

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ САМОИЗЛИВАЮЩИХСЯ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА (НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИНЫ ГК-1, ПОЛУОСТРОВ КАМЧАТКА)

© 2022 Г.В. Рябинин

*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; e-mail: gena@emsd.ru*

Поступила в редакцию 09.12.2021 г.; после доработки 24.11.2022 г.; принята к публикации 26.12.2022 г.

Самоизливающаяся скважина ГК-1 расположена в юго-восточной части полуострова Камчатка. Скважина входит в состав сети непрерывных наблюдений за режимом подземных вод, проводящихся с целью выявления и изучения гидрогеохимических предвестников сильных камчатских землетрясений. В статье рассматриваются данные по изменению дебита и химического состава воды скважины за период с 1970 по 2022 гг. Предметом анализа являются гидрогеохимические эффекты, проявляющиеся в условиях нестационарного режима, возникающего вследствие дренирования скважиной напорного пласта и в результате изменения забойного давления. В рамках представлений о водовмещающих горных породах как о гетерогенно-блоковой среде с двойной пористостью, обсуждаются механизмы образования длительных (десятилетия) и относительно краткосрочных (десятьки суток) изменений химического состава воды на устье самоизливающейся скважины ГК-1.

*Ключевые слова:* Камчатка, самоизливающаяся скважина, гидрогеохимические эффекты, гетерогенно-блоковая среда.

### ВВЕДЕНИЕ

В гидрогеологии под нестационарным режимом понимается такой режим фильтрационного потока подземных вод, при котором происходит изменение во времени его характеристик (обычно напора или расхода). Уравнения нестационарного режима фильтрации включают в себя производные по времени от характеристик потока с коэффициентами, характеризующими процессы упругой (для напорных пластов) или гравитационной (для безнапорных пластов) водоотдачи (Мироненко, 2001). Частным случаем реализации нестационарного режима является разгрузка вскрытого скважиной напорного водоносного пласта, когда статический пьезометрический уровень располагается выше земной поверхности. Такие скважины называются самоизливающимися или фонтанирующими. С начала работы самоизливающейся скважины, пьезометрический уровень в ней (динамический уровень) устанавливается на отметке водослива и остается неизменным во времени, тогда как пьезометрические уровни во всех остальных точках пласта снижаются (Боचेвер, 1976).

Закономерности изменения гидродинамических показателей в условиях нестационарного режима хорошо изучены и широко используются на практике для определения фильтрационных и емкостных свойств водовмещающих пород (Бузинов, Умрихин, 1973). Анализ же закономерностей изменений химического состава подземных вод в условиях нестационарного режима уделяется значительно меньше внимания.

На Камчатке с 1977 г. самоизливающиеся скважины используются для изучения изменений в режиме подземных вод, которые предшествуют и сопутствуют сильным тектоническим землетрясениям. За многолетний период исследований были получены уникальные данные, в том числе, и об изменении химического состава подземных вод перед сильными сейсмическими событиями. Результаты исследований гидрогеохимических предвестников землетрясений отражены в многочисленных научных публикациях, среди которых отметим лишь работы обобщающего характера (Копылова и др., 1994, 2019, 2022; Рябинин, Хаткевич, 2009; Хаткевич, Рябинин, 2006; Kopylova, Boldina, 2020).

Проявление гидрогеохимических предвестников землетрясений можно рассматривать как особый вид нестационарного режима, возникающего в системе «пласт – скважина» в результате изменения напряженно-деформированного состояния среды на стадии подготовки землетрясения. В этой связи, по мнению автора, ключом к пониманию механизмов образования гидрогеохимических предвестников землетрясений является анализ имеющихся данных по изменению химического состава подземных вод в условиях нестационарного режима, который инициируется контролируруемыми воздействиями (факторами) на систему «пласт – скважина». В качестве таких воздействий можно рассматривать как вскрытие и дренирование напорного водоносного горизонта скважиной, работающей в режиме самоизлива, так и другие технические манипуляции на устье такой скважины (открытие – закрытие самоизливающейся скважины, изменение конструкции оголовка).

В настоящей работе рассматриваются изменения химического состава воды самоизливающейся скважины ГК-1. Продолжительность наблюдений на этой скважине составляет более пятидесяти лет, что само по себе является нерядовым случаем. Основное внимание в работе сосредоточено на изменениях расхода и химического состава воды, не связанных с сильными тектоническими землетрясениями. По этой причине гидродинамические и гидрогеохимические эффекты, ассоциируемые с процессами подготовки и реализации землетрясений, рассматриваются лишь в той мере, в которой это необходимо для общего описания результатов многолетних наблюдений.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА СКВАЖИНЫ ГК-1 И РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Самоизливающаяся скважина ГК-1 (53°17'07" с.ш., 158°24'34" в.д.) расположена в юго-восточной части полуострова Камчатка (рис. 1). Скважина была пробурена в 1970 г. до глубины 1261 м с целью поиска термоминеральных вод. Вскрытый скважиной разрез представлен отложениями четвертичного, неогенового и верхнемелового возрастов (рис. 2). Все данные о конструкции скважины, результатах ее бурения и опробования, лабораторных исследований заимствованы из отчета<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Овчеренко В.В. Наумов Л.Т., Ворожейкина Л.А. Отчет о результатах поисковых работ на термальные воды, проведенных в юго-западной части района Корякско-Авачинской группы вулканов (участок высоты 202) в 1970–1971 гг. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 328. п. Термальный, 1971. 126 с.

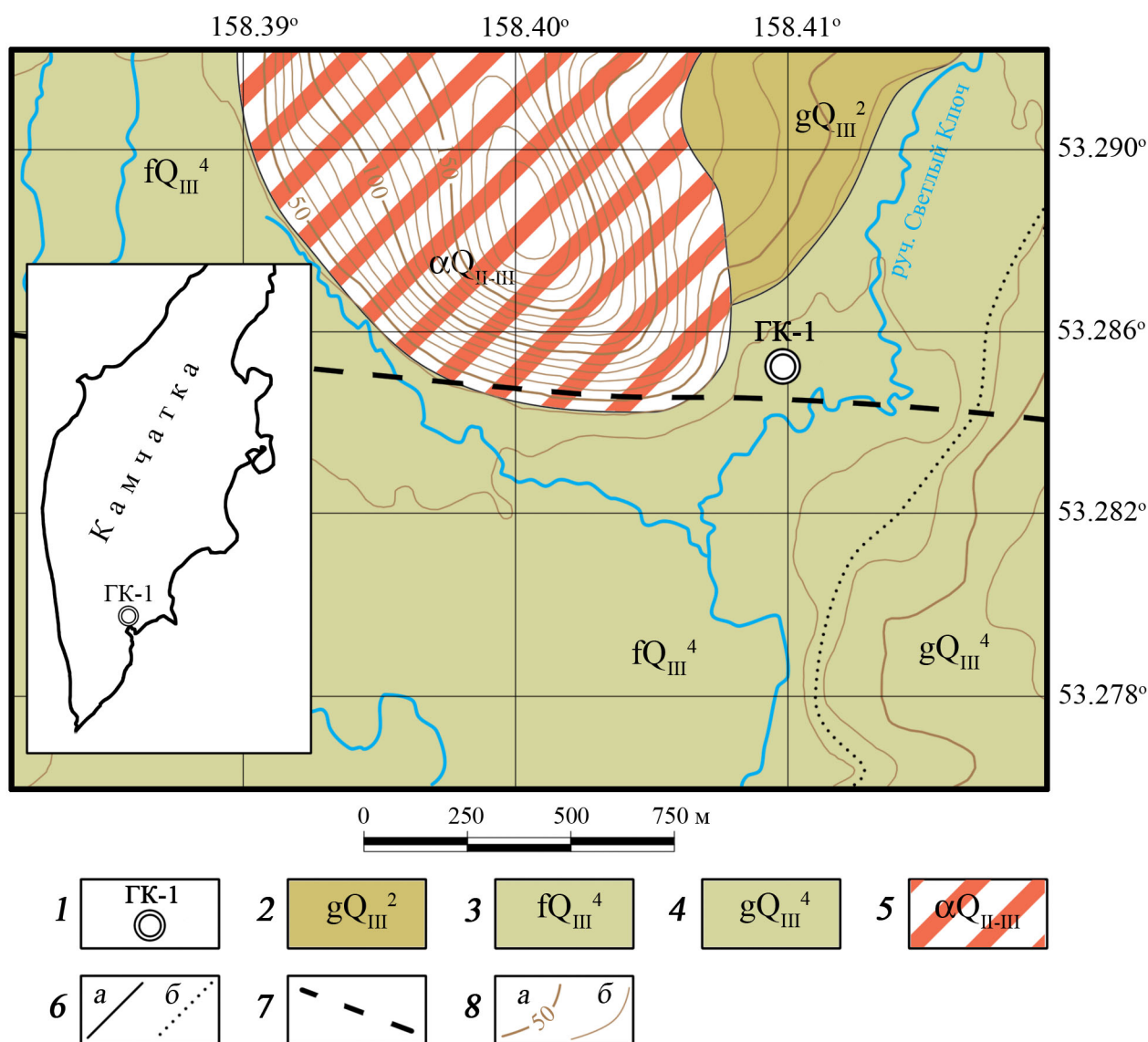
В процессе бурения, при достижении скважиной глубин 406.5 м, 617 м и 694 м, были проведены пробные выпуски с отбором проб воды на ее устье. По окончании бурения был выполнен пробный выпуск с последующим закрытием скважины для проведения наблюдений за восстановлением давления. После этого был проведен опытный выпуск длительностью 105 часов, в процессе которого с устья скважины были отобраны пробы воды для ее количественного химического анализа (КХА). На момент проведения опытного выпуска (5.10.1970 г.) дебит самоизлива скважины составлял 2.25 л/с, температуры воды на устье и забое равнялись, соответственно, 28.7 и 53.5°C, статический уровень устанавливался на высоте 13.2 м от поверхности земли.

