($T1$) и заблаговременность их проявления до землетрясений в различных скважинах ($T2$) составляли от менее одного месяца до 9 месяцев (табл. 3).

На Ташкентском полигоне в августе 2010–ноябре 2013 гг. были проведены гидрогеохими-

ческих наблюдений за составом растворенных газов и концентраций хлорид- и гидрокарбонат-ионов в воде источника Озодбаш и трех скважин (табл. 1, рис. 4, 5) с периодичностью не реже 2–3 раза в неделю. В течение этого времени на всех трех скважинах проводился отбор воды для водоснабжения и санаторно-курортного лечения, а источник Озодбаш характеризовался естественным режимом самоизлива.

24 мая 2013 г. вблизи Ташкентского полигона произошло землетрясение с $M_w = 5.3$, $d_c = 80–90$ км (табл. 2, 3; рис. 4). С учетом субширотной ориентировки сейсмогенерирующих разломных зон этого района (Нурматов и др., 2016) и данных по механизму очага (табл. 2) можно полагать, что в результате землетрясения произошел взбросо-сдвиг в условиях ЮЗ-СВ сжатия и СЗ-ЮВ растяжения.

Перед этим землетрясением гидрогеохимические аномалии проявились, в основном, в изменениях концентраций газов азота, кислорода, углекислого газа и, в меньшей степени, гелия и водорода (рис. 5), превышающие диапазон их фоновой изменчивости за весь период наблюдений на 150–800% (Юсупов и др., 2014). Такие изменения газового состава проявились в воде источника Озодбаш (рис. 4, 5а), дренирующем подземные воды палеозойских осадочных отложений Приташкентского артезианского бассейна (табл. 1), а также в изменениях газового состава воды из других наблюдательных скважин, вскрывающих неоген-четвертичные и позднемиоценовые отложения. Это может служить показателем того, что в процессе подготовки землетрясения 24.05.2013 г. происходили изменения состава растворенных газов в пределах всей водоносной толщи артезианского бассейна.

В работах (Копылова и др., 2019; Юсупов и др., 2014) такие проявления ГГХП объяснялись увеличением в газовой разгрузке доли гелия, водорода и углекислого газа, поступающих в подземную воду из изолированных пустот в минеральном скелете водовмещающих пород при развитии микротрещиноватости на стадии подготовки землетрясения. Одновременно в газовой разгрузке происходило уменьшение доли газов воздушного происхождения — кислорода и азота. Кроме этого, избыточное поступление водорода в водоносные системы источника и скважин могло сопровождаться интенсификацией окислительных процессов, ростом pH воды (с середины 2012 г. амплитуды pH возрастали до 0.5 ед.), нарушением карбонатного равновесия и ростом величины Eh (рис. 5).

Длительность гидрогеохимических аномалий $T1$ по различным параметрам изменялась от 2 до 5.5 мес.; заблаговременность проявления

аномалии в изменениях газового состава перед землетрясением $T2$ составляла около девяти месяцев (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Связь проявления ГГХП с параметрами землетрясений. Распределение ГГХП в водопроявлениях ПКП и ТП в зависимости от величин магнитуды и эпицентрального расстояния землетрясений и e — удельной плотности сейсмической энергии в волне, позволяет проанализировать связь проявлений ГГХП с параметрами последующих землетрясений и их воздействием в районах наблюдений (рис. 6). Ранее в работе (Wang, Manga, 2010) было показано, что величина e может использоваться в качестве метрической характеристики развития ряда постсейсмических флюидодинамических процессов в подземных и поверхностных водах в области очага землетрясения. В частности, разжижение водонасыщенных осадочных отложений, инициация нестационарной фильтрации подземных вод и устойчивые («sustained») смещения уровня воды в скважинах в результате воздействия сейсмических волн контролируются определенными диапазонами величин e .

В настоящей работе впервые проводится сопоставление ГГХП из двух сейсмоактивных районов с расчетными величинами энергии сейсмических волн при землетрясениях, перед которыми проявились аномалии химического состава подземных вод (рис. 6). Мы полагаем, что изучение связи между проявлениями ГГХП и величиной e , как одним из параметров воздействия последующего землетрясения, направлено на совершенствование прогнозных оценок по гидрогеохимическим данным не только в отношении параметров ожидаемого землетрясения, но и его возможных последствий в районах наблюдений.

