

## ИЗМЕНЕНИЯ ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫХ ВОД САМОИЗЛИВАЮЩИХСЯ СКВАЖИН ДО И ПОСЛЕ КРОНОЦКОГО (5.12.1997 г., $M_w=7.8$ ) И ЖУПАНОВСКОГО (30.01.2016 г., $M_w=7.2$ ) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

© 2025 Г.В. Рябинин, В.А. Полетаев

*Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;  
e-mail: gena@emsd.ru*

Поступила в редакцию 07.11.2023; после доработки 09.04.2025; принята в печать 25.06.2025

Кроноцкое и Жупановское землетрясения являются сильнейшими сейсмическими событиями юго-восточной части полуострова Камчатка в 1996–2020 гг. Интенсивность вызванных ими сотрясений в г. Петропавловске-Камчатском, по шкале MSK-64, оценивается в 5–6 и 4–5 баллов соответственно. В работе описываются и сравниваются между собой изменения в ионно-солевом составе термоминеральных вод, которые наблюдались до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений. Изменения в ионно-солевом составе рассматриваются на примере вариаций концентраций ионов хлора, гидрокарбоната и кальция в воде семи самоизливающихся скважин, расположенных в районе г. Петропавловска-Камчатского. Продемонстрировано, что до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений в воде большинства скважин наблюдалось увеличение концентрации хлор-иона и одновременное с ним уменьшение концентрации гидрокарбонат-иона. В скважинах ГК-1 и Г-1 разнонаправленные изменения концентраций ионов хлора и гидрокарбоната имели аномальный характер, что позволяет рассматривать их как гидрогеохимические прогнозные признаки сильнейших сейсмических событий.

*Ключевые слова:* Камчатка, самоизливающаяся скважина, гидрогеохимические предвестники землетрясений.

### ВВЕДЕНИЕ

С 1977 г. на Камчатке проводятся исследования, направленные на изучение гидрогеохимических предвестников землетрясений. Основу исследований составляют данные непрерывных наблюдений за режимом термоминеральных вод, дренируемых самоизливающимися скважинами и естественными источниками. Результаты исследований отражены в многочисленных научных публикациях, среди которых отметим лишь работы обобщающего характера (Копылова и др., 1994, 2019, 2022; Рябинин, Хаткевич, 2009; Хаткевич, Рябинин, 2006; Корулова, Boldina, 2020).

Кроноцкое землетрясение произошло 5 декабря 1997 г. Землетрясение предварялось аномальными изменениями в ионно-солевом составе подземных вод (Копылова и др., 2022; Левина и др., 2003; Хаткевич, Рябинин, 1998;

Корулова, Boldina, 2021). С момента начала исследований гидрогеохимических предвестников землетрясений на Камчатке Кроноцкое землетрясение является сильнейшим сейсмическим событием, которому предшествовали аномальные изменения химического состава подземных вод.

Жупановское землетрясение, произошедшее 30 января 2016 г., явилось сильнейшим сейсмическим событием из числа зарегистрированных в интервале глубин 150–250 км под восточным побережьем полуострова (Чебров и др., 2016).

В работе (Рябинин, 2022), на примере самоизливающейся скважины ГК-1 показано, что изменения ионно-солевого состава подземных вод перед Кроноцким и Жупановским землетрясениями имели схожий характер.

В связи с этим возникает естественный вопрос, проявлялись ли подобные эффекты

в других пунктах гидрогеохимических наблюдений. Коротко этот вопрос был рассмотрен в (Рябинин, Полетаев, 2021). Целью настоящей работы является детальный сравнительный анализ изменений ионно-солевого состава подземных вод, дренируемых самоизливающимися скважинами камчатской сети гидрогеохимических наблюдений, в связи с Кроноцким и Жупановским землетрясениями. Подобный анализ представляется актуальным, поскольку позволяет выполнить своего рода «калибровку» гидрогеохимического метода прогноза землетрясений по сильнейшим сейсмическим событиям.

В работе использовались данные многолетних непрерывных гидрогеохимических наблюдений на самоизливающихся скважинах за период с 1996 по 2020 гг. и данные о пространственно-энергетических характеристиках Кроноцкого и Жупановского землетрясений.

Гидрогеохимические данные представлены результатами наблюдений на семи самоизливающимися скважинах, расположенных в окрестности г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1, табл. 1, 2). Наблюдения проводятся Камчатским филиалом

**Рис. 1.** Схема расположения самоизливающихся скважин, использующихся для гидрогеохимических наблюдений: 1 — указатель местоположения скважины; 2 — схематическая колонка скважины: левая часть колонки — границы вскрытых скважиной геологических подразделений, правая часть колонки — участки перфорации обсадных труб или интервалы открытого ствола (закрашены черным цветом), надпись сверху — номер скважины, надпись снизу — глубина скважины, надписи слева — геологические индексы вскрытых скважиной отложений; 3 — современные рыхлые отложения различного генезиса; 4 — экструзия андезитов средне-верхнеплейстоценового возраста; 5 — слаболитифицированные осадочные отложения нижне-среднеплейстоценового возраста; 6 — вулканогенные и вулканогенно-осадочные отложения неогенового возраста; 7 — миоценовые интрузивные образования; 8 — вулканогенно-осадочные отложения эоцен-олигоценного возраста; 9 — вулканогенно-осадочные метаморфизованные образования верхнемелового возраста; 10 — тектонические нарушения: а — разделяющие неоструктуры первого порядка, б — региональные разломы; 11 — тектонические структуры первого порядка: I — Южно-Валагинская блоковая зона, II — Малкинско-Петропавловская складчато-глыбовая зона, III — Южно-Камчатская блоковая зона; 12 — крупные населенные пункты. Геологические колонки скважин построены с использованием материалов отчетов<sup>1, 2, 3, 4</sup>. Элементы тектонического строения района изображены на рисунке в соответствии с тектонической схемой листа N 57 XXVII (Шеймович, 2000).

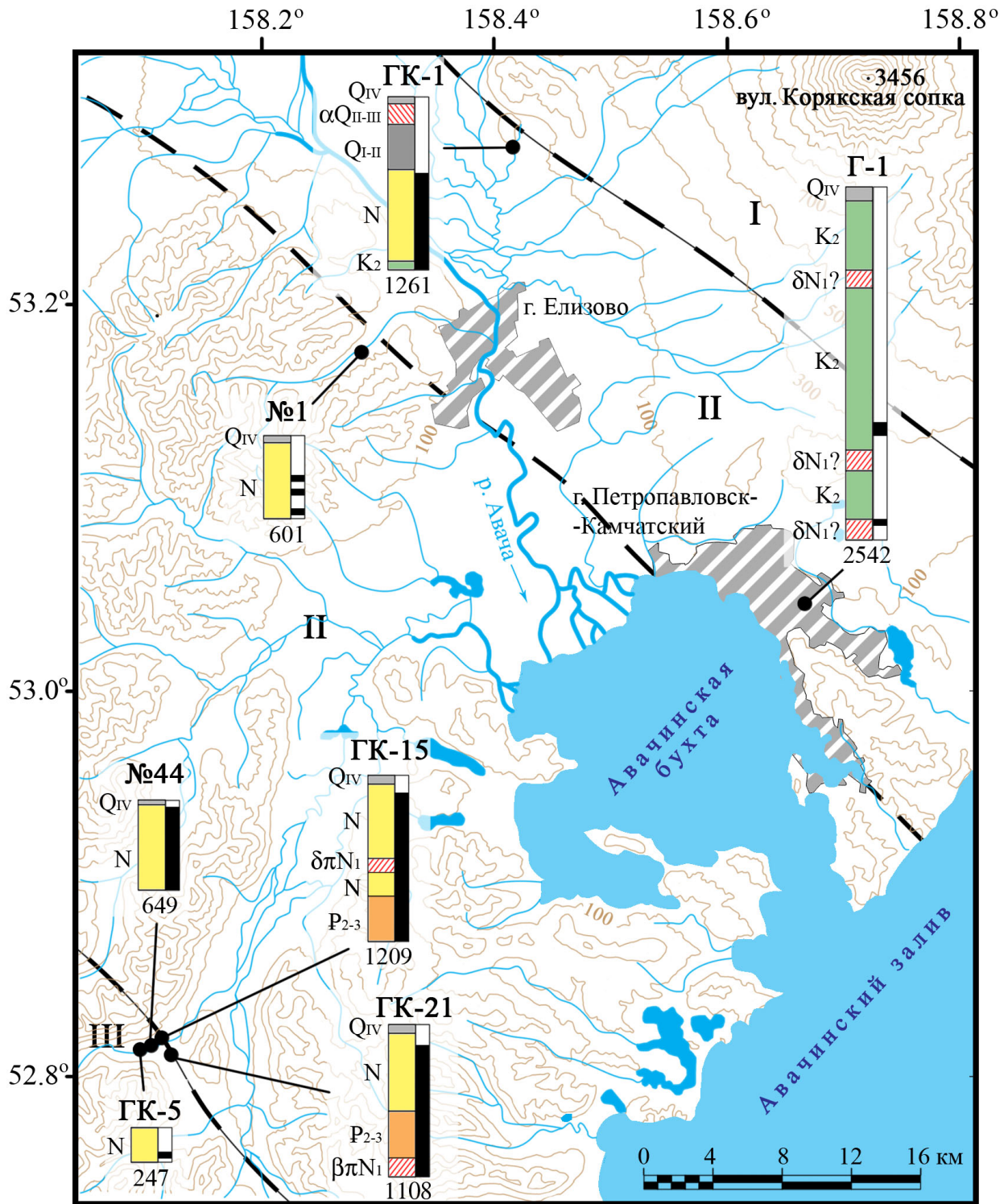
**Fig. 1.** Layout of self-flowing wells used for hydrogeochemical observations: 1 — well location indicator; 2 — schematic column of the well: the left part of the column shows the boundaries of the geological units penetrated by the well, the right part of the column is the casing perforation areas or open hole intervals (shaded in black), well number is above columns, the depth of the well is shown beneath the columns, left of them are indices of sediments penetrated by the well; 3 — modern loose sediments of various origins. 4 — extrusion of andesites of Middle-Upper Pleistocene age; 5 — weakly lithified sedimentary deposits of lower-middle Pleistocene age; 6 — volcanogenic and volcanogenic-sedimentary deposits of Neogene age; 7 — Miocene intrusive formations; 8 — volcanic-sedimentary deposits of Eocene-Oligocene age; 9 — volcanogenic-sedimentary metamorphosed formations of Upper Cretaceous age; 10 — tectonic disturbances: a — separating first-order neostруктуры, б — regional faults; 11 — first order tectonic structures: I — South Valaginsky block zone, II — Malko-Petropavlovsk folded-block zone, III — South Kamchatka block zone; 12 — large settlements. Well columns were constructed using materials from reports<sup>1, 2, 3, 4</sup>. Elements of the tectonic structure are in accordance with the tectonic diagram of the Geological map of the area, sheet № 57 XXVII (Sheymovich, 2000).