По результатам опытного выпуска коэффициент фильтрации пород открытой части ствола скважины оценивался величиной 0.023 м/сут. ( $2.26 \times 10^{-7}$  м/с). Лабораторные исследования физических свойств образцов керны были выполнены только для вулканогенно-осадочных образований неогеновой толщи. По результатам исследований пористость пород по керну, отобранному с глубин 601–1041 м, варьировала в пределах 20–29%, пористость насыщения — 17–26%. Проницаемость образцов керны оказалась очень низкой и характеризовалась величинами 0.4–0.5 мдарси или  $4 \times 10^{-12}$ – $5 \times 10^{-12}$  см<sup>2</sup>, что соответствует коэффициенту фильтрации порядка 0.001 м/сут. ( $1.16 \times 10^{-8}$  м/с). Таки образом, коэффициент фильтрации пород неогеновой толщи в естественном залегании примерно в 20 раз превышает коэффициент фильтрации пород в монолитном образце. Из этого следует, что фильтрационные свойства разреза всецело определяются характером и степенью трещиноватости, на что указывают и авторы отчета<sup>1</sup>.

Результаты КХА проб воды, отобранных на устье скважины в процессе проведения пробных и опытных выпусков, показали, что с увеличением ее глубины происходил рост концентрации ионов хлора, натрия, кальция и уменьшение содержания гидрокарбонат-иона и иона магния (рис. 2). Минерализация изливающейся воды, по мере углубки скважины, увеличивалась с 2.2 до 4.2 г/л.

Во время проведения выпусков, начиная с глубины 406.4 м, скважина интенсивно газировала. Во всех пробах свободного газа преобладал метан (от 58 до 90 %об.). После окончания бурения, по результатам измерений дебита свободного газа и дебита воды, газовый фактор составлял 0.27.

На рисунке 3 представлен график изменения дебита скважины ГК-1 за период с момента проведения на скважине опытного выпуска и до 2022 г. Первые два замера дебита



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта участка заложения скважины ГК-1: 1 — скважина ГК-1; 2–4 — верхнеплейстоценовые ледниковые и водноледниковые отложения: 2 — ледниковые отложения первой стадии второго оледенения, 3 — водноледниковые отложения второй стадии второго оледенения, 4 — ледниковые отложения второй стадии второго оледенения; 5 — экструзия андезитов средне-верхнеплейстоценового возраста; 6 — границы: а — геологические, б — фациальные; 7 — тектоническое нарушение субширотного простирания, выделенное по результатам геофизических исследований; 8 — изолинии рельефа: а — основные — проведены через 50 м, б — вспомогательные — проведены через 10 м. Остальные пояснения в тексте. Карта построена на основе материалов Государственной геологической карты масштаба 1:200000 (лист N-57-XXVII) (Шеймович, 2000) и материалов отчетов<sup>2,3</sup>.

**Fig. 1.** Schematic geological map of the GK-1 well site: 1 — GK-1 well; 2–4 — Upper Pleistocene glacial and fluvioglacial deposits: 2 — glacial deposits of the first stage of the second glaciation, 3 — fluvioglacial deposits of the second stage of the second glaciation, 4 — glacial deposits of the second stage of the second glaciation; 5 — andesite extrusion of middle-upper Pleistocene age; 6 — boundaries: а — geological, б — facies; 7 — a fault identified by geophysical studies; 8 — relief isolines: а — main — drawn at 50 m, б — auxiliary — drawn at 10 m. The rest of the explanations are in the text. The map is based on the materials of the State Geological Map (sheet N-57-XXVII) at a scale of 1:200000 (Sheymovich, 2000) and materials of the reports<sup>2,3</sup>.

<sup>2</sup> Евтухов А.Д., Чебыкин И.Н., Петракова Т.П. Отчет о детальных поисках термальных вод на Кеткинском участке Пиначевской геотермальной площади в 1986–1994 гг. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу» № 5780. п. Термальный, 1994. 534 с.

<sup>3</sup> Иванов В.А., Тимошенко Т.Д. Отчет о геофизических работах, проведенных с целью поисков термальных вод в районе Авачинской депрессии в 1969 году. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу» № 3008. п. Елизово, 1970. 135 с.

