

УДК 550.4

ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИЕ ФЛЮИДЫ КЕРЧЕНСКО-ТАМАНСКОЙ ОБЛАСТИ: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ТРЕНДЫ. СООБЩЕНИЕ 1. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ГЕНЕЗИС ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИХ ВОД¹

© 2021 г. В. Ю. Лаврушин^{a, b, *}, А. С. Айдаркожина^a, Э. В. Сокол^{b, **},
Г. А. Челноков^a, О. Л. Петров^a

^aГеологический институт РАН (ГИН РАН),
Пыжжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^bИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН),
просп. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: v_lavrushin@ginras.ru

**e-mail: sokol_ag@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 28.04.2021 г.

Принята к публикации 29.06.2021 г.

Проанализированы химические и изотопные ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) характеристики воды из 42 грязевых вулканов Керченско-Таманской области (Крымско-Кавказский регион). С использованием Mg-Li гидрохимического геотермометра оценены температуры формирования грязевулканических вод ($t(\text{Mg-Li}) = 40\text{--}134^\circ\text{C}$). Установлено, что в балансе грязевулканических флюидов значительную долю (до 80% в общем объеме) составляют дегидратационные воды, выделяющиеся в процессе трансформации смектита в иллит. Они характеризуются низким содержанием Cl-иона, высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ от +13 до +17‰ и $\delta^2\text{H}$ от -25 до -20‰. Для них также характерны высокие концентрации HCO_3^- , В, Li, Ва и других микроэлементов. Показано, что значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде, концентрации HCO_3^- и В увеличиваются с ростом температур флюидогенерации.

Ключевые слова: грязевые вулканы, $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в воде, Керченский полуостров, Таманский полуостров.

DOI: 10.31857/S0024497X21060045

Флюидные системы глубоких (более 4 км) горизонтов осадочных бассейнов постоянно остаются в фокусе интересов исследователей в связи с проблемами изучения протекающих в них процессов литогенеза и оценкой перспектив их нефтегазоносности. Детальное исследование таких систем позволяет реконструировать направленность геохимических процессов при взаимодействии основных компонентов: вода—порода—органическое вещество. Однако до сих пор флюидные системы глубоких горизонтов осадочных бассейнов изучались лишь фрагментарно. Гидрохимическое опробование пластовых вод нефтегазоносных бассейнов обычно ограничивается перспективными нефтегазоносными структурами, в которых сосредоточены скопления уг-

леводородов. Вместе с тем химический состав пластовых вод в таких месторождениях может не в полной мере отражать геохимическую обстановку процессов нефтегазогенерации. В этой связи большой интерес представляют грязевулканические проявления — естественные очаги разгрузки глубинных флюидов, генетически связанных с нефтематеринскими толщами [Губкин, Федоров, 1938]. Их изучение позволяет получить представление о региональных геохимических особенностях состава водной и газовой фаз подземных флюидов, связанных с процессами нефтегазогенерации.

Самым крупным районом проявления грязевого вулканизма на территории Российской Федерации является южная часть Западно-Кубанского прогиба, охватывающая равнинные районы Северо-Западного Предкавказья и Восточного Крыма (Таманский и Керченский полуострова, соответственно) (рис. 1). Здесь, в пределах субширотной

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0024497X21060045 для авторизованных пользователей.

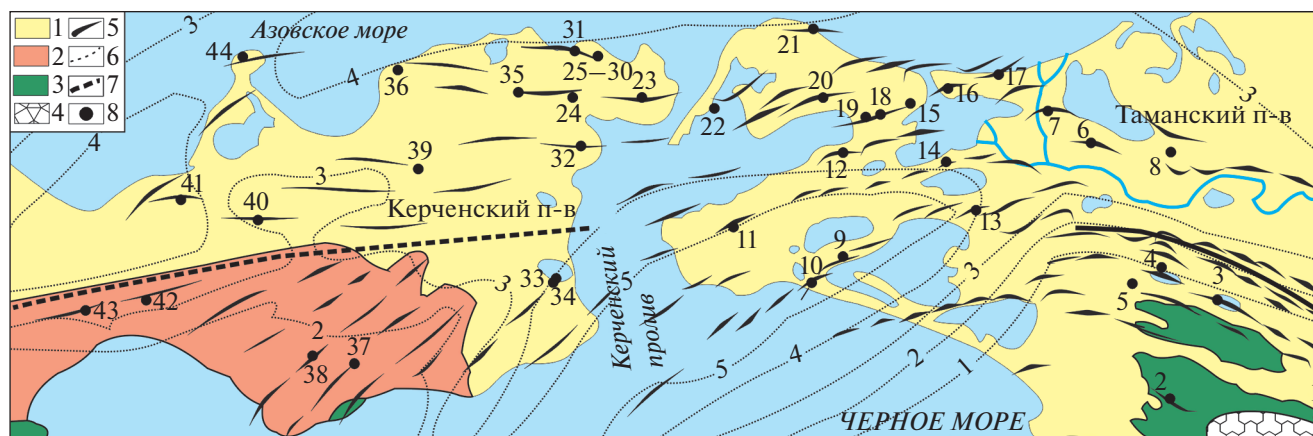


Рис. 1. Геологическая карта Керченского и Таманского полуостровов по [Шнюков и др., 1986] и схема опробования грязевых вулканов Керченско-Таманской области.