В работах (Tsunogai, Wakita, 1995; Wang, 2007; Wang, Manga, 2010) при оценке области проявления различных видов флюидодинамических и других видов предвестников землетрясений и постсейсмических эффектов используются понятия ближней, промежуточной и дальней зоны очагов землетрясений. Мы полагаем, что расстояние (в км), отсчитываемое от эпицентра землетрясения и равное $1L$, ограничивает ближнюю область очага землетрясения, а расстояние $1L < d_c < (5–10)L$ ограничивает промежуточную область очага землетрясения. Соответственно, районы, расположенные на эпицентральных расстояниях $d_c > 10L$, находятся в дальней зоне очага землетрясения. Такое определение ближней, промежуточной и дальней зоны очагов землетрясений находится в соответствии с их

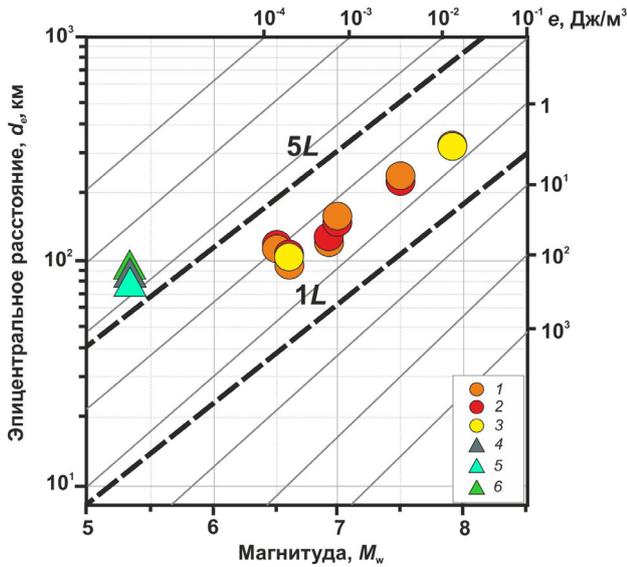


Рис. 6. Распределение ГГХП в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e последующих землетрясений (табл. 2, 3): 1–3 — скважины полуострова Камчатка: 1 — ГК-1, 2 — М-1, 3 — Г-1; 4–6 — водопроявления Ташкентского полигона: 4 — источник Озодбаш и скважина ДАН, 5 — скважина Минора, 6 — скважина Чаткал. Наклонными тонкими линиями показаны расчетные величины удельной плотности сейсмической энергии в волне (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).

Fig. 6. Distribution of HGCP depending on M_w and epicentral distance d_e of subsequent earthquakes (Table 2, 3). 1–3 — wells in the Kamchatka Peninsula: 1 — GK-1, 2 — M-1, 3 — G-1; 4–6 — water shows in the Tashkent test site: 4 — Ozodbash spring and DAN well, 5 — Minora well, 6 — Chatkal well. Inclined thin lines show the calculated values of the specific density of seismic energy in wave (e) depending on the magnitude and epicentral distance of the earthquakes. Bold dashed lines show the values of one (1L) and five (5L) maximum linear sizes of earthquake sources according to (Riznichenko, 1976).

качественными оценками (зона очага, несколько длин очага и более нескольких длин очага), данными в цитируемых работах.

В камчатских скважинах ГГХП проявлялись перед землетрясениями с величинами магнитуд $M_w = 6.5–7.8$ на эпицентральных расстояниях $d_e = 100–310$ км. Во всех случаях скважины находились в промежуточных зонах очагов землетрясений ($d_e/L = 2–3$). Для таких землетрясений характерны значения $e = 0.1–0.3$ Дж/м³, максимальные скорости сейсмических волн 3.5–7.7 см/с, интенсивность сотрясений в районах скважин $I_{MSK-64} = 4–6$ баллов и расчетные величины объемной косейсмической деформации D от первых единиц до десятков 10^{-9} (табл. 3).

На территории ТП перед землетрясением 24 мая 2013 г. с $M_w = 5.3$ (табл. 2, рис. 4) были зарегистрированы ГГХП в трех скважинах и в источнике Озодбаш на эпицентральных расстояниях $d_e = 80–90$ км, что составляет 7–8 максимальных размеров длины очага. Значит можно полагать, что водопроявления находились в промежуточной зоне очага землетрясения, но на относительно большем удалении, по сравнению с камчатскими скважинами, в которых регистрировались ГГХП.