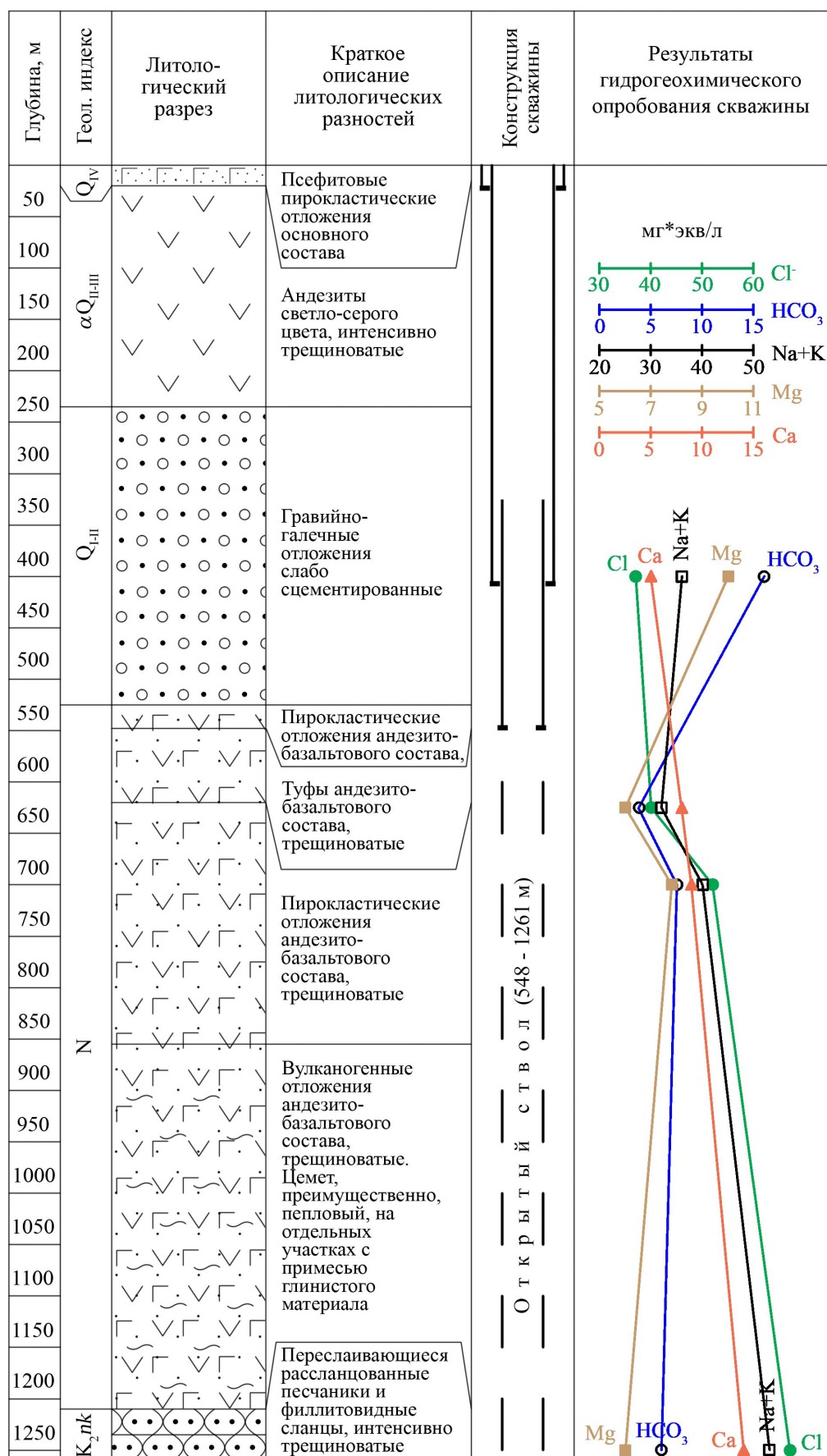
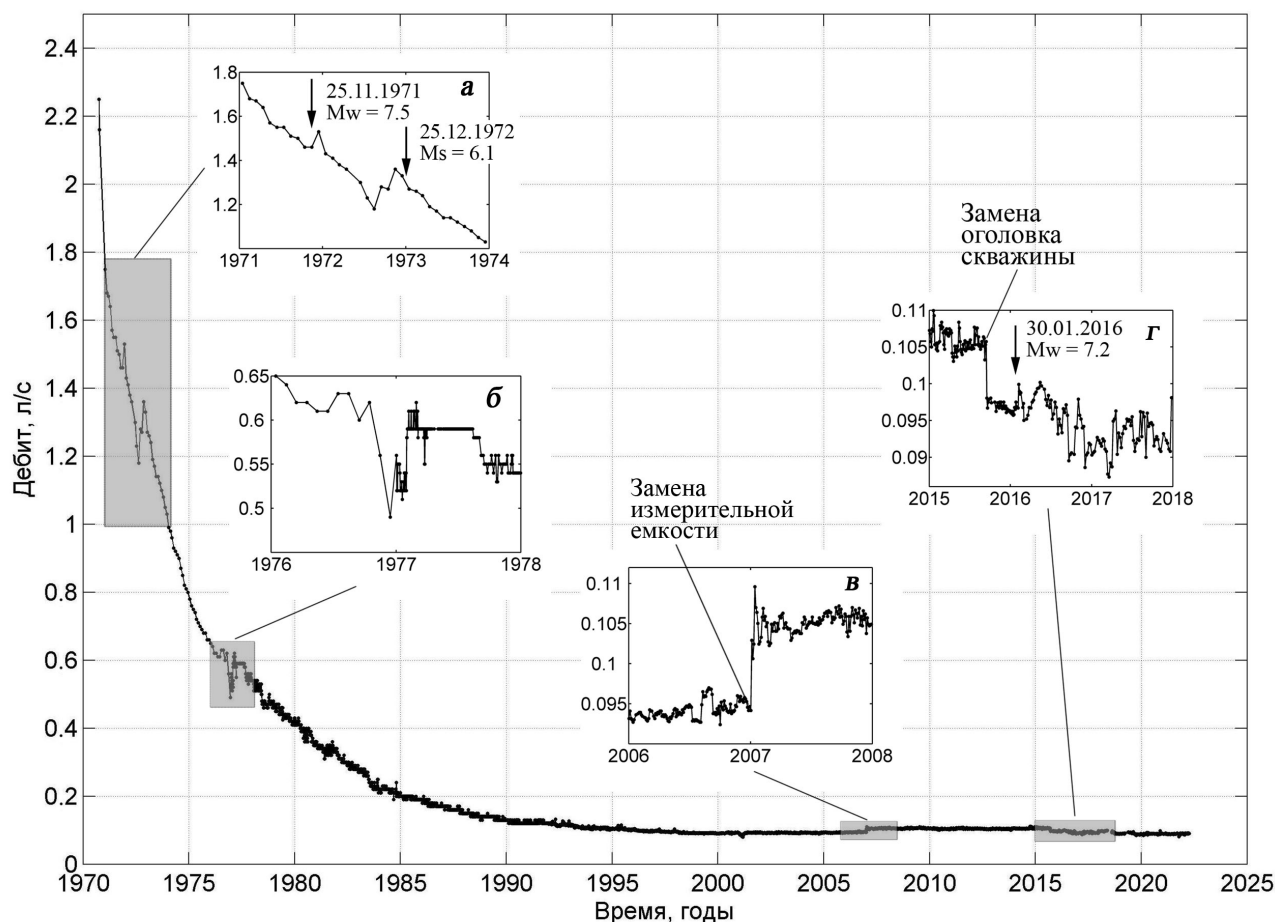


Рис. 2. Схематический геолого-технический разрез скважины ГК-1, построенный по материалам отчета<sup>1</sup>.

Fig. 2. Schematic geological and technical section of the ГК-1 well, based on the materials of the report<sup>1</sup>.





**Рис. 3.** Изменение дебита самоизлива скважины ГК-1. На врезках *a–г* детализированы отдельные участки кривой изменения дебита. Вертикальными стрелками на врезках обозначены моменты некоторых сильных землетрясений.

**Fig. 3.** Change in the self-discharge rate of the GK-1 well. Boxes *a–г* detail individual sections of the flow rate curve. The vertical arrows in the boxes indicate the moments of some strong earthquakes.

(5.10.1970 г. и 6.10.1970 г.) заимствованы из отчета<sup>1</sup>. Данные об изменении дебита с января 1971 г. по декабрь 1976 г., представляющие собой средне-месячные величины, заимствованы из отчетов<sup>4,5</sup>. Остальные данные по дебиту скважины взяты из базы данных гидрогеохимических наблюдений Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

С 1970 г. до 2000 г. дебит скважины снижался с 2.25 л/с до 0.09 л/с (рис. 3). При этом скорость сни-

жения дебита со временем падала. В этот период на фоне общего снижения дебита отмечались разнонаправленные его вариации (рис. 3*a, б*).

Увеличение дебита скважины в конце 1971 г. авторами отчета<sup>4</sup> связывалось с процессами последствия сильного землетрясения 25.11.1971 г. имевшего магнитуду  $M_w = 7.5$  (Гусев, 2004), эпицентр которого находился на расстоянии 95 км от скважины ГК-1. Описание воздействия этого землетрясения на режим скважины ГК-1 представлено в работе (Гриц и др., 1983). Изменение среднемесячных значений дебита скважины, которое наблюдалось во второй половине 1972 г. (рис. 3*a*), могло быть связано с землетрясением 25.12.1972 г. ( $M_s = 6.1$ ), произошедшем на расстоянии 103 км от скважины (Гриц и др., 1983).

Изменение дебита, наблюдавшееся в конце 1976 г. — начале 1977 г. (рис. 3*б*), по-видимому, связано с нарушением герметичности оголовка скважины (падение дебита при измерениях на водосливе) и его заменой в 1977 г. До 1977 г. наблюдения на скважине проводились

<sup>4</sup> Павлова Л.Е., Ефремова Л.А., Новикова Э.В. Сводный отчет по изучению режима подземных вод на территории Камчатской области за период 1964–1975 гг. (в 5-ти томах). Т. 3. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу» № 4201. г. Елизово, 1979. 303 с.

<sup>5</sup> Мальцева К.И., Новикова Э.Н., Васькин В.С. Многолетний отчет по изучению режима подземных вод на территории Камчатской области за 1981–1985 гг. (в 8 книгах). Кн. 7. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу» № 5297. п. Термальный, Камчатской области, 1988. 161 с.

сотрудниками гидрогеологической экспедиции Камчатского территориального геологического управления. С 1977 г. наблюдения на скважине стали выполняться силами сотрудников Института вулканологии ДВНЦ АН СССР. С 1979 г. по настоящее время такие наблюдения перешли в ведение КФ ФИЦ ЕГС РАН (Копылова, Болдина, 2019).

С 2000 по 2007 гг. дебит скважины стабилизировался на значении 0.09 л/с. 5 января 2007 г. была заменена емкость для измерения расхода воды. Это отразилось в данных наблюдений в виде скачкообразного увеличения дебита скважины ГК-1 на 0.009 л/с (рис. 3в). После этого до сентября 2015 г. расход самоизлива скважины составлял в среднем 0.105 л/с.

16 сентября 2015 г. на скважине ГК-1 были проведены ремонтные работы, связанные с заменой ее оголовка. Замена оголовка выполнялась с целью размещения в стволе скважины специализированного оборудования для геоакустических измерений. Работы проводились сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН при участии сотрудников КФ ФИЦ ЕГС РАН.

В результате ремонтных работ старый оголовок, установленный в конце 1976 г., был полностью демонтирован и на его месте был установлен новый оголовок. Высота нового оголовка увеличилась на 0.8 м. Примерно на эту же величину изменилось положение водосливного патрубка (рис. 4).

Увеличение высоты оголовка привело к уменьшению дебита скважины (рис. 3г). По результатам измерений, выполненных в следующие после проведения ремонтных работ сутки (17.09.2015 г.), амплитуда уменьшения дебита составила 0.008 л/с.

В феврале 2016 г. над скважиной был установлен защитный павильон (металлическая будка), а регулярные геоакустические измерения в стволе скважины были начаты в 2018 г. (Гаврилов и др., 2021).