<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.

<sup>2</sup> Забарный Г.Н., Мальцев В.В., Шулюпин А.Н. Отчет о результатах бурения на термальные воды поисковой скважины Г-1 на участке «Хлебозавод» Петропавловской площади в 1986–1988 гг. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 5243. г. Петропавловск-Камчатский, 1988. 166 с.

<sup>3</sup> Пак Г.Г., Нурмухамедов А.Г., Корякин Ю.Л. Отчет о специальных комплексных геолого-геофизических исследованиях, проведенных на Южной Камчатке по программе прогноза землетрясений в 1980–1982 гг. (Авачинская партия по прогнозу землетрясений). Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 4550. г. Елизово, 1982. 240 с.

<sup>4</sup> Смирнова Н.Ф. и др. Сводный отчет о результатах поисково-разведочных работ на Верхне-Паратунском месторождении термальных вод, проведенных в 1966–1980 гг., с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 17 мая 1980 г. (в четырех томах). Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 4393. п. Термальный, 1980. 1321 с.



- |   |  |    |  |    |  |    |  |
|---|--|----|--|----|--|----|--|
| 1 |  | 2  |  | 3  |  | 4  |  |
| 5 |  | 6  |  | 7  |  | 8  |  |
| 9 |  | 10 |  | 11 |  | 12 |  |

ИЗМЕНЕНИЯ ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА

Таблица 1. Характеристика самоизливающихся скважин

Table 1. Characteristics of self-discharging wells

№ скв.	Координаты		Период наблюдений	Периодичность наблюдений	Дебит, л/с	Температура воды, °С
	северная широта	восточная долгота				
ГК-1	53.285	158.409	1977 – н.в.*	3 суток до марта 2016, 6 суток с марта 2016	0.1	16.5
№ 1	53.179	158.285	1986 – н.в.	то же	1.3	15.6
Г-1	53.046	158.663	1988 – н.в.	то же	<0.001	8.8
ГК-5	52.811	158.092	1988 – н.в.	6 суток	8.0	76.0
ГК-15	52.814	158.105	1986 – н.в.	6 суток	0.1	16.7
№ 44	52.812	158.100	1988 – н.в.	6 суток	0.1	24.0
ГК-21	52.816	158.126	1988 – 1999	6 суток	0.1	20.0

Примечания. \* н.в. — настоящее время

Notes. \* н.в. — present time.

Таблица 2. Среднемноголетний химический состав воды самоизливающихся скважин

Table 2. Average long-term chemical composition of water from self-flowing wells

	№ скважины						
	ГК-1	№ 1	Г-1*	ГК-5	ГК-15	№ 44	ГК-21
pH, ед.	7.5	8.7	8.3 (9.3)	8.2	8.7	8.1	8.2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	172	30	332 (145)	47	28	59	46
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	32	74	277 (140)	400	397	140	676
Cl <sup>-</sup> , мг/л	5811	—	5386 (7190)	118	68	33	121
Ca <sup>2+</sup> , мг/л	942	23	137 (88)	46	85	34	108
Mg <sup>2+</sup> , мг/л	65	—	— (29)	—	—	—	—
Na <sup>+</sup> , мг/л	2610	20	3363 (4583)	227	150	70	292
K <sup>+</sup> , мг/л	73	<1	— (55)	6	0.8	1.2	4.4
Минерализация, мг/л	9705	146	9494 (12224)	845	728	338	1247
Преобладающий показатель состава растворенного в воде газа (% об.)	CH <sub>4</sub> (61)	N <sub>2</sub> (82)	CH <sub>4</sub> (63)	N <sub>2</sub> (85)	N <sub>2</sub> (92)	N <sub>2</sub> (84)	N <sub>2</sub> (82)

Примечание. \* — цифры вне скобок — средние значения показателей химического состава воды скважины Г-1 за период с 1996 по 1997 гг., цифры в скобках — средние значения гидрогеохимических показателей за период с 1999 по 2020 гг.

Notes. \* — the numbers outside the brackets are the average values of the chemical composition of water in well Г-1 for the period from 1992 to 1997, the numbers in brackets are the average values of the hydrogeochemical indicators for the period from 1999 to 2020.

Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

Скважина ГК-1 пробурена в 1970 г. с целью поиска термальных вод и расположена в 14 км к северу от г. Елизово. Разгрузка подземных вод на устье скважины осуществляется в режиме свободного самоизлива. Скважина интенсивно газифицируется. В составе свободного газа преобладает метан. Скважина № 1 (М-1) пробурена в 1981 г. для проведения гидрогеохимических и гидродинамических наблюдений с целью

поиска предвестников землетрясений. Скважина расположена в 6 км к западу от г. Елизово. Разгрузка подземных вод на устье скважины происходит в режиме свободного самоизлива. Скважина Г-1 закончена бурением в 1988 г. с целью поиска термальных вод на территории г. Петропавловска-Камчатского. Подземные воды разгружаются в режиме свободного самоизлива. Скважины ГК-15, № 44, ГК-5, ГК-21 пробурены в период с 1967 по 1973 гг. с целью проведения поисково-разведочных работ на Верхне-Паратунском месторождении термальных вод.

Скважины расположены в 45 км на юго-запад от г. Петропавловска-Камчатского. Все скважины работали и работают (за исключением скважины ГК-21, ликвидированной в 1999 г.<sup>5</sup>) в режиме ограниченного самоизлива. Для ограничения дебита самоизлива используется либо патрубков с краном, установленный на оголовке скважины (скв. ГК-15, № 44, ГК-21), либо задвижка (скв. ГК-5). Краны и задвижки находятся в открытом состоянии (скважины постоянно изливаются).

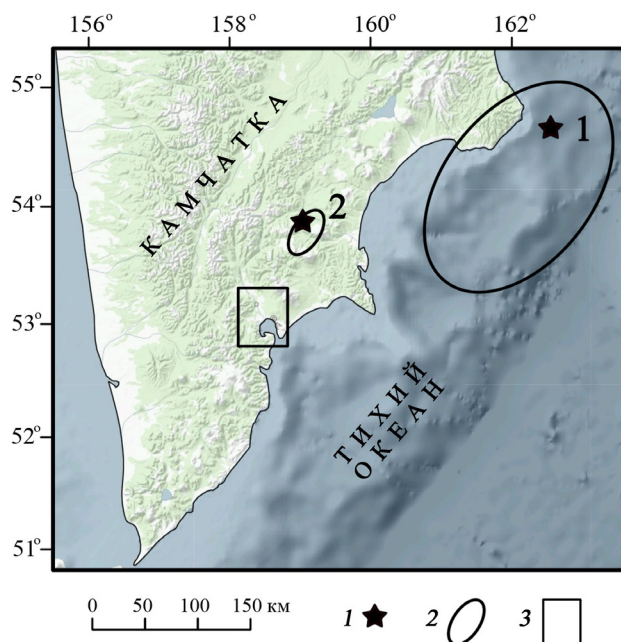
Комплекс режимных наблюдений включает в себя замеры атмосферного давления и температуры воздуха, измерения температуры воды и дебита самоизлива, отбор проб воды и газа для дальнейшего их анализа в лабораторных условиях.

В пробах воды определяются рН, концентрации ионов хлора ( $\text{Cl}^-$ ), гидрокарбоната ( $\text{HCO}_3^-$ ), сульфата ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), натрия ( $\text{Na}^+$ ), калия ( $\text{K}^+$ ), кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ) и кремниевой ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) кислот. В пробах газа определяются содержания метана ( $\text{CH}_4$ ), азота ( $\text{N}_2$ ), кислорода ( $\text{O}_2$ ), аргона ( $\text{Ar}$ ), углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), гелия ( $\text{He}$ ), водорода ( $\text{H}_2$ ), углеводородных газов: этана ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), этилена ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), пропана ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), пропилена ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ), бутана ( $\text{C}_4\text{H}_{10,n}$ ) и изобутана ( $\text{C}_4\text{H}_{10,i}$ ). Определение содержаний растворенных в воде минеральных веществ и газов выполняется стандартными методами количественного химического анализа (КХА).

Сведения о пространственно-энергетических характеристиках Кроноцкого и Жупановского землетрясений (рис. 2, табл. 3) заимствованы из единой информационной системы сейсмологических данных (КФ ФИЦ ЕГС РАН) (Чеброва и др., 2020) и каталога Global CMT (Ekström\_2012).