При землетрясении 24 мая 2013 г. в районах наблюдений расчетные величины e составляли 0.003–0.005 Дж/м³, интенсивность сотрясений $I_{MSK-64} = 4$ балла, косейсмическая объемная деформация водовмещающих пород $D = (0.2–0.3) \cdot 10^{-9}$, максимальные скорости сейсмических волн $V = 1.0–1.2$ см/с (табл. 3). При сравнении этих величин с данными по воздействию камчатских землетрясений, которым предшествовали ГГХП, видно, что воздействие землетрясения 24 мая 2013 г. в районах наблюдений также было сравнительно слабее. Это позволяет предполагать более широкий диапазон соотношений магнитуд и эпицентральных расстояний для землетрясений, перед которыми могут возникать ГГХП в сейсмотектонических и гидрогеологических условиях Ташкентского полигона. Вместе с тем, сопоставление данных по ГГХП на территориях ПКП и ТП с использованием уточненного и расширенного набора параметров землетрясений (табл. 2, 3, рис. 6) показывает, в целом, согласование в общей тенденции связи ГГХП с величинами параметров землетрясений.

Особенности проявления ГГХП перед землетрясениями. Используемый нами визуальный способ идентификации ГГХП в изменениях временных рядов гидрогеохимических параметров позволяет оценить время их развития и заблаговременность проявления перед последующими землетрясениями от примерно одного до девяти месяцев (табл. 3, рис. 3, 5).

Отметим также, что для района по-ва Камчатка имеются очевидные особенности в проявлении ГГХП, как для отдельных скважин, так и для изменений отдельных гидрогеохимических показателей (рис. 3). Это указывает на необходимость постановки специальных исследований по созданию моделей формирования ГГХП для отдельных скважин на основе экспериментальных данных по ГГХП с учетом совокупности гидрогеологических и гидрогеохимических условий формирования химического состава подземных вод.

В работе (Копылова, Болдина, 2012) для скважины М-1 (табл. 1, рис. 1б, 2б) представлена модель формирования ГГХП перед землетрясением

2 марта 1992 г. (табл. 2, рис. 1а) за счет изменения условий смешивания двух контрастных по составу вод в слабопроницаемых блоках водовмещающей породы и разделяющих их трещинах. Одним из определяющих факторов для построения такой модели было то, что ГГХП проявлялся в заметных изменениях концентраций всех четырех главных анионов и катионов в составе излившейся воды (табл. 1, рис. 3б). С использованием математической модели (Wang et al., 2004) и условия электрической нейтральности подземной воды были оценены составы двух смешивающихся вод и прослежена динамика их смешивания на стадии подготовки землетрясения. Для других скважин ПКП построение аналогичных моделей ГГХП оказалось невозможным из-за неполного набора определяемых анионов и катионов в составе подземной воды или из-за недостаточной аналитической точности определения концентраций отдельных гидрогеохимических параметров, а также слишком большой периодичности наблюдений в трое суток, не позволяющей детально проследить кратковременные аномалии химического состава воды (Копылова, Болдина, 2012).

Перед землетрясением 24 мая 2013 г. в трех скважинах и в источнике Озодбаш на территории ТП проявилось удивительное согласование в изменениях газового состава (рис. 5) при отсутствии значимых изменений концентраций анионов хлорид- и гидрокарбонат-ионов. К сожалению, измерение концентраций катионов в составе подземной воды методикой наблюдений не предусматривалось, поэтому их реакция на подготовку землетрясения 24 мая 2013 г. не известна.

Предварительный анализ качества данных гидрогеохимических наблюдений на территориях ПКП и ТП указывает на необходимость совершенствования системы наблюдений на скважинах и источниках для получения более полной информации об аномалиях химического и газового состава подземных вод на стадиях подготовки землетрясений. Вместе с тем, представленные данные о ГГХП убедительно демонстрируют, что на стадиях подготовки сильных землетрясений в промежуточных зонах их очагов может происходить перераспределение компонентного состава подземной воды и газа, а также изменение минерализации воды. Это дает основание полагать, что ведущим процессом формирования ГГХП является изменение условий смешивания различных по химическому составу вод в зонах повышенной водопроницаемости. В качестве таких зон смешивания подземных вод различного химического состава могут рассматриваться разнообразные

геологические объекты — разломные зоны (Wang et al., 2004), неоднородности трещиноватости и литологического состава водовмещающих пород («гидрогеологические окна»), а также ствол скважины при множественной перфорации обсадной колонны (Копылова, Болдина, 2012; Kopylova, Boldina, 2019).