С начала работы скважины в режиме самоизлива химический состав воды на ее устье менялся. Наиболее ярко этот процесс проявился в изменении содержаний в воде ионов хлора и гидрокарбоната (рис. 5). Первые по порядку точки на графиках рисунка 5 соответствуют результатам КХА проб, отобранных 18 декабря 1970 г.<sup>3</sup> Вторая и третья точки на графиках соответствуют результатам КХА проб, отобранных 1 декабря 1971 г. и 13 октября 1975 г.<sup>4</sup> Остальные данные (со 2 января 1977 г.) взяты из базы данных гидрогеохимических наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Весь период наблюдений за химическим составом воды скважины ГК-1 (1970–2022 гг.)

с определенной степенью условности можно разбить на четыре временных интервала (рис. 5). В границах первого интервала в воде скважины происходило постоянное увеличение содержания иона хлора и уменьшение содержания гидрокарбонат-иона. Этот же период характеризовался ростом содержаний в воде ионов кальция и натрия, а так же увеличением минерализации воды с 4.2 до 9.6 г/л. Рассматриваемый временной интервал интересен еще и тем, что в изменении содержания хлоридов были выявлены вариации, интерпретированные как гидрогеохимические предвестники землетрясений (Копылова и др., 1994; Хаткевич, 1994). Эти вариации представляли собой уменьшение концентрации хлор-иона перед землетрясениями 6.10.1987 г. и 2.03.1992 г., на фоне ее общего увеличения.

Второй интервал характеризовался относительной стабилизацией изменения химического состава воды скважины, на фоне которой имело место проявление аномальных вариаций, ассоциируемых с сильным землетрясением 5.12.1997 г. (Копылова и др., 2022; Левина и др., 2003; Kopylova, Boldina, 2021). Перед землетрясением происходило сначала уменьшение содержания хлоридов, а потом его увеличение. После землетрясения рост содержания хлоридов

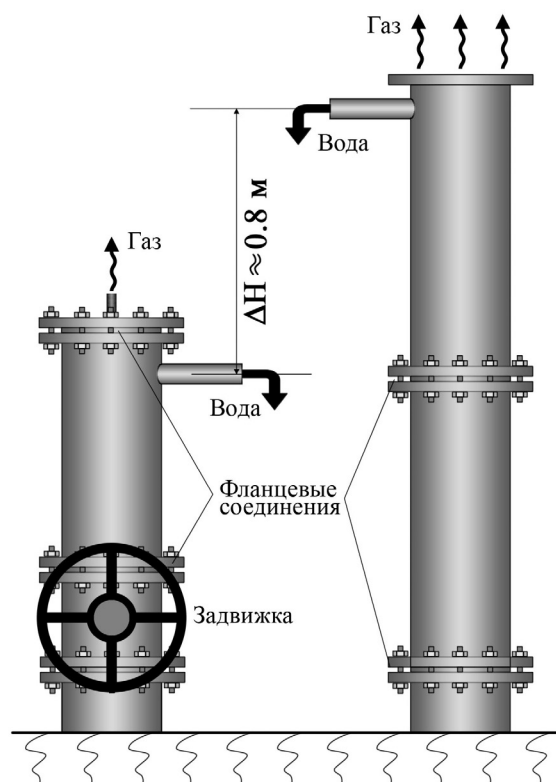
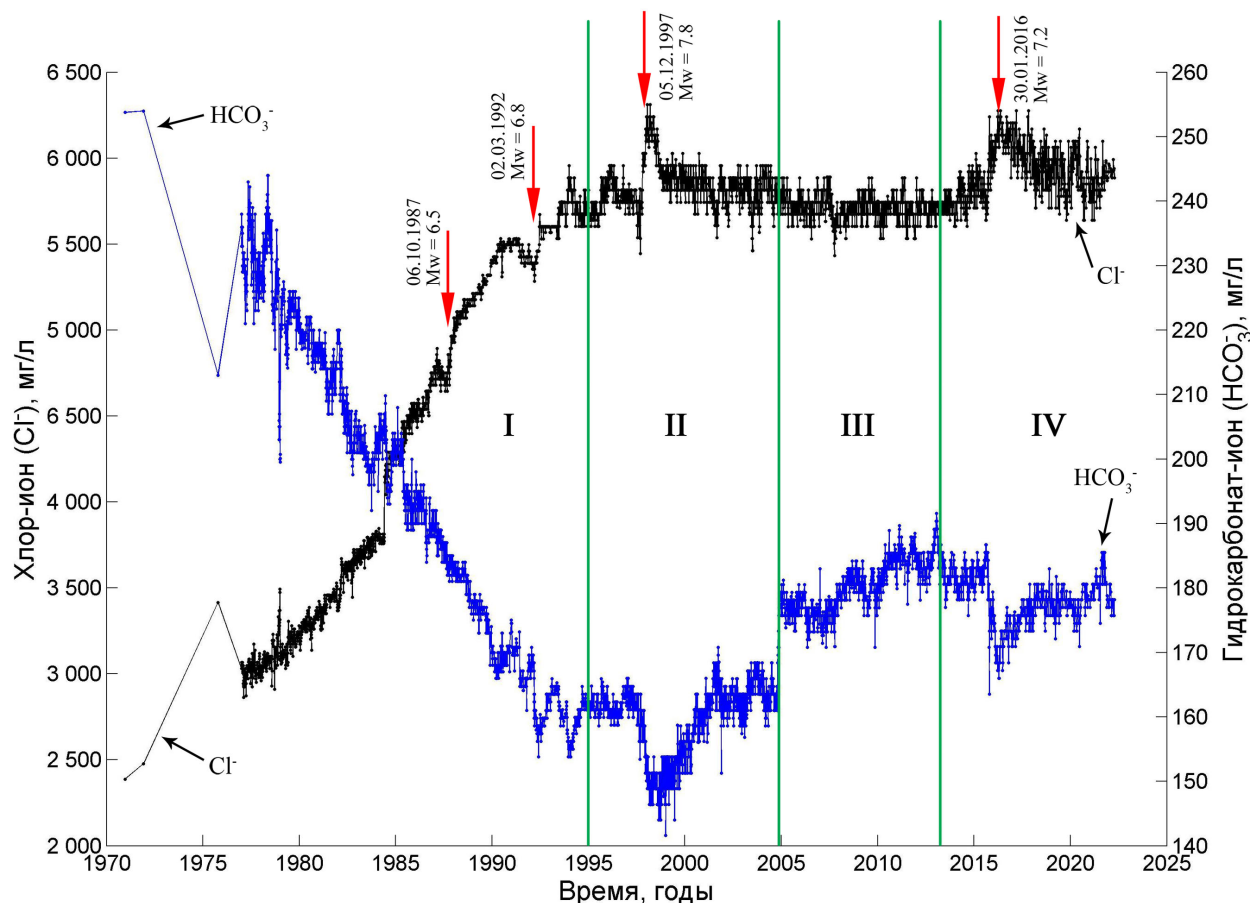


Рис. 4. Конструкция оголовка скважины ГК-1 до проведения ремонтных работ (слева) и после проведения ремонтных работ (справа).

Fig. 4. The design of the head of the GK-1 well before repair work (left) and after repair work (right).



**Рис. 5.** Изменения содержаний хлоридов и гидрокарбонатов в воде скважины ГК-1 за весь период наблюдений: I–IV — условные границы временных интервалов (пояснения в тексте). Вертикальными стрелками показаны моменты отдельных сильных землетрясений, перед которыми наблюдались гидрогеохимические предвестники. Величины моментов магнитуд  $M_w$  заимствованы из каталога Global CMT (Ekström, 2012).

**Fig. 5.** Changes in chloride and hydrocarbonate concentrations in the water of the GK-1 well over the entire observation period: I–IV — conditional boundaries of time intervals (explanations in the text). Vertical arrows show the moments of individual strong earthquakes, before which hydrogeochemical precursors were observed. The values of the moment magnitudes  $M_w$  are taken from the Global CMT catalog (Ekström, 2012).

в воде скважины продолжился, сменившись впоследствии фазой восстановления. Изменение концентрации гидрокарбонат-иона в связи с этим сейсмическим событием, относительно изменения содержания хлоридов, имели зеркальный характер.

Начиная с 2005 г. и до середины 2013 г. (III интервал) в изливающейся воде наблюдалось незначительное снижение, с последующей стабилизацией, содержания хлоридов и увеличение содержания гидрокарбонатов. Четвертый интервал (2013–2022 гг.) интересен по двум причинам. Во-первых, 30.01.2016 г. в юго-восточной части п-ва Камчатка произошло сильное землетрясение, получившее наименование Жупановское ( $M_w = 7.2$ ) (Чебров и др., 2016). В воде скважины ГК-1 этому сейсмическому событию предшествовал рост содержания хлоридов и противоположенное ему изменение содержания гидрокарбонатов (рис. 5). При этом характер изменения этих гидрогеохимических

показателей до и после землетрясения соответствовал характеру их изменения в связи землетрясением 5.12.1997 г. Аналогичные изменения содержания хлоридов перед Жупановским землетрясением наблюдались и в других самоизливающихся скважинах камчатской сети гидрогеохимических наблюдений (Рябинин, Полетаев, 2021).