Эпицентр Кроноцкого землетрясения располагался у Тихоокеанского побережья Камчатки напротив Кроноцкого полуострова. Размеры очага составляли 220 (по длинной оси эллипса) на 140 (по короткой оси) километров (рис. 2). В городе Петропавловске-Камчатском интенсивность сотрясения, по шкале MSK-64 (Медведев, 1965), оценивалась в 5–6 баллов (Левина, 2003). Эпицентр Жупановского землетрясения был расположен в юго-восточной части полуострова Камчатка, в районе долины реки Жупанова. Размеры очага по длинной оси эллипса составили 50 км, по короткой оси — 25 км. На территории

<sup>5</sup> Асаулова Н.П. Отчет о выполнении работ по консервации и ликвидации скважин Верхне-Паратунского месторождения термальных вод (1998–2003 гг.). Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу». № 6524. п. Термальный, 2004. 167 с.



**Рис. 2.** Схема пространственного расположения эпицентров Кроноцкого (1) и Жупановского (2) землетрясений: 1 — эпицентры землетрясений; 2 — очаги землетрясений; 3 — район размещения сети самоизливающих скважин, показанный на рисунке 1. Положения и геометрические размеры очагов Кроноцкого и Жупановского землетрясений показаны на схеме согласно графическим иллюстрациям из работ (Левина и др., 2003; Чебров и др., 2016).

**Fig. 2.** Schematic of spatial location of epicenters of the Kronotsky (1) and Zhupanovsky (2) earthquakes: 1 — earthquake epicenters; 2 — earthquake foci; 3 — the area of self-injecting wells location, shown in Figure 1. The positions and geometric dimensions of the sources of the Kronotsky and Zhupanovsky earthquakes are shown in the diagram according to graphic illustrations from the works (Levina et al., 2003; Chebrov et al., 2016).

Петропавловска-Камчатского интенсивность сотрясений по шкале MSK-64 оценивалась в 4–5 баллов (Чебров, 2016).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее контрастно изменения химического состава подземных вод до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений проявились в режиме самоизливающейся скважины ГК-1 (рис. 3). Примерно за полгода до землетрясений в воде этой скважины отмечалось, сначала незначительное уменьшение содержания хлор-иона, затем его значительный рост вплоть до момента сейсмического события. И в том и в другом случаях после землетрясения рост содержания хлоридов в воде скважины продолжился. Максимальные содержания хлоридов фиксировались примерно через 3 месяца после сейсмических событий. Далее следовала фаза восстановления концентраций хлоридов в

**Таблица 3.** Характеристика Кроноцкого и Жупановского землетрясений

**Table 3.** Characteristics of the Kronotsky and Zhupanovsky earthquakes

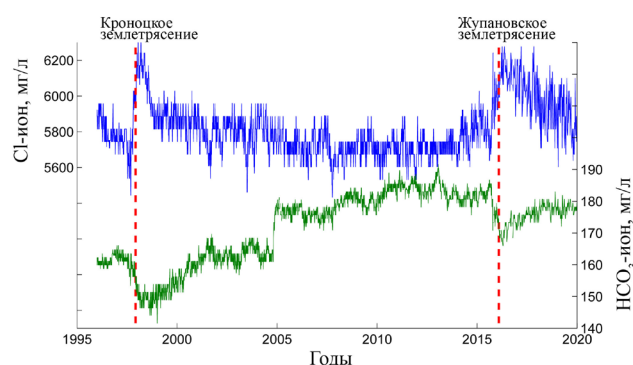
КФ ФИЦ ЕГС РАН*								Global CMT**
Землетрясение	Дата	Северная широта	Восточная долгота	$K_s$	$M_L$	$H$ , км	$S$ , км	$M_w$
Кроноцкое	5.12.1997	54.640	162.550	15.5	7.0	10	310	7.8
Жупановское	30.01.2016	53.854	159.037	15.7	7.1	178	93	7.2

Примечания.  $K_s$  — энергетический класс землетрясения.  $M_L$  — локальная магнитуда землетрясения, рассчитываемая из величин энергетического класса по формуле  $M_L = 0.5 \times K_s - 0.75$ .  $H$  — глубина гипоцентра.  $S$  — эпицентрального расстояние.  $M_w$  — моментная магнитуда.

Notes.  $K_s$  is the energy class of the earthquake.  $M_L$  is the local magnitude of the earthquake, calculated from the values of the energy class according to the formula  $M_L = 0.5 \times K_s - 0.75$ .  $H$  is the depth of the hypocenter.  $S$  is the epicentral distance.  $M_w$  is the moment magnitude.

\* — <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>

\*\* — <https://www.globalcmt.org/>



**Рис. 3.** Изменения содержаний ионов хлора ( $\text{Cl}^-$ ) и гидрокарбоната ( $\text{HCO}_3^-$ ) в воде самоизливающейся скважины ГК-1 в связи с Кроноцким и Жупановским землетрясениями (показаны вертикальными пунктирными линиями).

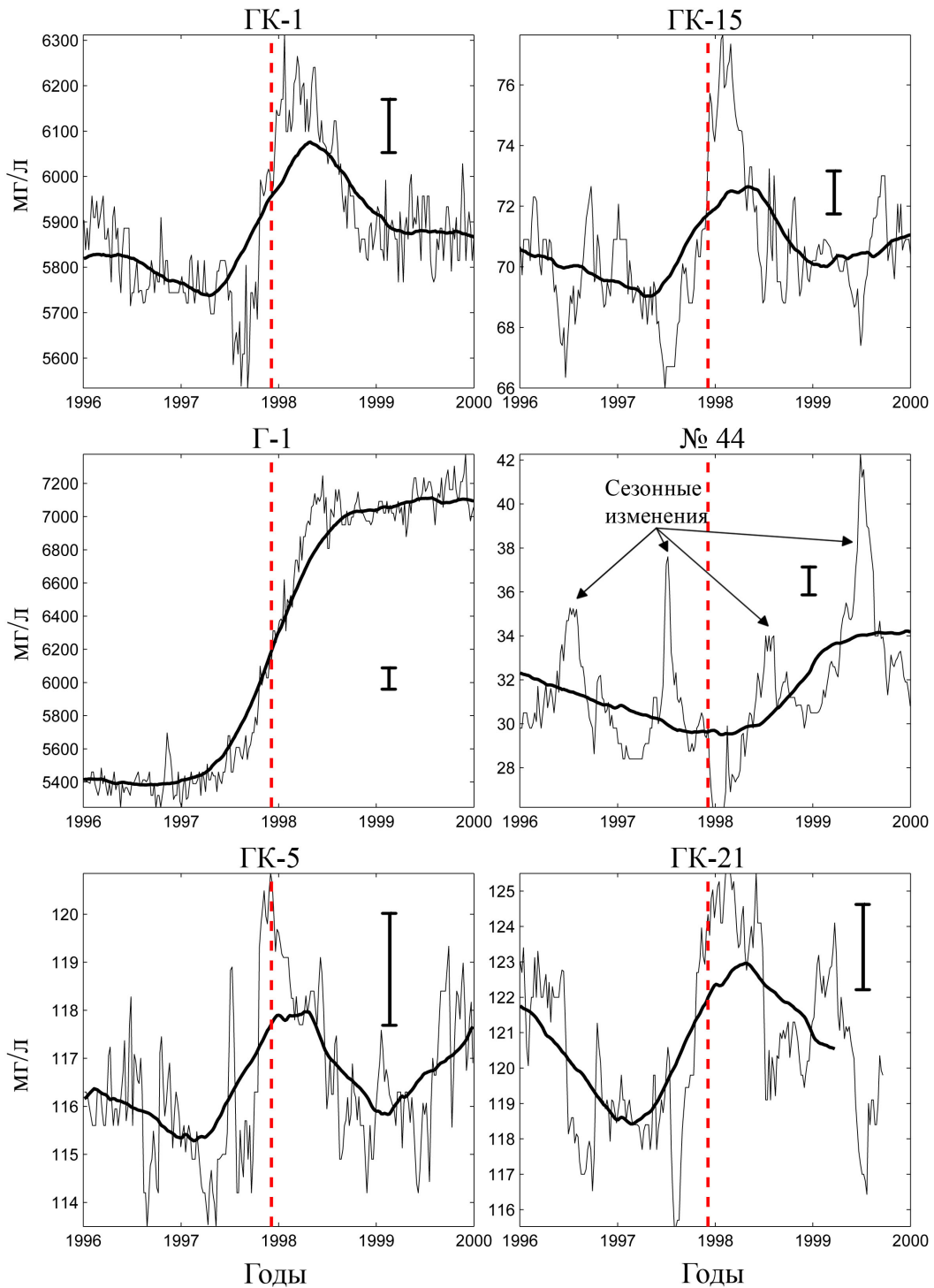
**Fig. 3.** Changes in the contents of chlorine ( $\text{Cl}^-$ ) and bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) ions in the water of the GK-1 self-flowing well in connection with the Kronotsky and Zhupanovsky earthquakes (shown by vertical dotted lines).

воде скважины, длительность которой, в случае Кроноцкого землетрясения, составила около 1 года, в случае Жупановского — около 3–4 лет. Изменение содержания гидрокарбонат-иона имело зеркальный, относительно изменения концентрации хлор-иона, характер, отличаясь от него лишь в деталях. Важно отметить, что подобные изменения содержаний хлоридов и гидрокарбонатов в воде скважины ГК-1 за весь период исследований наблюдались лишь в двух упомянутых случаях. Следует так же заметить, что в период формирования гидрогеохимических изменений, ассоциируемых с Жупановским землетрясением, на скважине ГК-1 проводились ремонтные работы, связанные с заменой ее оголовка. Изменения ионно-солевого состава воды скважины, связанные с последствиями этих работ, охарактеризованы в статье (Рябинин, 2022).