Как показано в работах (Копылова и др., 2018; Kopylova, Boldina, 2019; Skelton et al., 2019), возникновение аномалий ГГХП в изменениях химического состава подземных вод может также происходить при изменениях взаимодействия в системе «вода – горная порода» при развитии дилатансии с образованием дополнительного объема микротрещиноватости в водовмещающих породах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые на примере сейсмоактивных территорий ПКП и ТП выполнен корректный анализ связи между ГГХП и параметрами последующих землетрясений — соотношением их магнитуд и эпицентральных расстояний до скважин, величинами удельной плотности сейсмической энергии в волне, интенсивности сотрясений и другими показателями воздействия землетрясений в районах наблюдательных скважин.

Проявление рассмотренных ГГХП было приурочено к промежуточным зонам очагов будущих землетрясений и соответствовало определенным соотношениям между величинами магнитуд землетрясений и эпицентральных расстояний до наблюдательных скважин, а также определенным величинам параметров воздействия землетрясений в районах гидрогеохимических наблюдений (табл. 2, 3; рис. 6). Величины продолжительности ГГХП ($T1$) и заблаговременности их проявления перед последующими землетрясениями ($T2$) в 1–9 месяцев показывают потенциальное практическое значение ГГХП для прогнозирования времени сильных землетрясений.

Полученные оценки пространственно-временной связи между проявлениями ГГХП и параметрами землетрясений могут быть использованы для более точного прогнозирования сильных землетрясений и их воздействия в районах гидрогеохимических наблюдений на территориях Петропавловск-Камчатского и Ташкентского полигонов.

Вместе с тем, необходимо отметить недостатки применяемых методов поиска ГГХП для углубленного изучения процессов и механизмов их возникновения в условиях разнообразия природных обстановок формирования химического состава подземных вод, сложности учета технических факторов-помех, в первую очередь,

эксплуатации подземных вод, и значительной роли человеческого фактора в производстве режимных наблюдений. Очевидна необходимость развития метода гидрогеохимических наблюдений с целью изучения феномена ГГХП путем совмещения автоматизированных систем регистрации отдельных компонентов и интегральных показателей химического состава воды, таких как электропроводность, pH , Eh , с целенаправленными работами по изучению вариаций химического и газового состава подземных вод на современном уровне.

Список литературы [References]