Вторая причина особого интереса к интервалу под номером IV заключается в том, что в сентябре 2015 г. на скважине были проведены работы по замене ее оголовка. Через 15–20 суток после окончания ремонтных работ в воде скважины ГК-1 произошли изменения содержаний макрокомпонентов ее химического состава. Наиболее контрастно эти изменения проявились в увеличении концентраций ионов хлора и кальция и уменьшении концентрации гидрокарбонат-иона (рис. 6). Амплитуды этих вариаций превосходили удвоенную величину случайной погрешности, которая регламентируется исполь-

зующимися методиками КХА<sup>6,7,8</sup> и составляет для хлор-иона  $0.02 \times C$ , гидрокарбонат-иона —  $0.03 \times C$ , иона кальция —  $0.03 \times C$ , где  $C$  — аналитически определенное значение концентрации соответствующего иона в пробе воды. Экстремальные значения содержаний гидрокарбонат-иона и ионов хлора и кальция фиксировались через 30 суток после проведения ремонтных работ на скважине. Длительность гидрогеохимических эффектов не превышала 1 месяца.

С 2020 г. и по настоящий момент изливающаяся из скважины вода имеет минерализацию 9.8–10.0 г/л и хлоридный, кальциево-натриевый состав. Температура воды на устье составляет, в среднем, 16°C. Дебит скважины не превышает 0.1 л/с (рис. 3). Скважина интенсивно газифицируется, в составе растворенного и свободного газа преобладает метан. Объем ствола скважины составляет примерно 16 м<sup>3</sup>. Время полного водообмена равно 1.9 суток (Копылова, Болдина, 2012).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

За весь период гидрогеологических наблюдений на самоизливающейся скважине ГК-1 можно выделить два типа разномасштабных гидрогеохимических эффектов, не связанных с сейсмичностью, которые проявились в условиях нестационарного режима. К первому типу относятся многолетние изменения содержаний гидрогеохимических показателей. Ярким примером таких изменений является увеличение содержания хлоридов и уменьшение содержания гидрокарбонатов в воде скважины в период с 1970 по 1995 гг. (рис. 5, интервал I). В качестве эффекта второго типа будем рассматривать относительно краткосрочные изменения химического состава воды, наблюдавшиеся после замены оголовка скважины в 2015 г. (рис. 6).

Многолетние изменения показателей макрокомпонентного состава воды скважины коррелируют с многолетним изменением ее дебита. В период с 1970 по 1995 гг., одновременно с уменьшением дебита, в воде скважины происходило увеличение содержания хлоридов и уменьшение содержания гидрокарбонатов (рис. 3, 5). Собственно, в уменьшении дебита скважины

ГК-1 нет ничего необычного. Решение задачи об изменении дебита самоизливающейся скважины  $Q$  в условиях однородного напорного пласта имеет вид (Бочеввер, 1976):

$$Q = \frac{4\pi TS_0}{\ln\left(\frac{2.25at}{r_c^2}\right)} \quad (1)$$

где  $T$  — коэффициент водопроводимости пласта;  $S_0$  — понижение статического пьезометрического уровня;  $a$  — коэффициент пьезопроводности пласта;  $t$  — время;  $r_c$  — радиус скважины. Из решения (1) следует, что уменьшение дебита самоизлива происходит обратно пропорционально логарифму времени и зависит от величин коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности пласта, а также от величины понижения напора. При этом падающий со временем водопиток к скважине формируется за счет сработки упругих запасов.

Многолетние изменения гидрогеохимических показателей также обусловлены сработкой упругих запасов пласта. В соответствии с изложенными сведениями, скважина дренирует в основном толщу вулканогенно-осадочных отложений неогенового возраста (рис. 2). Фильтрационные свойства этих отложений определяются преимущественно трещинной проницаемостью. Результаты гидрогеохимического опробования скважины в процессе ее бурения показали, что с увеличением глубины изливающаяся вода обогащалась ионами хлора, кальция, натрия и калия. Содержания же иона магния и гидрокарбонат-иона, напротив, уменьшались. Источником более минерализованных вод являются нижележащие метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения верхнемелового возраста. В работе (Таран и др., 2021) по совокупности гидрогеохимических (в том числе и изотопных) показателей продемонстрировано, что подземные воды верхнемеловой толщи относятся к седиментогенным, высокоминерализованным, хлоридным натриевым водам с высоким содержанием кальция. Естественными зонами разгрузки этих вод в вышележащие гидрогеологические подразделения являются тектонические нарушения. Скважина ГК-1 была пробурена в зоне тектонического нарушения субширотного простирания (рис. 1) по которому, очевидно, и происходит восходящая фильтрация седиментогенных вод (рис. 7). Изливающаяся из скважины вода является результатом смешения высокоминерализованных подземных вод, поступающих по зоне разлома, и менее минерализованных вод неогеновых вулканогенно-осадочных отложений.

Водонасыщенные горные породы, дренируемые скважиной ГК-1, с учетом преимущественно

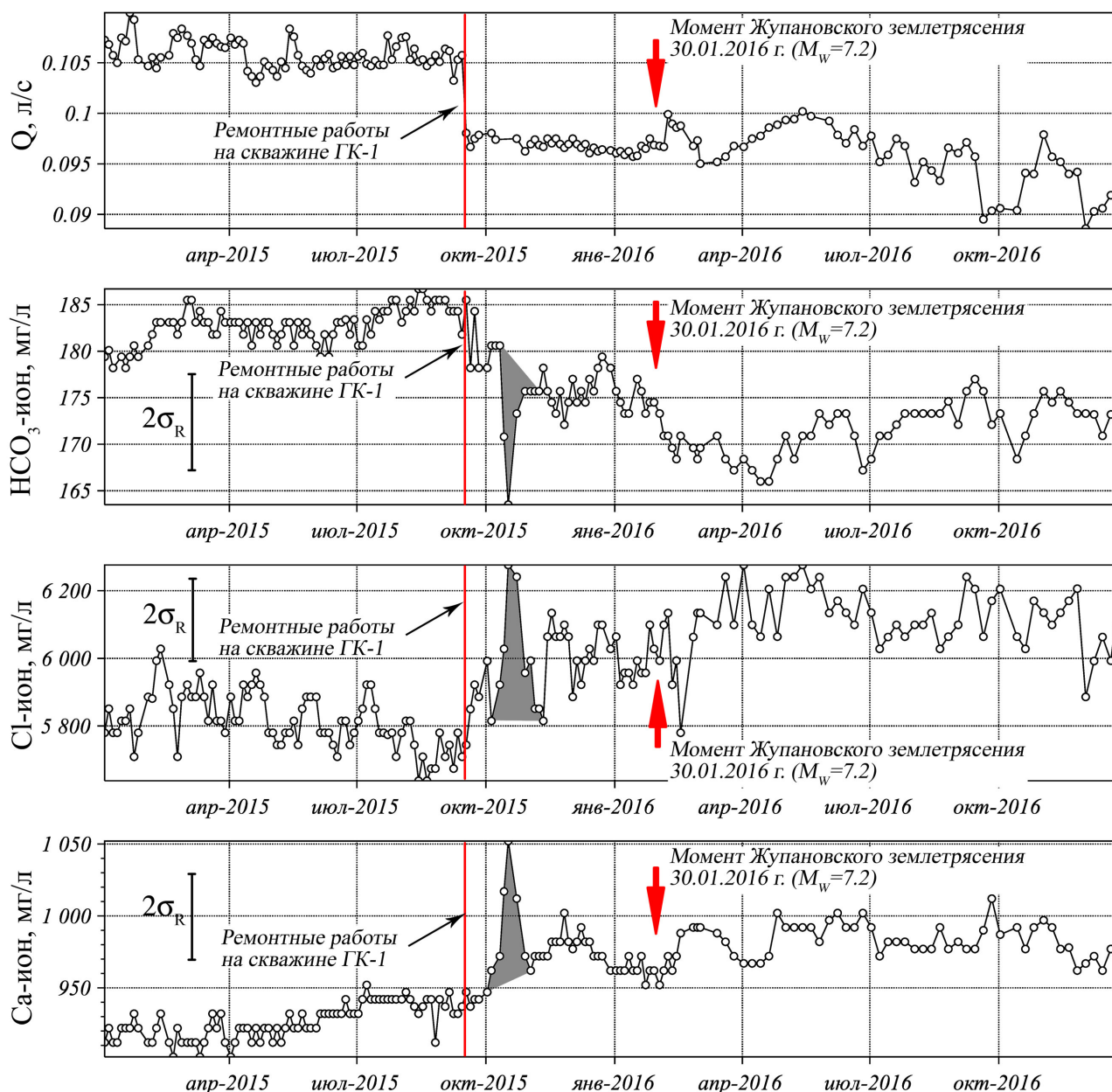
<sup>6</sup> ПНДФ 14.1:2. 96-97. Методика выполнения измерений содержаний хлоридов в пробах природных и очищенных сточных вод аргентометрическим методом. 1997. 16 с.