На рисунках 4–9 показаны фрагменты временных рядов вариаций отдельных показателей химического состава воды самоизливающихся скважин. Представленные данные очищены от одиночных выбросов, приведены, с использованием процедур линейной интерполяции и прореживания, к равномерной дискретности с интервалом равным 6 суткам и сглажены

скользящим средним. Процедура сглаживания использовалась для того, чтобы подчеркнуть те тенденции, которые имели место в изменении гидрогеохимических показателей во временных окрестностях Кроноцкого и Жупановского землетрясений. Размер окна осреднения принимался равным одному году с тем расчетом, чтобы полученные сглаженные кривые не содержали периодической годовой компоненты (Андерсон, 1976), обусловленной сезонными изменениями условий питания подземных вод.

Рассмотрим как менялось содержание гидрогеохимических показателей в воде разных самоизливающихся скважин, входящих в сеть гидрогеохимических наблюдений, до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений. Во всех скважинах кроме скважины № 44 непосредственно Кроноцкому землетрясению предшествовало увеличение содержания хлоридов в изливающейся воде (рис. 4). Для скважин ГК-1, ГК-5, ГК-15 и ГК-21 кривые изменения концентрации хлор-иона до и после Кроноцкого землетрясения обнаруживают признаки подобия, наиболее наглядно проявленные в сглаженных данных. В воде скважины Г-1 увеличение содержания хлоридов, начавшееся до сейсмического события и закончившееся спустя несколько



**Рис. 4.** Изменения концентрации хлор-иона в воде самоизливающихся скважин в связи с Кроноцким землетрясением. Тонкая линия — фактические данные, приведенные к равномерной дискретности. Жирная линия — данные, осредненные в скользящем временном окне размером в 61 точку или 366 суток (с учетом интервала дискретизации). Момент землетрясения показан на диаграммах вертикальной пунктирной линией. Номера скважин указаны над диаграммами. Вертикальными линиями с горизонтальными засечками обозначены интервалы, соответствующие величинам среднеквадратических отклонений ( $\sigma_R$ ) характеризующих случайную составляющую погрешности определения гидрогеохимических показателей (табл. 4).

**Fig. 4.** Changes in concentration of chlorine ion in the water of self-flowing wells caused by the Kronotsky earthquake. The thin line is the actual data reduced to uniform discreteness. The bold line is the data averaged over a sliding time window of 61 points or 366 days (taking into account the sampling interval). The moment of the earthquake is shown in the diagrams by vertical dotted line. Numbers of wells are given above the diagrams. Black vertical lines mark intervals of standard deviations ( $\sigma_R$ ) characterizing the random component of the error in determining hydrogeochemical parameters (Table 4).

**Таблица 4.** Величины случайных составляющих погрешности количественного химического анализа гидрогеохимических показателей

**Table 4.** Values of random components of the error of quantitative chemical analysis of hydrogeochemical parameters

Компонент	Диапазон измеряемых концентраций (C), мг/дм <sup>3</sup>	Характеристика случайной составляющей погрешности ( $\sigma_R$ ), мг/дм <sup>3</sup>	Методика количественного химического анализа
Cl <sup>-</sup>	10 – 25	$0.07 \times C$	ПНДФ 14.1:2. 96-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений содержаний хлоридов в пробах природных и очищенных сточных вод argentометрическим методом
	25 – 50	$0.04 \times C$	
	50 – 250	$0.02 \times C$	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10 – 20	$0.11 \times C$	ПНДФ 14.2. 99-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений содержаний гидрокарбонатов в пробах природных вод титриметрическим методом
	20 – 50	$0.06 \times C$	
	50 – 500	$0.03 \times C$	
Ca <sup>2+</sup>	1 – 2	$0.12 \times C$	ПНДФ 14.1:2. 95-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений содержаний кальция в пробах природных и очищенных сточных вод титриметрическим методом
	2 – 10	$0.07 \times C$	
	10 – 100	$0.03 \times C$	

Примечания. Величины  $\sigma_R$  представлены в виде зависимости от значения результата измерения концентрации (C) определяемого компонента. Если концентрация компонента превышает диапазон измеряемых концентраций, в соответствии с указаниями методики, выполняется разбавление пробы дистиллированной водой. Величина  $\sigma_R$ , в таком случае, принималась равной значению, установленному для того диапазона, которому соответствовала величина концентрации компонента в пробе после разбавления.

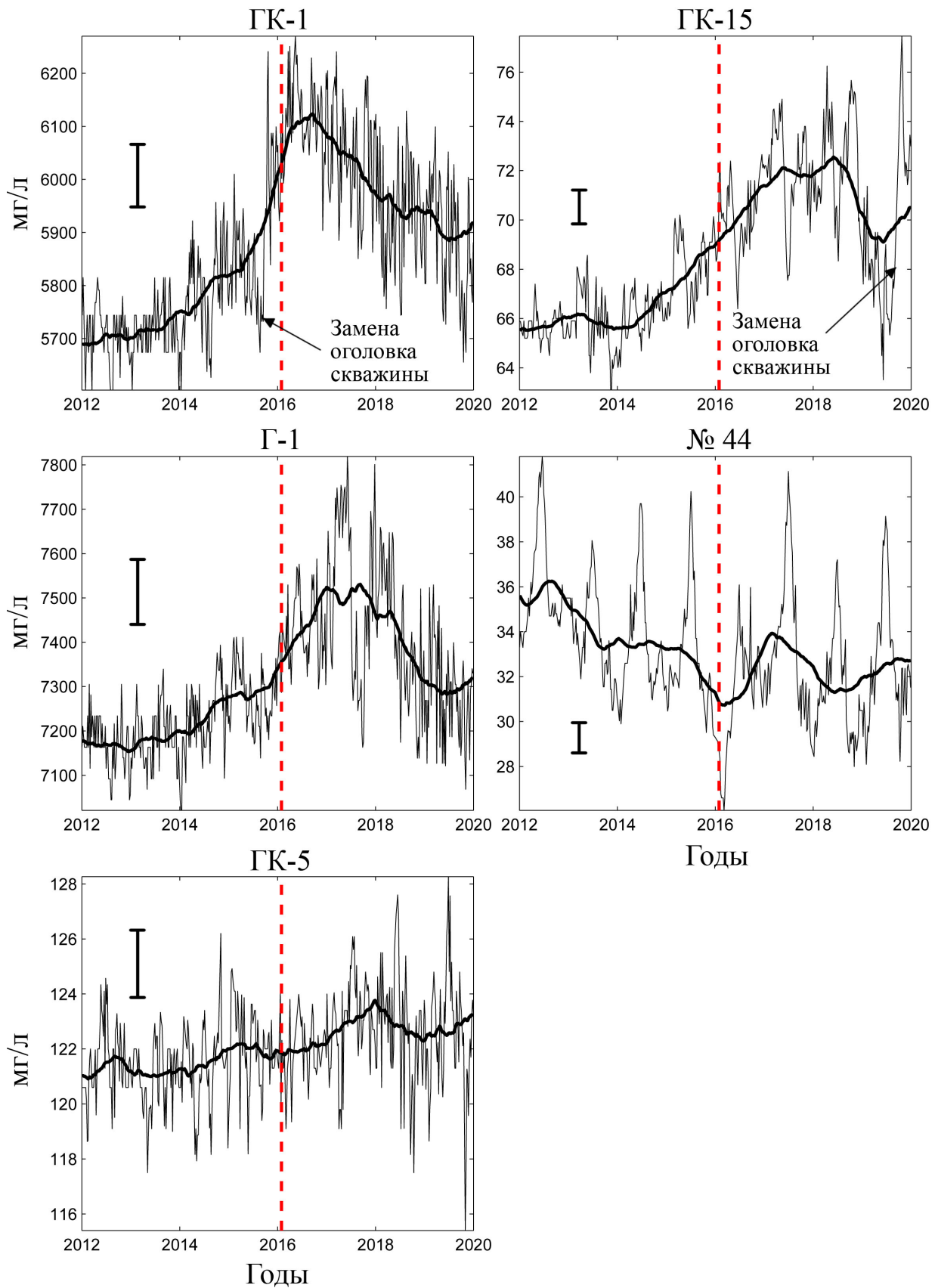
Notes. The values of  $\sigma_R$  are presented as a function of the value of the result of measuring the concentration (C) of the component being determined. If the concentration of the component exceeds the range of measured concentrations, in accordance with the instructions of the method, the sample is diluted with distilled water. The value of  $\sigma_R$ , in this case, was assumed to be equal to the value set for the range corresponding to the concentration of the component in the sample after dilution.

месяцев после землетрясения, имело необратимый характер. Вариации хлор-иона в воде скважины № 44 демонстрируют выраженные сезонные эффекты, характеризующиеся увеличением содержания хлоридов в летние месяцы (рис. 4). На фоне сезонных эффектов перед Кроноцким землетрясением наблюдалось плавное уменьшение содержания хлор-иона, сменившееся, после сейсмического события, медленным ростом. Отсутствие на рисунках 4 (а также на рисунке 5) соответствующей диаграммы для скважины № 1 объясняется тем обстоятельством, что, из-за очень маленького содержания, хлор-ион в воде этой скважины не определяется.

В связи с Жупановским землетрясением изменения содержаний хлоридов в воде самоизливающихся скважин имели различный характер (рис. 5). В скважинах ГК-1, Г-1 и ГК-15 до землетрясения наблюдался рост содержаний хлоридов. Медленное увеличение концентраций ионов хлора началось, примерно, за два года до землетрясения и закончилось спустя год — два года после сейсмического события. В скважине ГК-5 содержание хлоридов до и после Жупановского

землетрясения менялось слабо, демонстрируя едва различимую тенденцию к увеличению концентрации хлор-иона в период с 2014 по 2018 гг. В воде скважины № 44, на фоне сезонных эффектов, перед Жупановским землетрясением отмечалось длительное (около года) уменьшение содержания хлоридов. После землетрясения наблюдался рост концентрации хлор-иона.