- Барсуков В.Л., Серебренников В.С., Варшал Г.М., Гаранин А.В.* Геохимические методы прогноза землетрясений // Геохимия. 1979. № 3. С. 323–337 [*Barsukov V.L., Serebrennikov V.S., Varshal G.M., Garanin A.V.* Geochemical methods of earthquake prognosis // *Geokhimiya*. 1979. № 3. P. 323–337 (in Russian)].
- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Косейсмические эффекты сильных камчатских землетрясений 2013 г. в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2016. № 2. Вып. № 30. С. 66–76 [*Boldina S.V., Kopylova G.N.* Coseismic effects of the 2013 strong Kamchatka earthquakes in well YUZ-5 // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2016. № 2 (30). P. 66–76 (in Russian)].
- Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. 286 с. [*Gidrogeokhimicheskiye predvestniki zemletryaseniy*. М.: Nauka, 1985. 286 p. (in Russian)].
- Киссин И.Г., Ясько В.Г.* Гидрогеологические предвестники землетрясений / Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 65–71 [*Kissin I.G., Yasko V.G.* *Gidrogeologicheskiye predvestniki zemletryaseniy / Osnovy gidrogeologii. Geologicheskaya deyatel'nost' i istoriya vody v zemnykh nedrakh*. Novosibirsk: Nauka. 1982. P. 65–71 (in Russian)].
- Копылова Г.Н.* Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 1. Вып. № 7. С. 50–66 [*Kopylova G.N.* Seismicity as a factor of underground water regime formation // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2006. № 1(7). P. 50–66 (in Russian)].
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Аномальные изменения химического состава подземных вод в связи с Камчатским землетрясением 02.03.1992 г. ($M_w = 6.9$) // Геофизические исследования. 2012. Т. 13. № 1. С. 39–49 [*Kopylova G.N., Boldina S.V.* Anomalies in the chemical composition of underground water due to the 2d March 1992 earthquake ($M_w = 6.9$), Kamchatka // *Geofizicheskiye issledovaniya*. 2012. V. 13. № 1. P. 39–49 (in Russian)].
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201923-20> [*Kopylova G.N., Boldina S.V.* Hydrogeoseismological Research in Kamchatka: 1977–2017 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2019. V. 13. № 2. P. 71–84. <https://doi.org/10.1134/S0742046319020040>].
- 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. <https://doi.org/10.31857/S0002333720030035> [*Kopylova G.N., Boldina S.V.* Effects of Seismic Waves in Water Level Changes in a Well: Empirical Data and Models // *Physics of the Solid Earth*. 2020. V. 56. № 4. P. 530–549. <http://doi.org/10.1134/S106935131304006X>].
- Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В.* Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62. <http://doi.org/10.1134/S0203030618040041> [*Kopylova G.N., Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Boldina S.V.* The Chemical Composition of Ground Water in Observational Water Vents in the Petropavlovsk Geodynamic Test Site: The Classification and Effects of Large Earthquakes // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2018. V. 12. № 2. P. 268–286. <https://doi.org/10.1134/S0742046318040048>].
- Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А.* О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровневых наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51–61 [*Kopylova G.N., Steblov G.M., Boldina S.V., Sdel'nikova I.A.* The possibility of estimating the coseismic deformation from water level observations in wells // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. V. 46. № 1. P. 47–56. <https://doi.org/10.1134/S1069351310010040>].
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М.* Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–37 [*Kopylova G.N., Sugrobov V.M., Khatkevich Yu.M.* Variations in the regime of springs and hydrogeological boreholes in the Petropavlovsk polygon (Kamchatka) related to earthquakes // *Vulkanologiya i Seismologiya*. 1994. № 2. P. 53–37 (in Russian)].
- Копылова Г.Н., Таранова Л.Н.* Сигналы синхронизации в изменениях химического состава подземных вод Камчатки в связи с сильными ($M_w \geq 6.6$) землетрясениями // Физика Земли. 2013. № 4. С. 135–144. <http://dx.doi.org/10.7868/S0002333713040066> [*Kopylova G.N., Taranova L.N.* Synchronization signals in the variations of groundwater chemical composition in Kamchatka in relation to the strong ($M_w \geq 6.6$) earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013. V. 49. № 4. P. 577–586. <https://doi.org/10.1134/S106935131304006X>].
- Копылова Г.Н., Юсупов Ш.С., Серафимова Ю.К., Шин Л.Ю.* 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 – 7 октября 2019 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. Обнинск: ФИЦ ЕГС