<sup>7</sup> ПНДФ 14.2. 99-97. Методика выполнения измерений содержаний гидрокарбонатов в пробах природных вод титриметрическим методом. 1997. 15 с.

<sup>8</sup> ПНДФ 14.1:2. 95-97. Методика выполнения измерений содержаний кальция в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом. 1997. 14 с.



# К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ИЗМЕНЕНИЯ

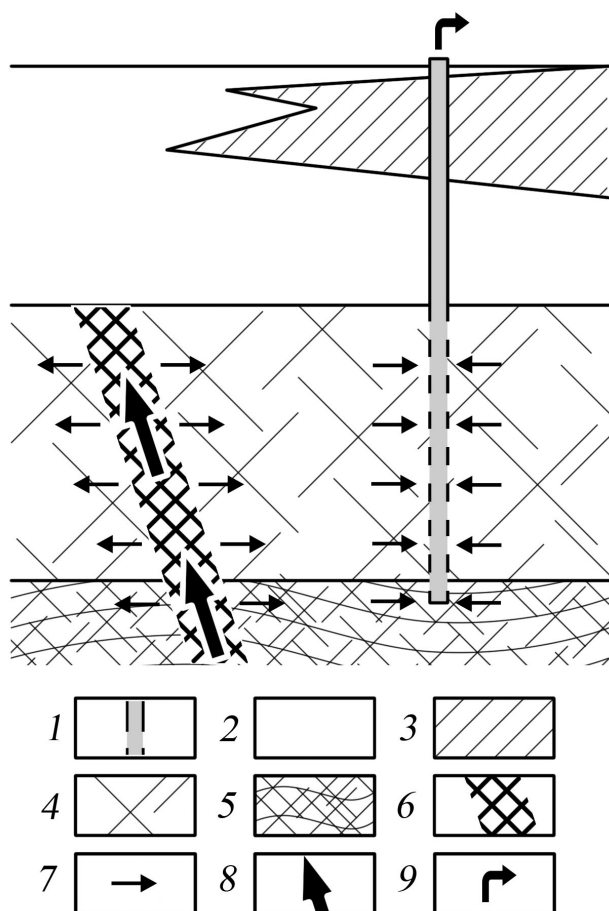


**Рис. 6.** Изменение дебита и отдельных показателей химического состава воды скважины ГК-1. Сплошной заливкой выделены гидрогеохимические эффекты, наблюдавшиеся после проведения ремонтных работ на скважине.  $2\sigma_R$  — удвоенные величины среднеквадратических отклонений, характеризующих случайные погрешности определения гидрогеохимических показателей, регламентируемые соответствующими методиками количественного химического анализа.

**Fig. 6.** Changes in the flow rate and some indicators of the chemical composition of GK-1 well water. Hydrogeochemical effects, observed after the repair work on the well, are highlighted with a solid fill.  $2\sigma_R$  — doubled values of standard deviations characterizing random errors in determination of hydrogeochemical parameters, regulated by appropriate methods of quantitative chemical analysis.

трещинного характера их проницаемости, будем рассматривать как гетерогенно-блоковую среду с двойной пористостью. Подобное представление о геосреде использовалось, в частности, в анализе гидрогеологических условий Кеткинского месторождения термоминеральных вод (Kiryukhin et al., 2022), которое расположено в трех километрах на запад от скважины ГК-1. Среда с двойной пористостью (трещиновато-

стью) представляет собой совокупность слабо-проницаемых зон (блоков), разделенных между собой относительно хорошо проницаемыми макротрещинами. При этом полагается, что движение подземных вод происходит главным образом по макротрещинам, а основные запасы жидкости сосредоточены в слабопроницаемых блоках. Ключевым свойством сред с двойной пористостью является наличие водообмена



**Рис. 7.** Схематический разрез, иллюстрирующий геофильтрационные условия в окрестности скважины ГК-1: 1 — скважина ГК-1, пунктирной линией показан интервал открытого ствола; 2 — четвертичные рыхлые и слабо литифицированные отложения различного генезиса; 3 — экструзия андезитов четвертичного возраста; 4 — трещиноватые вулканогенно-осадочные отложения неогенового возраста; 5 — интенсивно трещиноватые метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения верхнемелового возраста; 6 — зона разлома; 7 — латеральное движение подземных вод; 8 — восходящий поток седиментогенных вод; 9 — излив воды из скважины.

**Fig. 7.** Schematic section illustrating geofiltration conditions in the vicinity of the ГК-1 well: 1 — ГК-1 well, dotted line shows the interval of the open hole; 2 — Quaternary loose and weakly lithified deposits of various genesis; 3 — extrusion of andesites of Quaternary age; 4 — fractured volcanogenic-sedimentary deposits of Neogene age; 5 — intensely fractured metamorphosed volcanogenic-sedimentary deposits of Upper Cretaceous age; 6 — fault zone; 7 — lateral movement of groundwater; 8 — ascending flow of sedimentogenic waters; 9 — water outflow from the well.

землетрясениям выходит за рамки данной работы.

Временной интервал III (рис. 5) характеризовался увеличением концентрации гидрокарбонат-иона и незначительным уменьшением содержания хлоридов. Исходя из рассмотренных геофильтрационных и гидрогеохимических условий, такие изменения можно объяснить двумя процессами — увеличением притока относительно маломинерализованных вод из слабопроницаемых блоков и уменьшением притока высокоминерализованных вод по трещинам зоны разлома. Поскольку изменения содержания хлоридов и гидрокарбонатов в пределах рассматриваемого интервала происходили на фоне постоянного дебита скважины, возможно, что оба процесса протекали одновременно.

Используя представления о водонасыщенных горных породах, дренируемых скважиной ГК-1, как о среде с двойной пористостью, можно объяснить относительно краткосрочные изменения химического состава воды, наблюдавшиеся после замены оголовка скважины в 2015 г. (рис. 6). Предварительно отметим, что, во-первых, увеличение высоты оголовка привело к уменьшению величины понижения статического уровня (величины  $S_0$  в выражении (1)). Естественным следствием этого явилось уменьшение дебита скважины. Во-вторых, увеличение высоты оголовка скважины на  $\Delta H$  (рис. 4) привело к увеличению забойного давления на  $\rho g \Delta H$ , где  $\rho$  — плотность жидкости;  $g$  — ускорение силы тяжести.

До проведения ремонтных работ дебит скважины длительное время оставался постоянным

между макротрещинами и слабопроницаемыми блоками (Баренблатт, Желтов 1960).

Таким образом, можно полагать, что уменьшение дебита скважины ГК-1 в период с 1970 по 1995 гг. объясняется сработкой упругих запасов слабопроницаемых зон (блоков) вулканогенно-осадочных отложений неогенового возраста. Изменения химического состава воды на устье скважины в этот период связаны с тем, что слабопроницаемые блоки, относительно трещин зоны разлома и оперяющих трещин, содержат менее минерализованные подземные воды с относительно высокой концентрацией гидрокарбонат-иона. По этой причине сработка упругих запасов слабопроницаемых блоков сопровождалась уменьшением содержания гидрокарбонатов и увеличением содержания хлоридов за счет роста доли высокоминерализованных вод в суммарном водопитоке к скважине.

Изменения гидрогеохимических показателей в пределах временных интервалов II и IV (рис. 5), были связаны с процессами подготовки и реализации двух сильных землетрясений: Кроноцкого (5.12.1997 г.,  $M_w = 7.8$ ) и Жупановского (30.01.2016 г.,  $M_w = 7.2$ ). Обсуждение механизмов образования гидрогеохимических эффектов, предшествующих и сопутствующих сильным

(рис. 3), что соответствует условию стационарности. В стационарных условиях суммарный дебит скважины ( $Q$ ) складывается из потока подземных вод, притекающих из макротрещин и потока подземных вод, поступающего из слабопроницаемых блоков (Басниев и др., 1993). В нестационарных условиях, в силу того, что перераспределение давления в пористых блоках происходит значительно медленнее, чем в трещинах, между двумя этими средами возникает градиент давления, приводящий к водообмену (перетокам). Время, в течение которого происходит выравнивание давления в результате водообмена между двумя средами, называется временем запаздывания (релаксации). Время запаздывания зависит от пьезопроводности и линейных размеров слабопроницаемых блоков. Низкая пьезопроводность блоков и/или их значительные линейные размеры будут обуславливать большую величину времени запаздывания (Басниев и др., 1993).