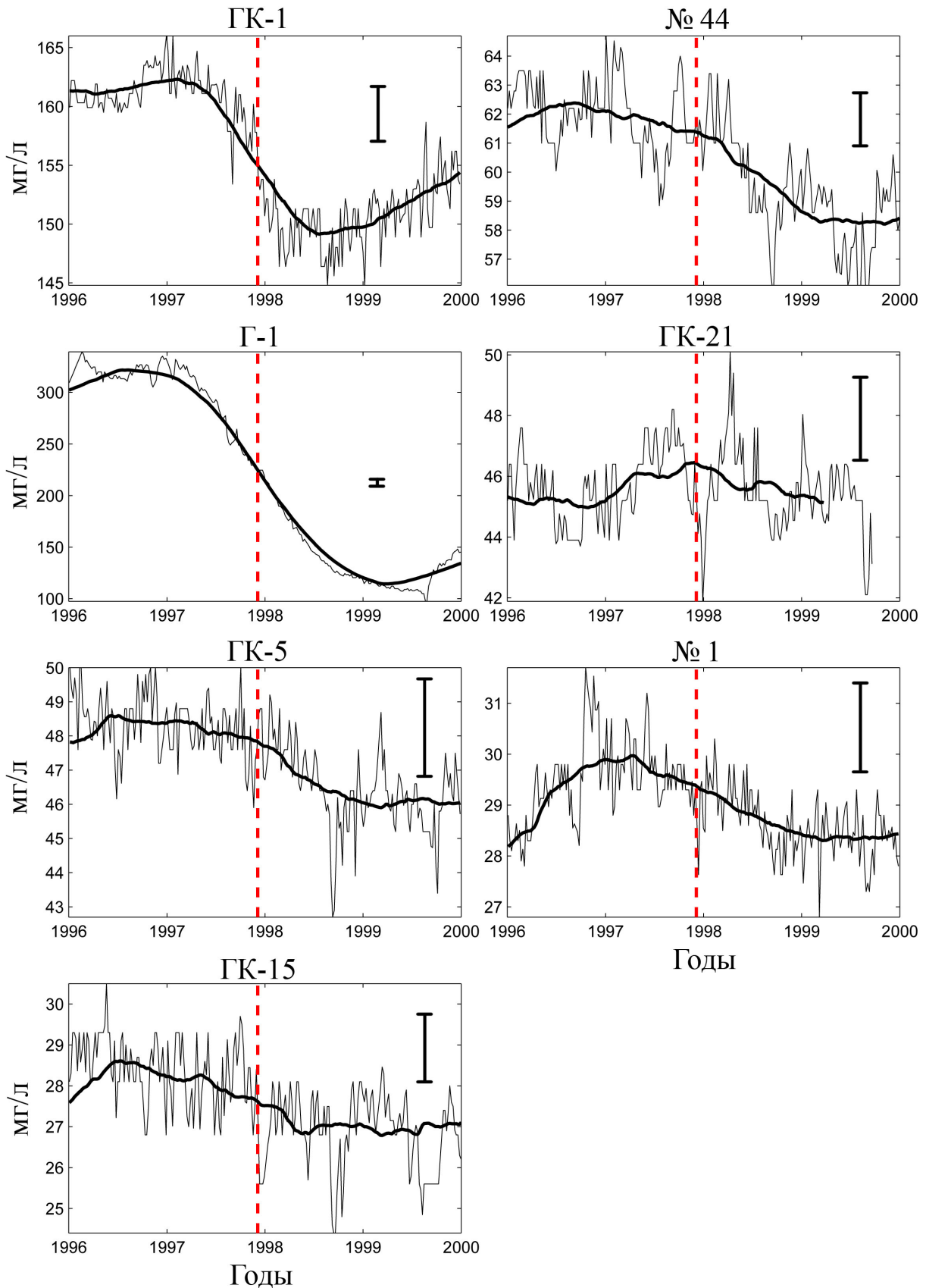
Изменения содержания гидрокарбонат-иона до и после Кроноцкого землетрясения, которые по своей амплитуде превосходили величину случайной составляющей погрешности определения этого показателя, наблюдались лишь в воде скважин ГК-1 и Г-1 (рис. 6). И в том и в другом случаях за 8–10 месяцев до землетрясения происходило уменьшение концентрации гидрокарбонат-иона, которое закончилось спустя 7 (скв. ГК-1) — 15 (скв. Г-1) месяцев после сейсмического события. В воде скважин ГК-5, ГК-15, № 44, ГК-21 и № 1 вариации содержания гидрокарбонат-иона были соизмеримы с величиной погрешности его определения и демонстрировали лишь слабую тенденцию к снижению концентрации после землетрясения (скважины ГК-5, ГК-15, № 44, № 1).



**Рис. 5.** Изменения концентрации хлор-иона в воде самоизливающихся скважин в связи с Жупановским землетрясением. Остальные описания см. на рис. 4.

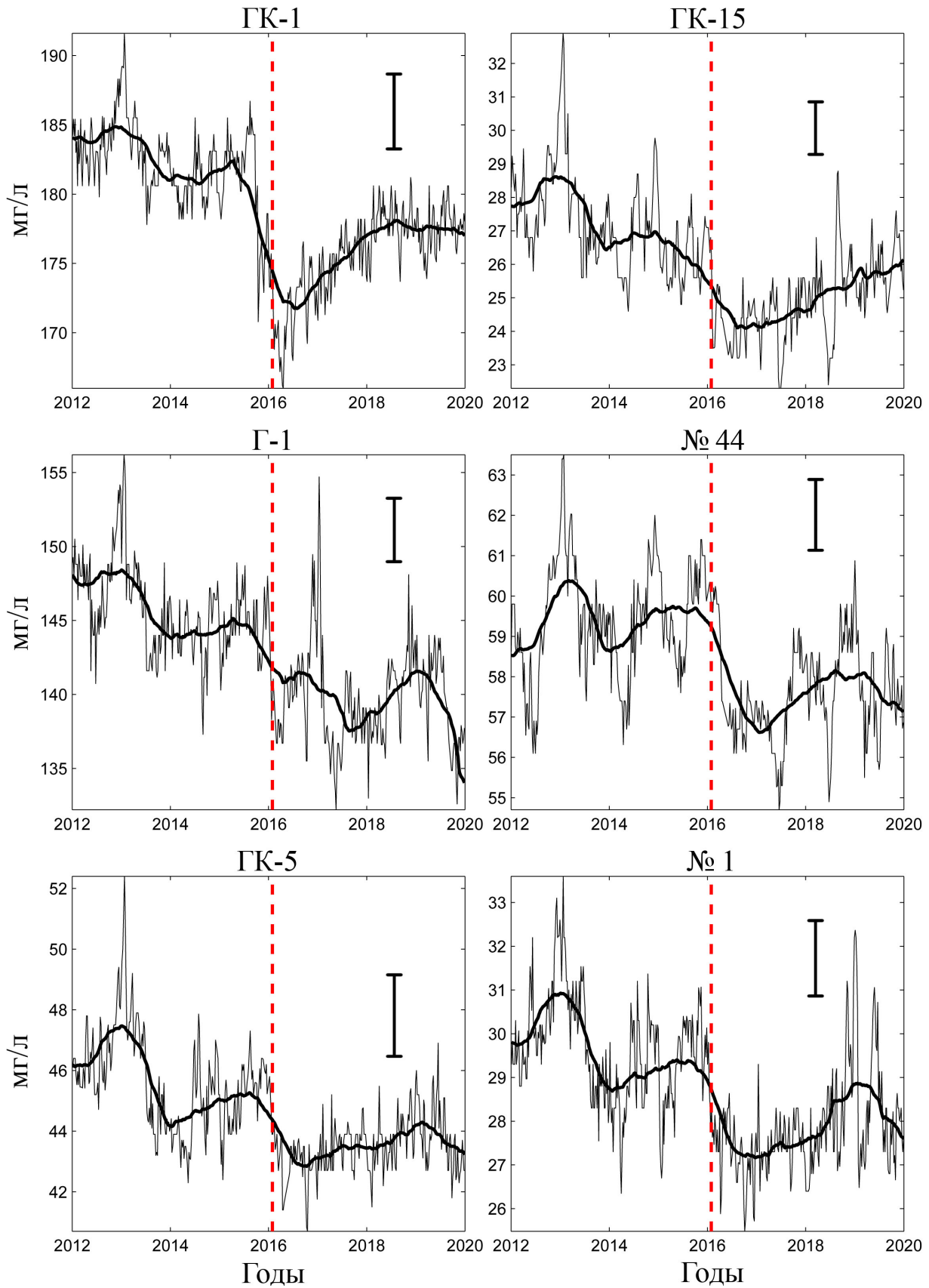
**Fig. 5.** Changes in the concentration of chlorine ion in the water of self- discharging wells due to the Zhupanovsky earthquake. For other descriptions, see Fig. 4.

ИЗМЕНЕНИЯ ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА



**Рис. 6.** Изменения концентрации гидрокарбонат-иона в воде самоизливающихся скважин в связи с Кроноцким землетрясением. Остальные описания см. на рисунке 4.