- РАН, 2019. С. 282–286 [Kopylova G.N., Yusupov Sh.S., Serafimova Yu.K., Shin L.Yu. Hidrogeokhimicheskiye predvestniki zemletryaseniy (po dannym nablydeniy na poluostrove Kamchatka i v Uzbekistane) // Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. [Electronic resource]: Trudy Sed'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Petropavlovsk-Kamchatskiy. 29 sentyabrya – 7 oktyabrya 2019 g. / Otv. red. D.V. Chebrov. Obninsk: FITS YEGS RAN, 2019. P. 282–286 (in Russian)].
- Мавлянов Г.А., Касимов Х.К., Султанходжаев А.Н. и др. Гидрогеохимические особенности подземных вод некоторых сейсмоактивных районов Узбекистана. Ташкент: Фан, 1973. 95 с. [Mavlyanov G.A., Kasimov H.K., Sultanhodzhaev A.N. et al. Hidrogeokhimicheskiye osobennosti podzemnykh vod nekotorykh seysmoaktivnykh rayonov Uzbekistana. Tashkent: Fan, 1973. 95 p. (in Russian)].
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с. [Medvedev S.V., Sponheuer W., Kárník V. Seismic Intensity Scale MSK-64. Moscow: Interdepartmental Geophysical Commission of the USSR Acad. Sci. Publ., 1965. 11 p. (in Russian)].
- Нурматов У.А., Юсупов Ш.С., Шин Л.Ю., Юсупджанова У.А. Связь особенностей проявления гидрогеосейсмологических предвестников землетрясений с сеймотектонической обстановкой // Геология и минеральные ресурсы. 2016. № 2. С. 38–43 [Nurmatov U.A., Yusupov Sh.S., Shin L.Yu., Yusupdjanova U.A. Seismotectonic conditions influence of display of hydrogeoseismologic precursors earthquakes // Geologiya i mineral'nyye resursy. 2016. № 2. P. 38–43 (in Russian)].
- Пиннекер Е.В. Особенности прогнозирования сильных землетрясений по гидрогеологическим предвестникам // Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 74–76 [Pinneker Ye.V. Osobennosti prognozirovaniya sil'nykh zemletryaseniy po gidrogeologicheskim predvestnikam // Osnovy gidrogeologii. Geologicheskaya deyatel'nost' i istoriya vody v zemnykh nedrakh. Novosibirsk: Nauka, 1982. P. 74–76 (in Russian)].
- Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: Изд-во «ФАН» Уз ССР, 1976. 262 с. [Earthquake forerunners searching. Tashkent: FAN Publishers, Uzbek SSR, 1976. 262 p. (in Russian)].
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27 [Riznichenko Yu.V. Razmery ochaga korovogo zemletryaseniya i seysmicheskiy moment // Issledovaniya po fizike zemletryaseniy. M.: Nauka, 1976. P. 9–27 (in Russian)].
- Рикитак Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с. [Rikitake T. Earthquake Prediction // Developments in Solid Earth Geophysics. V. 9. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976. 357 p.].
- Султанходжаев А.Н., Азизов Г.Ю., Лунева Н.А., Саиджамалов Н.Ф. Результаты изучения вариации углекислого газа в подземных водах Восточно-Ферганского полигона в связи с сейсмичностью (1974–1975). Андижан: АКНИО, 1976. 111 с. [Sultanhodzhaev A.N., Azizov G.Yu., Luneva N.A., Saidzhamalov N.F. Rezul'taty izucheniya variatsii uglekislogo gaza v podzemnykh vodakh Vostochno-Ferganskogo poligona v svyazi s seysmichnost'yu (1974–1975). Andijan: AKNIO, 1976. 111 p. (in Russian)].
- Султанходжаев А.Н., Латипов С.У., Хасанова Л.А. и др. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений. Ташкент: Фан, 1983. 134 с. [Sultanhodzhaev A.N., Latipov S.U., Khasanova L.A. et al. Hidrogeoseysmologicheskkiye predvestniki zemletryaseniy. Tashkent: Fan, 1983. 134 p. (in Russian)].
- Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // ДАН. 1967. Т. 176. № 2. С. 319–321 [Ulovov V.I., Mavashev B.Z. A precursor of a strong tectonic earthquake // Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections. 1967. T. 176. № 2. P. 319–321 (in Russian)].
- Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019–V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017–V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6–22 <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201966-22> [Fedotov S.A., Solomatina A.V. Long-Term Earthquake Prediction (LTER) for the Kuril-Kamchatka island arc, June 2019 to May 2024; Properties of Preceding Seismicity from January 2017 to May 2019. The Development and Practical Application of the LTER Method // Journal of Volcanology and Seismology. 2019. V. 13. № 6. P. 349–362. <https://doi.org/10.1134/S0742046319060022>].
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 96–112 [Khatkevich YU.M., Ryabinin G.V. Hydrogeochemical researches on Kamchatka // Complex seismological and geophysical researches of Kamchatka. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatskiy pechatnyy dvor, 2004. P. 96–112 (in Russian)].
- Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании / В кн.: Сейсмическое районирование СССР. Ч. II. Гл. 6. М.: Наука, 1968. С. 95–111 [Shebalin N.V. Metody ispol'zovaniya inzhenerno-seysmologicheskikh dannykh pri seysmicheskom rayonirovani / Seysmicheskoye rayonirovaniye SSSR. Ch. II. Gl. 6. M.: Nauka, 1968. P. 95–111 (in Russian)].
- Юсупов Ш.С. Изотопная геохимия углерода подземных вод Центральной Азии. Ташкент: Сиваш, 2017. 219 с. [Yusupov Sh.S. Izotopnaya geokhimiya ugleroda podzemnykh vod Tsentral'noy Azii. Tashkent: Sivash, 2017. 219 p. (in Russian)].
- Юсупов Ш.С. Особенности формирования изотопного состава углерода в подземных водах (на примере сейсмоактивных районов Средней Азии) // Геохимия. 1994. № 5. С. 732–738 [Yusupov Sh.S. Peculiarities of carbon isotopic composition in underground waters in active seismic regions of Middle Asia // Geokhimiya. 1994. № 5. P. 732–738 (in Russian)].
- Юсупов Ш.С., Нурматов У.А., Шин Л.Ю. и др. Аномальные вариации гидрогеосейсмологических параметров в период возникновения Туябугузского