С учетом особенностей фильтрации жидкости в неоднородно трещиноватых средах, изменение гидродинамических условий в результате ремонтных работ на скважине ГК-1 можно представить следующим образом. Увеличение высоты оголовка скважины привело к увеличению забойного давления. За счет более высокой скорости распространения возмущения давления в системе макротрещин, относительно слабопроницаемых блоков, между двумя этими средами возникла разность давлений. Это, в свою очередь привело к тому, что направление водообмена изменилось, и вода из макротрещин стала поступать в слабопроницаемые блоки. В пробах воды, отобранных на устье скважины, этот процесс проявился в росте минерализации воды, увеличении содержаний ионов хлора, натрия и кальция и уменьшении содержания гидрокарбонат-иона. Спустя определенное время (время запаздывания) между макротрещинами и слабопроницаемыми блоками произошло выравнивание давления, и вода из блоков стала поступать в макротрещины и далее в скважину. Этот этап характеризовался снижением минерализации воды, уменьшением содержаний в пробах воды ионов хлора, натрия и кальция и ростом содержания гидрокарбонат-иона.

Уже отмечалось, что изменения в химическом составе воды на устье скважины ГК-1 стали регистрироваться через 15–20 суток после окончания ремонтных работ. Это может свидетельствовать о том, что источник (зона смешения) расположен на некотором расстоянии от ствола скважины. Оценить это расстояние, на основе имеющихся данных, можно лишь примерно, с точностью никак не большей, чем до порядка величины. Для этого можно использовать зави-

симость, употребляемую для расчета границы зоны санитарной охраны водозаборов подземных вод в условиях малых скоростей естественного потока (условиях бассейна). Эта зависимость имеет вид (Минкин, 1967)

$$r = \sqrt{\frac{QT}{\pi n_a m}} \quad (2)$$

где  $r$  — предельное расстояние до источника загрязнения;  $Q$  — дебит скважины;  $T$  — время движения подземных вод от источника до скважины;  $n_a$  — активная пористость;  $m$  — мощность пласта. В качестве «источника загрязнения» подземных вод, в данном случае, рассматривается зона, в пределах которой происходит смешение вод из макротрещин и из слабопроницаемых блоков (зона смешения).

Для расчетов дебит скважины ( $Q$ ) примем равным 0.1 л/с (8.6 м³/сут.), время движения подземных вод ( $T$ ) приравняем времени проявления гидрогеохимических эффектов после ремонтных работ — 20 суток. За величину активной пористости примем минимальное значение пористости насыщения, равное 17% (0.17). Мощность пласта ( $m$ ) зададим двумя величинами: 700 м и 1.0 м. В первом случае будем полагать, что мощность пласта равна длине интервала открытой части ствола скважины, и что водоприток распределен равномерно по всей этой длине. Во втором случае, произвольно, будем считать, что весь водоприток в скважину локализован в одной зоне мощностью 1 м. Подставляя значения всех параметров в уравнение (2), получим два значения расстояния: для  $m = 700$  м, расстояние до источника ( $r$ ) получается равным 0.6 м; для  $m = 1$  м,  $r = 16$  м.

Из выполненной, очень приближенной, оценки следует, что источник (зона смешения) должен быть расположен в окрестности ствола скважины ГК-1 и ограничиваться расстоянием в первые десятки метров. В натурных условиях зоной смешения может являться, собственно, зона разлома субширотного простирания или оперяющие ее трещины, наиболее близко расположенные к стволу, либо непосредственно вскрытые скважиной ГК-1.

Рассмотренный процесс формирования краткосрочных гидрогеохимических эффектов имеет гипотетический характер и поэтому нуждается, в заверке каким-либо из методов гидродинамического исследования скважин. С учетом того, что скважина ГК-1 является самоизливающейся, можно предложить следующую схему исследования, состоящую из двух этапов. На первом этапе скважина закрывается. Одновременно с закрытием скважины производятся наблюдения за изменением давления воды в ее



стволе. На втором этапе, после выравнивания давления между макротрещинами и пористыми блоками, признаком чего будет являться установление квазистационарного режима изменения давления, скважина открывается на свободный излив. Этот этап должен сопровождаться измерениями дебита, электропроводности воды и отбором проб воды для последующего количественного химического анализа. Открытие скважины приведет к падению забойного давления и, как следствие, к падению давления в макротрещинах. Водообмен при этом будет происходить в направлении из слабопроницаемых блоков в макротрещины. На устье скважины этот процесс должен проявиться в относительно краткосрочном уменьшении минерализации воды, содержания ионов хлора, натрия и кальция и в увеличении содержания гидрокарбонат-иона.

Обсуждаемый механизм изменения химического состава воды самоизливающейся скважины в условиях нестационарного режима имеет непосредственное отношение к проблеме формирования гидрогеохимических предвестников землетрясений. Так, в работе (Киссин, Стклянин, 1985) рассматривается гипотетический механизм формирования гидрогеохимических предвестников землетрясений в среде с двойной пористостью. Авторы цитируемой работы приходят к выводу, что возникновение гидрогеохимических эффектов, предшествующих землетрясениям, в таких средах вполне вероятно при условии, что между системами макротрещин и слабопроницаемых блоков существуют градиенты давления и концентрации. При быстром изменении давления длительность гидрогеохимического эффекта будет определяться длительностью процесса перетока между двумя средами. Продолжительность перетока, в свою очередь, будет зависеть от времени выравнивания давления между макротрещинами и слабопроницаемыми блоками (Киссин, Стклянин 1985), которое, как уже упоминалось выше, именуется временем запаздывания (время релаксации скачка давления). В работе (Kopylova, Boldina, 2021) уточняется, что длительность и форма гидрогеохимического эффекта в воде на устье скважины определяется соотношением времени релаксации импульса давления и времени, необходимым для перемещения воды от зоны смещения до устья скважины.

В контексте проблемы образования гидрогеохимических предвестников землетрясений время запаздывания приобретает особое значение, поскольку его величина характеризует минимально возможную длительность гидрогеохимического эффекта при изменении гидродинамических условий в системе «скважина — пласт». Иными словами, длительность гидрогеохимиче-

ского эффекта не может быть меньше, чем время водообмена между макротрещинами и слабопроницаемыми блоками. Знание величины времени запаздывания в условиях конкретной наблюдательной скважины окажется крайне полезным, как для более обоснованной идентификации эффектов — предвестников, так и для определения необходимой периодичности наблюдений. Величину времени запаздывания можно оценить в рамках предложенной выше схемы гидродинамического исследования скважины на этапе восстановления давления с использованием, применяемых в таких случаях, хорошо известных методов (Бузинов, Умрихин, 1973).

Процессы перетока между макротрещинами и слабопроницаемыми блоками, если они имеют место на стадии подготовки землетрясений, могут быть причиной изменения электропроводности (электросопротивления) среды. В частности, рассмотренный здесь механизм образования относительно краткосрочных гидрогеохимических эффектов на скважине ГК-1 может приводить к увеличению электропроводности среды за счет притока более минерализованных вод из макротрещин в пористые блоки. Соответственно, выравнивание давлений между двумя средами должно приводить к восстановлению первоначальной электропроводности среды. Возможность изменения электропроводности среды в условиях нестационарного режима фильтрации так же можно оценить в рамках предложенного выше эксперимента, дополнив его соответствующими измерениями.

## ВЫВОДЫ

На основе данных многолетних гидрогеологических наблюдений, проводимых на самоизливающейся скважине ГК-1 в период с 1970 по 2022 гг., рассмотрены эффекты изменения химического состава воды в условиях нестационарного режима.

С использованием сведений о геологическом строении участка заложения скважины ГК-1, гидрогеохимических условиях, в рамках представлений о водовмещающих горных породах, как о гетерогенно-блоковой среде с двойной пористостью, обсуждены процессы, обуславливающие длительные (десятилетия) и краткосрочные (десять суток) изменения в химическом составе воды скважины.

Многолетние изменения дебита и химического состава воды скважины объясняются работой упругих запасов слабопроницаемых зон (блоков) вулканогенно-осадочных отложений неогенового возраста.

Относительно краткосрочные гидрогеохимические эффекты, наблюдавшиеся после



замены оголовка скважины ГК-1, связаны с изменением условий водообмена между слабопроницаемыми блоками и хорошо проницаемыми макротрещинами, содержащими подземные воды отличающегося химического состава.

Принимая во внимание гипотетичность рассмотренных в статье механизмов изменения химического состава подземных вод в условиях нестационарного режима, задачи дальнейших исследований должны предусматривать как непосредственные эксперименты на скважинах (гидродинамические исследования скважин - для объяснения механизмов краткосрочных гидрогеохимических эффектов), так и численное моделирование (для объяснения механизмов длительных и краткосрочных эффектов).

Автор благодарит рецензентов за исправления и замечания, которые позволили улучшить качество и содержательность работы.