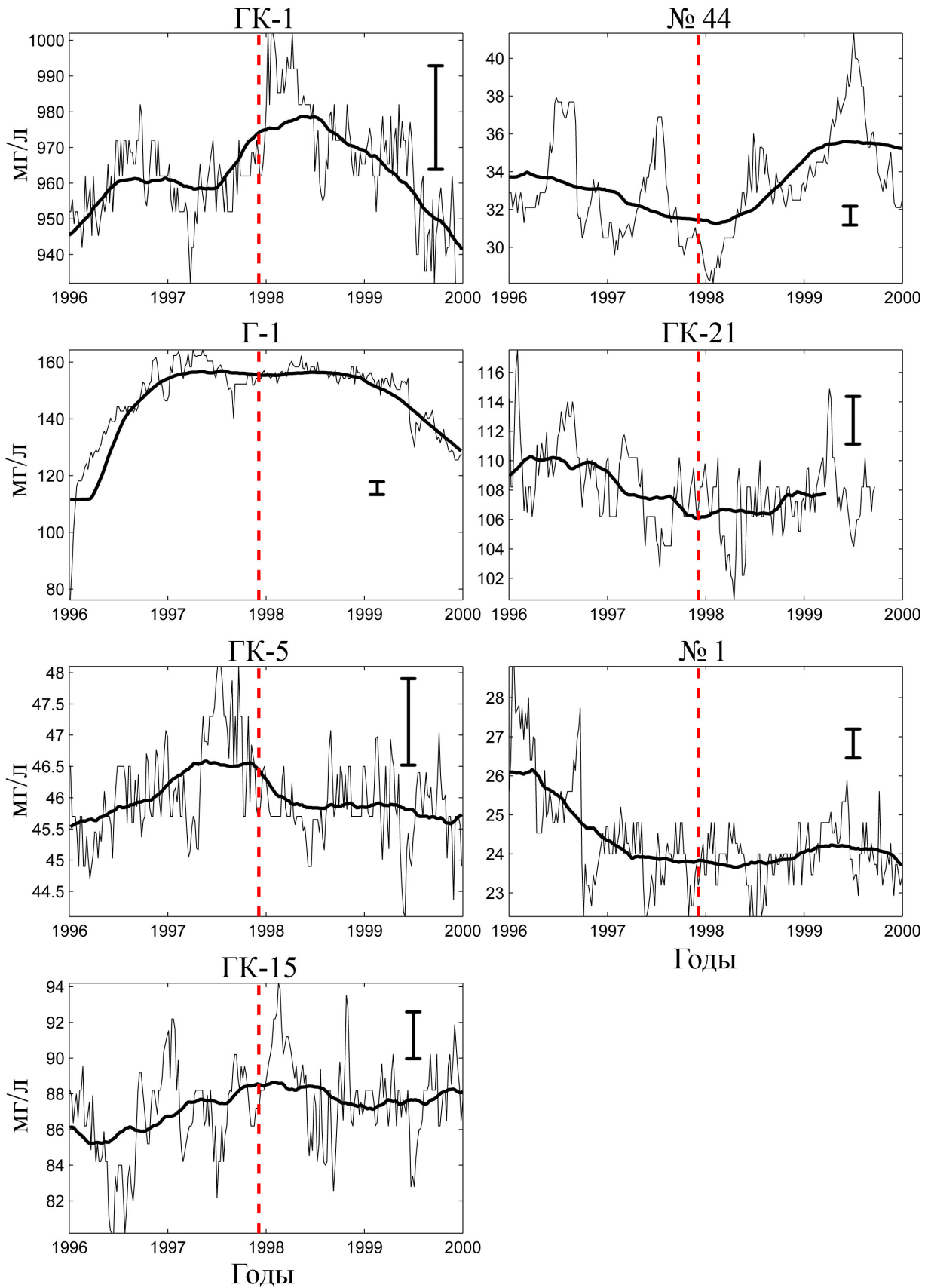
**Fig. 6.** Changes in the concentration of bicarbonate ion in the water of self-discharging wells due to the Kronotsky earthquake. For other descriptions, see Figure 4.



**Рис. 7.** Изменения концентрации гидрокарбонат-иона в воде самоизливающихся скважин в связи с Жупановским землетрясением. Остальные описания см. на рисунке 4.

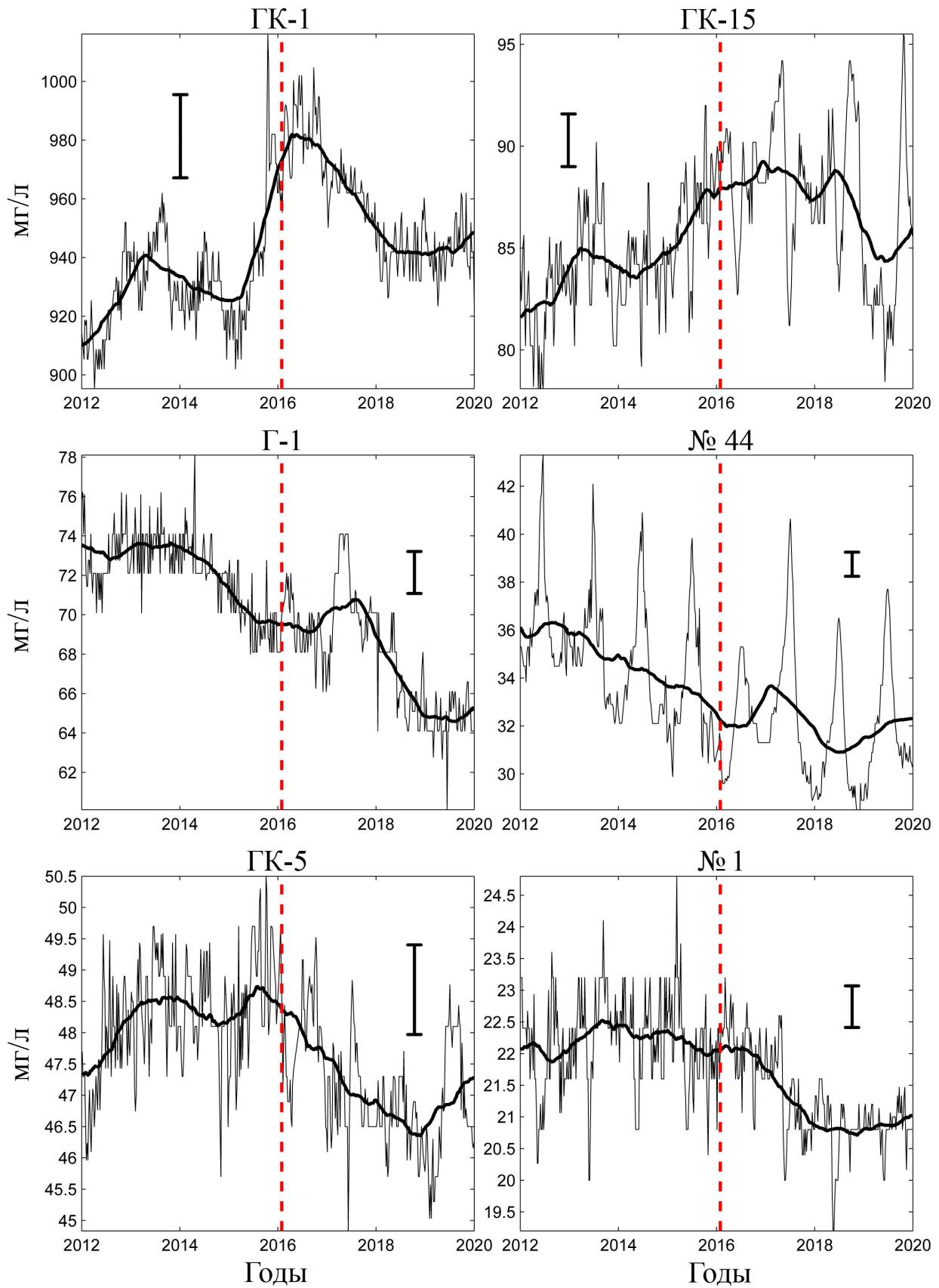
**Fig. 7.** Changes in the concentration of bicarbonate ion in the water of self-discharging wells due to the Zhupanovsky earthquake. For other descriptions, see Figure 4.

ИЗМЕНЕНИЯ ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА



**Рис. 8.** Изменения концентрации кальций-иона в воде самоизливающихся скважин в связи с Кроноцким землетрясением. Остальные описания см. на рисунке 4.

**Fig. 8.** Changes in the concentration of calcium ion in the water of self-discharging wells due to the Kronotsky earthquake. For other descriptions, see Figure 4.



**Рис. 9.** Изменения концентрации кальций-иона в воде самоизливающихся скважин в связи с Жупановским землетрясением. Остальные описания см. на рисунке 4.

**Fig. 9.** Changes in the concentration of calcium ion in the water of self-discharging wells due to the Zhupanovsky earthquake. For other descriptions, see Figure 4.

Вариации гидрокарбонат-иона во временной окрестности Жупановского землетрясения имели сложный характер (рис. 7). Наиболее достоверным можно считать уменьшение концентрации гидрокарбонат-иона в воде скважины ГК-1, которое началось за четыре с половиной месяца до землетрясения и закончилось спустя три месяца после сейсмического события. Изменения гидрокарбонат-иона в изливающейся воде других скважин не демонстрировали эффектов, которые можно было бы интерпретировать как предвестники Жупановского землетрясения. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что кривые, представляющие собой результат сглаживания исходных данных, имеют похожую конфигурацию, характеризующуюся ступенчатым снижением средних содержаний гидрокарбонат-иона в период, предшествующий Жупановскому землетрясению (рис. 7).