- и Маржанбулакского землетрясений 25 и 26 мая 2013 г. // Доклады АН РУз: ФАН, 2014. № 6. С. 38–40 [Yusupov Sh.S., Nurmatov U.A., Shin L.Yu. et al. Anomal'nyye variatsii gidrogeoseismologicheskikh parametrov v period vozniknoveniya Tuyabuguzskogo i Marzhanbulakskogo zemletryaseniya 25 i 26 maya 2013 g. // Doklady AN RUz: FAN, 2014. № 6. P. 38–40 (in Russian)].
- Biagi P.F., Ermini A., Cozzio E. et al. Hydrochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988–1997 // *Natural Hazards*. 2000a. V. 21. P. 263–276. <https://doi.org/10.1023/A:1008178104003>.
- Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P. et al. Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia) // *Pure and Applied Geophysics*. 20006. V. 157. P. 1359–1377. <https://doi.org/10.1007/PL00001123>.
- Kopylova G., Boldina S. Anomalies in Groundwater Composition Caused by Earthquakes: Examples and Modeling Issues // *E3S Web of Conferences* V. 98. P. 01029 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199801029>.
- 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.
- Skelton A., Liljedahl-Claesson L., Wästeby N. et al. Hydrochemical changes before and after earthquakes based on long-term measurements of multiple parameters at two sites in northern Iceland – A review // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. V. 124. № 3. P. 2702–2720. <https://doi.org/10.1029/2018JB016757>.
- Thomas D. Geochemical precursors to seismic activity // *Pure and Applied Geophysics*. 1988. V. 126. № 2–4. P. 241–266. <http://doi.org/dx.doi.org/10.1007/BF00878998>.
- Tsunogai U., Wakita H. Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan // *Science*. 1995. V. 269. Iss. 5220. P. 61–63. <https://doi.org/10.1126/science.269.5220.61>.
- Wang C.-Y. Liquefaction beyond the near field // *Seismological Research Letters*. 2007. V. 78. № 5. P. 512–517. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.5.512>.
- Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water / *Lecture Notes in Earth Sciences*. V. 114. Berlin: Springer, 2010. 249 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00810-8>.
- Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J. Modelins of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // *Geophysical Journal International*. 2004. V. 157 Iss. 2. P. 717–726. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02240.x>.

HYDROGEOCHEMICAL EARTHQUAKE PRECURSORS (ON THE EXAMPLE OF AREAS OF THE KAMCHATKA PENINSULA, RUSSIA, AND THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN)

G.N. Kopylova¹, Sh.S. Yusupov², Yu.K. Serafimova¹, L.Yu. Shin², S.V. Boldina¹

¹Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006; e-mail: gala@emsd.ru

²Institute of Seismology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan, 100128; e-mail: shuhrat-1951@mail.ru

Hydrogeochemical precursors of the earthquakes (HGCP) in changes of ion-salt and gas composition of underground waters from self-discharging wells and springs on the territory of Petropavlovsk-Kamchatsky test site, Kamchatka Peninsula, Russia and Tashkent test site, Republic of Uzbekistan are considered. There has been analyzed the connection of HGCP with parameters of earthquakes — with correlation between magnitudes and epicentral distances, as well as with values of specific density of seismic energy in the wave, intensity of ground shaking and other parameters of earthquake impact in the regions of observation. In Kamchatka wells HGCP were revealed before the earthquakes with $M_w = 6.5$ to 7.8 at epicentral distances $d_e = 100$ to 310 km at relatively narrow ranges of values of seismic energy density in the wave (0.1 to 0.3 J/m³), volumetric coseismic deformation of water-containing rocks (one to tens 10⁻⁹) and maximal velocities of seismic waves (3.5–7.7 cm/sec). HGCP took place in the zones with intensity of the earthquakes not less than 4 to 6 by *MSK-64* scale and were confined to the intermediate zones of sources of future earthquakes. Duration of HGCP development and their appearance before the following earthquakes amount to 1 to 9 months, which allows using such precursors for prediction of time of strong earthquakes.

Keywords: well, groundwater chemistry, earthquake, magnitude, precursor.

Поступила в редакцию 16.06.2020 г.

После доработки 15.10.2020 г.

Принята в печать 16.12.2020 г.