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

#### Список литературы [References]

- Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П.* Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // ДАН СССР. 1960. Т. 132. № 3. С. 545–548 [*Barenblatt G.I., Zheltov Yu.P.* On the basic equations of filtration of homogeneous liquids in fractured rocks // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. V. 132. № 3. P. 545–548 (in Russian)].
- Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. 416 с. [*Basniev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M.* Underground hydromechanics. Moscow: Nedra, 1993. 416 p. (in Russian)].
- Бузинов С.Н., Умрихин И.Д.* Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М.: Недра, 1973. 248 с. [*Buzinov S.N., Umrikhin I.D.* Hydrodynamic methods of wells and formations research. Moscow: Nedra, 1973. 248 p. (in Russian)].
- Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Власов Ю.А. и др.* Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52–78. <https://doi.org/10.21455/si2021.3-5> [*Gavrilov V.A., Descherevskii A.V., Vlasov Yu.A. et al.* Network of multidisciplinary borehole measurements at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon // *Seismicheskie pribory*. 2021. V. 57. № 3. P. 52–78 (in Russian)].
- Гриц Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М.* Некоторые результаты наблюдений за режимом подземных вод на Камчатке в связи с поиском предвестников сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1983. № 4. С. 62–71 [*Grits G.N., Sugrobov V.M., Khatkevich Yu.M.* Some results of observations of the regime of groundwater in Kamchatka in connection with the search for precursors of strong earthquakes // *Vulkanologiya i seismologiya*. 1983. № 4. P. 62–71 (in Russian)].
- Гусев А.А., Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42 [*Gusev A.A., Shumilina L.S.* Recurrence of Kamchatka strong earthquakes on a scale of moment magnitudes // *Physics of the Earth*. 2004. № 3. P. 34–42 (in Russian)].
- Киссин И.Г., Стклянин Ю.И.* О формировании гидрогеохимических предвестников землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений / Под ред. Варшал Г.М. М.: Наука, 1985. 286 с. [*Kissin I.G., Stklyanin Yu.I.* On the formation of hydrogeochemical precursors of earthquakes // *Hydrogeochemical precursors of earthquakes* / Edited by G.M. Varshal. Moscow: Nauka, 1985. 268 p. (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 water due to the 2d march 1992 earthquake ( $M_w = 6.9$ ), Kamchatka // *Geofizicheskie 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/10.1134/S0742046319020040> [*Kopylova G.N., Boldina S.V.* Hydrogeoseismological research in Kamchatka: 1977–2017 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2019. T. 13. № 2. C. 71–84].
- 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. 53–70 [*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. 53–70 (in Russian)].
- Копылова Г.Н., Болдина С.В., Серафимова Ю.К.* Предвестники землетрясений в изменениях ионного и газового состава подземных вод: Обзор мировых данных // Геохимия. 2022. Т. 67. № 10. С. 921–941. <https://doi.org/10.31857/S0016752522100053> [*Kopylova G.N., Boldina S.V., Serafimova Yu.K.* Earthquake Precursors in the Ionic and Gas Composition of Groundwater: A Review of World Data // *Geochemistry International*. 2022. V. 60. № 10. P. 928–946. <https://doi.org/10.1134/S0016702922100056>].
- Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др.* Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с  $M_w = 7.8$ ,  $I_0 = 8$  (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 г. Обнинск, 2003 г. С. 251–271 [*Levina V.I., Gusev A.A., Pavlov V.M. et al.* Kronotskoye

- earthquake on December 5, 1997 with  $M_w = 7.8$ ,  $I_0 = 8$  (Kamchatka) // *Zemletryaseniya Severnoj Evrazii v 1997 g.* Obninsk, 2003. P. 251–271 (in Russian)].
- Минкин Е.Л.* Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод / Под ред. Биндемана Н.Н. М.: Недра, 1967. 124 с. [*Minkin E.L.* Hydrogeological calculations for the allocation of sanitary protection zones of groundwater intakes / Edited by Bindeman N.N. Moscow: Nedra, 1967. 124 p. (in Russian)].
- Мироненко В.А.* Динамика подземных вод. МГГУ, 2001. 519 с. [*Mironenko V.A.* Dynamics of groundwater. Moscow State Mining University, 2001. 519 p. (in Russian)].
- Проектирование водозаборов подземных вод / Под ред. Бочевера Ф.М. Стройиздат: Москва, 1976. 291 с. [Design of underground water intakes / ed. by Bochever F.M. Strojizdat: Moscow, 1976. 291 p. (in Russian)].
- Рябинин Г.В., Поletaев В.А.* Изменения ионно-солевого состава термоминеральных вод в связи с сильнейшими землетрясениями ( $M_L \geq 7.0$ ) юго-востока полуострова Камчатка // Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов 26 сентября – 2 октября 2021 г. Петропавловск-Камчатский. 2021. С. 283–287 [*Ryabinin G.V., Poletaev V.A.* Changes in the ion-salt composition of thermomineral waters due to the strongest earthquakes ( $M_L \geq 7.0$ ) in the south-east of the Kamchatka Peninsula // Proceedings of the VIII all-Russian scientific-technical conference with international participation. Problems of complex geophysical monitoring of seismoactive regions 26 September – 2 October 2021. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2021. P. 283–287 (in Russian)].
- Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М.* Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 107–121 [*Ryabinin G.V., Khatkevich Yu.M.* Hydrogeochemical effects preceding strong earthquakes in Kamchatka. Identification algorithm and morphological analysis // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2009. № 1 (13). P. 107–121 (in Russian)].
- Таран Ю.А., Рябинин Г.В., Покровский Б.Г. и др.* Минеральные воды Авачинской депрессии, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. Вып. 50. № 2. С. 22–39. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-2-50-22-39> [*Taran Yu.A., Ryabinin G.V., Pokrovsky B.G. et al.* Mineral Waters of the Avachinsky Depression, Kamchatka // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2021. № 2(50). P. 22–39 (in Russian)].
- Хаткевич Ю.М.* О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше пяти баллов, проявляющихся в г. Петропавловске-Камчатском // Вулканология и сейсмология. 1994. № 1. С. 63–67 [*Khatkevich Yu.M.* On intermediate-term prediction of earthquakes felt in the town of Petropavlovsk-Kamchatsky // Vulkanologiya i sejsmologiya. 1994. № 1. P. 63–67 (in Russian)].
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34–42 [*Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V.* Geochemical and ground-water studies in Kamchatka in the search for earthquake precursors // Vulkanologiya i sejsmologiya. 2006. № 4. P. 34–42 (in Russian)].
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др.* Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с  $K_s = 15.7$ ,  $M_w = 7.2$ ,  $I = 6$  (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. Вып. 29. № 1. С. 5–16 [*Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R. et al.* Zhupanovskoe earthquake on 30.01.2016 with  $K_s = 15.7$ ,  $M_w = 7.2$ ,  $I = 6$  (Kamchatka) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1 (29). P. 5–16 (in Russian)].
- Шеймович В.С.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. Объяснительная записка. С-Пб. картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2000. 302 с. [*Sheymovich V.S.* State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. The Yuzhno-Kamchatskaya series. Explanatory note. St. Petersburg cartographic factory VSEGEI. 2000. 302 p. (in Russian)].
- Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M.* The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2012. V. 200–201. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>.
- Kiryukhin A.V., Nazhalova I.N., Zhuravlev N.B.* Hot water-methane reservoirs at southwest foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka // *Geothermics*. 2022. V. 106. 102552. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102552>.
- Kopylova G., Boldina S.* Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // *Minerals*. 2021. V. 11. № 7. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/min11070731>.
- Kopylova G.N., Boldina S.V.* 2020. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula. *Frontiers in Earth Science* 8, 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
**ON THE MECHANISM OF CHANGES  
IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF WATER OF SELF-DISCHARGING WELLS  
UNDER UNSTEADY NON-STATIONARY REGIME  
(ON THE EXAMPLE OF THE WELL ГК-1, KAMCHATKA PENINSULA)**

**G.V. Ryabinin**

*Kamchatkan Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

Received January 09, 2021; revised November 24, 2022; accepted December 26, 2022

The ГК-1 self-discharging well is located in the southeastern part of the Kamchatka Peninsula. The well is part of a network of continuous observations of the groundwater regime, conducted in order to identify and study the hydrogeochemical precursors of strong Kamchatka earthquakes. The article discusses data on changes in the flow rate and chemical composition of well water for the period from 1970 to 2022. The subject of the analysis is the hydrogeochemical effects appearing under the conditions of non-stationary regime arising due to drainage of the pressure reservoir by the well and as a result of changes in bottom-hole pressure. The mechanisms of formation of long-term (decades) and relatively short-term (tens of days) changes in the chemical composition of water at the mouth of the ГК-1 self-discharging well are discussed within the framework of the concepts of water-bearing rocks as a heterogeneous block medium with double porosity.

*Keywords: Kamchatka, self-discharging well, hydrogeochemical effects, heterogeneous block medium.*