В качестве еще одного примера рассмотрим как менялось содержание иона кальция в термоминеральных водах, дренируемых самоизливающимися скважинами. Из рассматриваемых гидрогеохимических показателей изменения кальций-иона во временных окрестностях Кроноцкого и Жупановского землетрясений демонстрируют наиболее разнообразный характер кривых (рис. 8, 9). Напрашивается вывод о том, что динамика изменения концентрации иона кальция является уникальной для каждой конкретной самоизливающейся скважины, по крайней мере в пределах рассматриваемых временных интервалов. Определенные элементы подобия можно обнаружить в сглаженных кривых, характеризующих изменения средних содержаний кальций-иона в воде скважин Г-1 и № 44 (рис. 9), но, в целом, по-видимому, следует говорить об относительно высокой специфичности динамики этого гидрогеохимического показателя в воде разных скважин.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Побуждающим мотивом анализа, представленного в данной работе, послужили результаты наблюдений за изменениями содержаний хлор-иона и гидрокарбонат-иона в воде скважины ГК-1 (рис. 3). Из результатов следует, что наибольшие, по амплитуде, изменения концентраций этих ионов имели место до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений — двух сильнейших сейсмических событий, эпицентры которых располагались сравнительно близко (на расстоянии до 350 км) от пунктов гидрогеохимических наблюдений. Кроме значительных амплитуд, изменения содержаний хлоридов и гидрокарбонатов в воде скважины ГК-1, в связи с Кроноцким и Жупановским землетрясениями, имели очень

похожий характер (похожую конфигурацию). В обоих случаях перед сейсмическим событием наблюдался рост концентрации хлор-иона и падение концентрации гидрокарбонат-иона. Аномальная амплитуда и схожий характер изменений содержаний хлоридов и гидрокарбонатов в воде скважины ГК-1 позволяют сделать предположение о том, что эти изменения могут быть генетически обусловлены процессами «подготовки и реализации» обсуждаемых сейсмических событий. Это же предположение, по-видимому, будет уместно и в отношении изменений гидрогеохимических показателей в воде скважины Г-1, наблюдавшихся до и после Кроноцкого землетрясения и имевших необратимый характер.

Изменения гидрогеохимических показателей в воде скважин ГК-15, ГК-5, ГК-21, № 44 и № 1 до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений не имеют выраженного аномального характера. Совместный же анализ динамики изменения содержания хлор-иона и гидрокарбонат-иона в воде разных скважин позволяет говорить о признаках подобия в конфигурации кривых, построенных по осредненным данным, что может свидетельствовать о подобии процессов, порождающих такие изменения. Данный вывод является скорее удивительным, чем ожидаемым, поскольку результат проявления даже одного и того же процесса неизбежно должен иметь отпечаток той природной обстановки, на фоне которой этот процесс протекает. Подразумеваемая под термином «природная обстановка» прежде всего гидрогеологические и гидрогеохимические условия, следует обратить внимание на то, что эти условия, для скважин камчатской сети гидрогеохимических наблюдений, существенно отличаются. Так скважины ГК-1 и Г-1 заложены в границах Авачинской депрессии и в той или иной мере дренируют соленые седиментогенные воды верхнемеловых метаморфизованных вулканогенно-осадочных отложений (Таран, 2021; Taran, 2022). В анионном составе этих вод доминирует хлор-ион, а в составе газа преобладает метан (табл. 2). Скважины ГК-15, ГК-17, ГК-5 и № 44 пробурены в пределах Карымшинского участка Верхнепаратунского гидротермального месторождения и выводят на поверхность пресные и солоноватые подземные воды, относящиеся к азотным термам (Манухин, 1976). Их анионный состав определяется сульфатами, газовый состав — азотом (табл. 2). Наиболее полный анализ особенностей химического состава подземных вод, дренируемых скважинами камчатской сети гидрогеохимических наблюдений, представлен в работе (Копылова, 2018).

Результаты анализа изменений ионно-солевого состава термоминеральных вод самоиз-

ливающихся скважин до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений, рассмотренные на примере вариаций ионов хлора, гидрокарбоната и кальция позволяют сделать вывод о том, что не все скважины, равно как и не все гидрогеохимические показатели в одинаковой степени информативны применительно к задаче идентификации гидрогеохимических предвестников землетрясений. Наиболее достоверные гидрогеохимические «эффекты-предвестники» проявляются в вариациях хлор-иона, особенно в воде самоизливающейся скважины ГК-1. Это не означает, что наблюдения за другими гидрогеохимическими показателями или другими скважинами не имеет практического смысла. Прогнозными признаками сильного землетрясения могут являться не только аномальные амплитуды изменений того или иного гидрогеохимического показателя, но и эффекты синхронного или коллективного поведения показателей в пространственно разнесенных пунктах наблюдений (Любушин, 1994), для идентификации которых используются методы многомерного статистического анализа (Любушин, 2007). Наличие признаков подобия в изменениях хлор- и гидрокарбонат-ионов в воде разных скважин перед Кроноцким и Жупановским землетрясениями может рассматриваться в качестве необходимого основания для применения таких методов анализа данных.

Пример элементарного подхода к многомерному статистическому анализу проиллюстрирован рисунком 10. В конфигурации кривой временного ряда (рис. 10д) выделяются два участка с наибольшей амплитудой изменения скользящего среднего (низкочастотной составляющей). Первый из них расположен во временной окрестности Кроноцкого землетрясения, второй — во временной окрестности Жупановского сейсмического события. Характер кривой среднего по ансамблю наследует отмеченные ранее особенности изменения содержания хлор-иона в воде самоизливающихся скважин до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений, что подчеркивает их достоверность.

Эффекты коллективного поведения не исчерпываются подобием конфигураций кривых изменений одних и тех же гидрогеохимических показателей в пространственно разнесенных пунктах наблюдений. Не меньший интерес, в этой связи, представляют эффекты одновременного, но противоположно направленного («зеркального») изменения некоторых показателей в одних и тех же пунктах наблюдений. Яркий тому пример — увеличение содержания хлоридов и уменьшение содержания гидрокарбонатов в воде скважины ГК-1 (рис. 3). Если полагать, что наиболее вероятным процессом образования

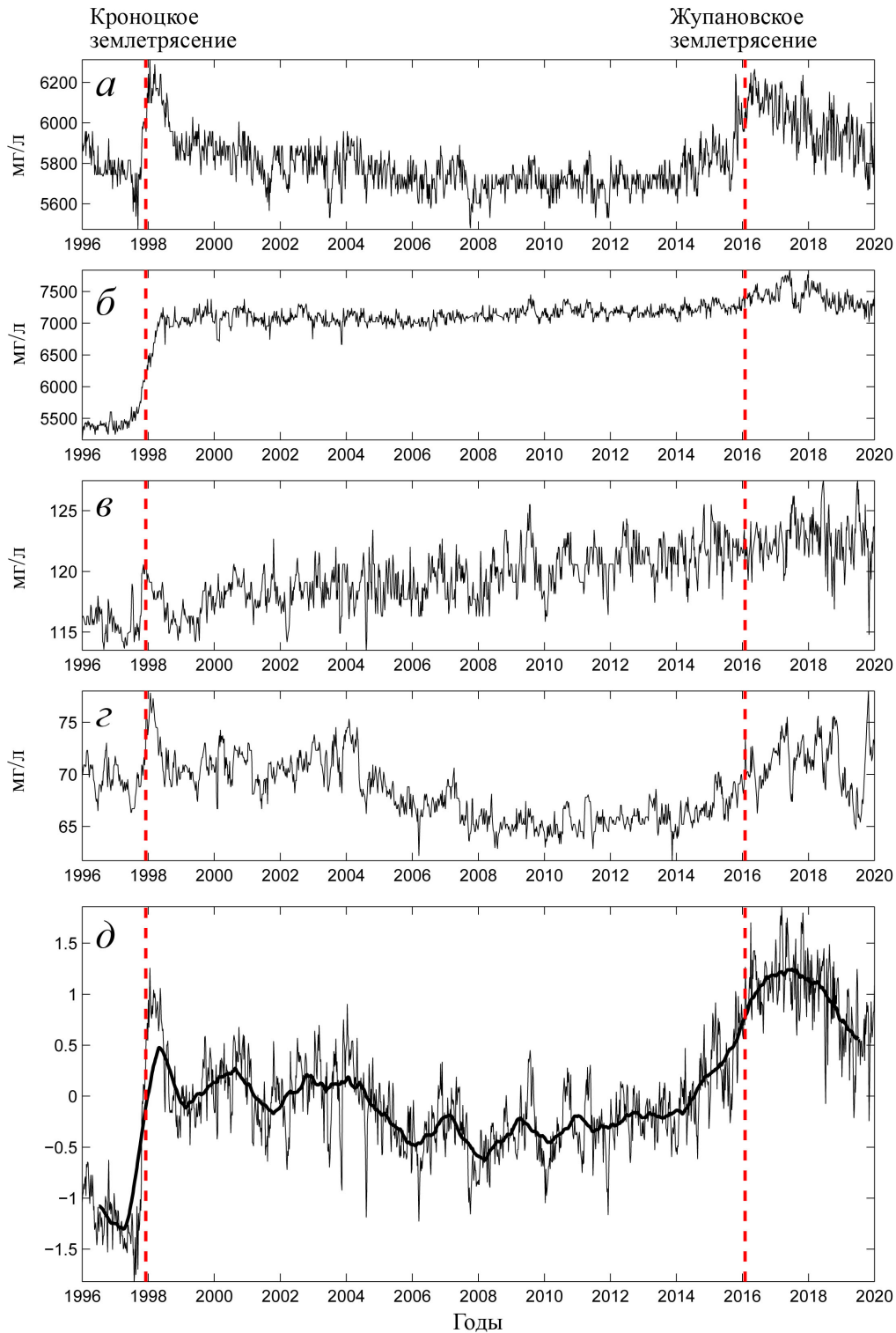
предшествующих землетрясениям гидрогеохимических эффектов является изменение условий смешения подземных вод разного состава (Копылова и др., 2022; Kopylova, Boldina, 2021; Thomas, 1988), то противоположенный характер изменения хлоридов и гидрокарбонатов в подземных водах, формально, можно объяснить двояким образом. С одной стороны, рост содержания хлоридов и уменьшение содержания гидрокарбонатов может происходить вследствие увеличения подтока обогащенных хлоридами вод из глубинных источников в зону смешения. С другой стороны, те же эффекты могут объясняться уменьшением доли неглубоко залегающих вод, с относительно высоким содержанием гидрокарбонат-иона, в общем балансе водопритока к самоизливающейся скважине. В зависимости от той или иной предпосылки можно рассматривать различные механизмы образования гидрогеохимических эффектов, которые заведомо будут иметь дискуссионный характер. В любом случае, принимая во внимание тот факт, что хлориды и гидрокарбонаты определяются разными независимыми методами КХА (табл. 4), наличие подобных эффектов «зеркального» изменения гидрогеохимических показателей в воде самоизливающихся скважин, повышает их совокупную достоверность.

Представленные в работе результаты, равно как и результаты многолетних гидрогеохимических наблюдений на Камчатке в целом, дают основание рассматривать сильные сейсмические события как один из природных факторов, способный приводить к длительным изменениям химического состава подземных вод. Данный вывод имеет немаловажный практический аспект, связанный с эксплуатацией месторождений термоминеральных вод. Например, гидрогеохимические эффекты, подобные представленным в данной работе, при проведении мониторинга на месторождениях термоминеральных вод могут быть неверно интерпретированы как изменения химического состава вод, обусловленные водоотбором с месторождения.

## ВЫВОДЫ

Кроноцкое и Жупановское землетрясения являются одними из сильнейших сейсмических событий, произошедших в камчатской сейсмофокальной зоне на удалении до 350 км от г. Петропавловска-Камчатского, в окрестностях которого с 1977 г. проводятся гидрогеохимические наблюдения, направленные на поиск и изучение эффектов, предшествующих и сопутствующих сильным землетрясениям. Благодаря длительности и непрерывности гидрогеохимических наблюдений мы сейчас имеем возможность

ИЗМЕНЕНИЯ ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА



**Рис. 10.** Временные ряды изменений концентрации хлор-иона в воде самоизливающихся скважин: *a* — ГК-1, *б* — Г-1, *в* — ГК-5 и *г* — ГК-15. На диаграмме *д* показан временной ряд (тонкая линия), представляющий собой среднее по ансамблю четырех исходных рядов, приведенных к нулевому среднему и единичному среднеквадратическому отклонению. Жирной линией на диаграмме *д* показана кривая скользящего среднего с окном 366 суток. Вертикальными пунктирными линиями показаны положения Кроноцкого и Жупановского землетрясений на оси времени.

**Fig. 10.** Time series of changes in the concentration of chlorine ion in the water of self-discharging wells: *a* — ГК-1, *б* — Г-1, *в* — ГК-5 and *г* — ГК-15. Diagram *д* shows the time series (thin line), which is an ensemble average of four initial series, reduced to zero mean and unit standard deviation. The bold line in Diagram *д* shows the moving average curve with a window of 366 days. Vertical dotted lines show the positions of the Kronotsky and Zhupanovsky earthquakes on the time axis.

сопоставить и сравнить изменения химического состава подземных вод во временных окрестностях Кроноцкого и Жупановского землетрясений, которые разделяет друг от друга более чем семнадцатилетний период времени.

Изменения ионно-солевого состава термоминеральных вод, дренируемых самоизливающимися скважинами, даже во временных окрестностях сильнейших землетрясений, таких как Кроноцкое и Жупановское, демонстрирует неоднозначную картину. В одних скважинах изменения отдельных гидрогеохимических показателей имеют явно аномальный характер, в других — соизмеримы с величиной погрешности соответствующих методов количественного химического анализа.

К наиболее достоверным гидрогеохимическим эффектам, которые наблюдались в изменениях ионно-солевого состава термоминеральных вод до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений, следует отнести увеличение концентрации ионов хлора и уменьшение концентрации гидрокарбонат-ионов в воде скважин ГК-1 и Г-1. Аномальная амплитуда и схожий характер изменения этих показателей дают основания рассматривать эти эффекты как гидрогеохимические прогнозные признаки обсуждаемых землетрясений.

В качестве гидрогеохимического прогнозного признака Кроноцкого и Жупановского землетрясений, по-видимому, следует рассматривать эффект, заключающийся в синхронизации характера изменения хлор-иона и, вероятно, гидрокарбонат-иона, в воде скважин, расположенных на расстояниях в десятки километров друг от друга. Наличие такого рода эффектов подтверждает достоверность прогнозных признаков сильных землетрясений, основанных на аномальных изменениях концентраций индивидуальных гидрогеохимических показателей в отдельных пунктах наблюдений.

Авторы благодарят рецензентов за исправления и замечания, которые позволили улучшить качество и содержательность работы.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на УНУ (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>) в рамках госзадания КФ ФИЦ ЕГС РАН.

#### Список литературы [References]

Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 756 с. [Anderson T. Statistical analysis of time series. Moscow: Mir, 1976. 756 p. (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., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В. Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62. <https://doi.org/10.1134/S0203030618040041> [Kopylova G.N., Boldina S.V., Guseva N.V., Kopylova Yu.G. The chemical composition of ground waters 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. № 4. P. 268–286. <https://doi.org/10.1134/S0742046318040048>].

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 sejsmologiya. 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)].

Любушин А.А. Классификация состояний низкочастотных систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1994. № 7-8. С. 135–141 [Lyubushin A.A. Classification of states of low-frequency geophysical monitoring systems // Fizika Zemli. 1994. № 7–8. P. 135–141 (in Russian)].

Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с. [Lyubushin A.A. Data analysis of geophysical and environmental monitoring systems. Moscow: Nauka, 2007. 228 p. (in Russian)].

Манухин Ю.Ф., Ворожейкина Л.А. Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия ее формирования // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 143–178 [Manukhin Yu.F., Vorozheikina L.A. Hydrogeology of the Paratunka hydrothermal system and conditions of its formation // Gidrotermalnye sistemy i termalnye polya Kamchatki. Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1976. P. 143–148 (in Russian)].

- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с. [*Medvedev S.V., Shponheuer V., Karnik V.* Scale of seismic intensity MSK-64. Moscow: MGK Academy of Sciences of the USSR, 1965. 11 p. (in Russian)].
- Рябинин Г.В.* К вопросу о механизме изменения химического состава воды самоизливающихся скважин в условиях нестационарного режима (на примере скважины ГК-1, полуостров Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. Вып. 56. №4. С. 75-89. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-4-56-75-89> [*Ryabinin G.V.* 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) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2022. № 4(56). P. 75–89 (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 southeast 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., Pokrovski 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., 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)].
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидродинамические и гидрогазохимические вариации параметров режима подземных вод в периоды подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.97 г. // Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский, 1998 г. С. 134–147 [*Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V.* Hydrodynamic and hydro-gas-chemical variations of the underground waters behavior before and after the Kronotskoe earthquake of December 5, 1997 // Kronotskoe zemletriasenie 5 dekabria 1997 g. Predvestniki, osobennosti, posledstviia. Petropavlovsk-Kamchatskii, 1998. P. 134–147 (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. №1. Вып. № 29. С. 5–16 [*Chebrov V.N., Kugaenko Yu.A., Abubakirov I.R. et al.* The January 30th, 2016 earthquake with  $K_s = 15.7$ ,  $M_w = 7.2$ ,  $I = 6$  in the zhupanovsky region (Kamchatka) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 5–16 (in Russian)].
- Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеенко Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5> [*Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V.* Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions // Geofizicheskie issledovaniia. 2020. V. 21. № 3. P. 66–91 (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>
- 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 V. 8. 576017. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017>
- Taran Y., Ryabinin G., Pokrovsky B., Cienfuegos E.* Methane-rich thermal and mineral waters of the Avachinsky Depression, Kamchatka // Applied Geochemistry. 2022. V. 145. P. 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105414>
- Thomas D.* Geochemical precursors to seismic activity // Pageoph. 1988. V. 126. P. 241–266. <https://doi.org/10.1007/bf00878998>

**CHANGES IN THE ION-SALT COMPOSITION OF THERMOMINERAL WATERS OF SELF-FLOWING WELLS BEFORE AND AFTER KRONOTSKY (5.12.1997,  $M_w=7.8$ ) AND ZHUPANOVSKY (30.01.2016,  $M_w=7.2$ ) EARTHQUAKES IN KAMCHATKA**

**G.V. Ryabinin, V.A. Poletaev**

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

Received November 19, 2023; revised April 09, 2025; accepted June 25, 2025

The Kronotsky and Zhupanovsky earthquakes were the strongest seismic events in the southeastern part of the Kamchatka Peninsula in 1996–2020. The intensity of their induced shaking in Petropavlovsk-Kamchatsky, on the MSK-64 scale, is estimated at 5–6 and 4–5 MSK, respectively. The paper describes and compares the changes in the ion-salt composition of thermomineral waters that were observed before and after the Kronotsky and Zhupanovsky earthquakes. Changes in the ion-salt composition are considered using the example of variations in concentrations of chlorine, bicarbonate, and calcium ions in the water of seven self-flowing wells located in the Petropavlovsk-Kamchatsky area. It is demonstrated that before and after the Kronotsky and Zhupanovsky earthquakes, in the water of most wells an increase in the concentration of chlorine ion and simultaneous decrease in the concentration of bicarbonate ion were observed. In the ГК-1 and Г-1 wells, multidirectional changes in the concentrations of chlorine and bicarbonate ions were anomalous, which makes it possible to consider them as hydrogeochemical predictive signs of severe seismic events.

*Keywords: Kamchatka, self-flowing well, hydrogeochemical precursors of earthquakes.*