1–3 – выходы отложений разного возраста: 1 – позднемиоцен-четвертичного, 2 – майкопской серии, 3 – мелового возраста; 4 – антиклинорий Большого Кавказа; 5 – оси антиклинальных складок; 6 – изопахиты мощностей отложений майкопской серии [Туголесов, 1985]; 7 – разломные нарушения; 8 – пункты опробования (цифры около точек соответствуют столбцу 1 в табл. 1).

Керченско-Таманской области грязевого вулканизма, сосредоточено более 80 вулканов, из которых примерно половина действует постоянно [Якубов и др., 1980; Шнюков и др., 1986, 2005; Алиев и др., 2015]. Грязевулканические постройки локализованы вблизи южного борта Западно-Кубанского прогиба в полосе $\sim 150 \times 30$ км.

Керченско-Таманская грязевулканическая область, наряду с Азербайджанской и Грузинской, является одной из трех провинций развития грязевого вулканизма в Кавказском регионе. Все они сформировались в обстановке внутриконтинентальной коллизии в зоне сечения горных сооружений Большого Кавказа и Крыма [Zonenshain, Le Pichon, 1986; Шнюков и др., 2005; Saintot, Angelier, 2000; Kopf et al., 2003]. Компрессионная тектоника в комплексе с нефтегазоносностью рассматривается в качестве одной из основных причин появления грязевого вулканизма в этом регионе [Kopf, 2002].

Химический состав вод и изотопно-химический состав газов грязевых вулканов Керченско-Таманской области исследовались неоднократно. Однако большинство этих работ охватывает определенный регион или характеризует узкий спектр элементов [Шнюков и др., 1986, 2005; Гемп и др., 1970; Валяев и др., 1985; Лаврушин и др., 1996, 2003, 2005; Kikvadze et al., 2010, 2020; Лаврушин, 2012; Киквадзе и др., 2014; Ершов, Левин, 2016; Sokol et al., 2018, 2019]. Региональные геохимические особенности флюидных систем этой области рассматривались только в работах 1970–1980 гг. и опирались на соответствующие тому времени базы аналитических данных [Якубов и др., 1980; Шнюков и др., 1986].

Самостоятельную проблему представляет оценка представительности отобранных проб. В каждом конкретном случае необходимо установить, характеризуют ли они состав флюидов, поступающих в грязевулканический канал непосредственно из глубинного резервуара, или представляют собой случайную смесь вод, захваченных на разных глубинах. Поскольку климат региона близок к аридному, в жаркий сезон всегда есть риск отобрать пробу, измененную процессами поверхностного упаривания, а после интенсивных дождей или таяния снега – искаженную примесью атмосферных осадков. Отчасти ответы на эти вопросы можно получить, оценив стабильность геохимических характеристик флюидов одного и того же объекта во времени или оценивая флуктуации состава проб, взятых одновременно из разных салз одного и того же вулкана.

Целью данной работы было исследование локальных и региональных изотопно-геохимических особенностей флюидов грязевулканических систем Западно-Кубанского прогиба, что позволило рассмотреть вопросы генезиса их компонентного состава и охарактеризовать региональные закономерности изменения температурных условий и глубин их формирования. Последняя задача является одной из важнейших, т.к. все грязевулканические флюиды были исследованы в местах их естественной разгрузки и нам достоверно не было известно с каких глубин они поступают.

Результаты настоящей работы изложены в двух сообщениях. В первом рассматриваются особенности химического и изотопного состава водной фазы, во втором – геохимические особенности грязевулканических флюидов и регио-

нальные вариации геохимических характеристик флюидных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена на основе результатов экспедиционных работ, проведенных в 2009 г. на Таманском полуострове, в 2015 и 2017 гг. — на Керченском полуострове (Крым) и в 2020 г. — в обоих районах. Во время этих работ обследовались вулканы, на которых происходило выделение глинистой пульпы и газов. Всего было обследовано 42 вулкана: 21 — на Таманском и 21 — на Керченском полуостровах (см. рис. 1, табл. 1); также учитывались материалы геохимических исследований, проведенных нами в 1994 и 2001 гг. [Лаврушин и др., 1996, 2003, 2005; Киквадзе и др., 2014; Kikvadze et al., 2020].

На вулканах отбирались пробы воды и свободных газов. При отборе проб воды предпочтение отдавалось центральным сальзам (если они действовали) или активно газующим крупным сальзам, изливающим воду и грязь. Отсутствие застойных явлений имело важное значение, поскольку в условиях засушливого климата реальный солевой состав вод бессточных сальз существенно модифицируется процессами инсоляционного упаривания [Sokol et al., 2018, 2019].

Для определения варибельности состава флюидов, выделяющихся в пределах крупных грязевулканических построек, на нескольких из них одновременно были опробованы 4–5 сальз. Такие работы были выполнены на вулканах Гладковском, Шапурском, Семигорском и Бугазском (Тамань), Ольденбургского и Большом Тарханском (Керченский полуостров). Расстояние между сальзами варьировало от первых метров до нескольких десятков метров.

При отборе проб с помощью стеклянных электродов проводились измерения pH и Eh в воде опробуемых сальз. Во избежание загрязнения проб воды KCl, присутствующим в электродах сравнения, измерения pH и Eh проводились в отдельной емкости, заполненной свежей пульпой. Измерения Eh выполнялись платиновым электродом, поэтому в результаты полевых измерений вводилась поправка на “водородный электрод” (+180 мВ).

Пробы воды отбирались в пластиковые бутылки объемом 1.5–2 л. После отстаивания глинистой пульпы в течение суток из них была отобрана чистая вода, которая была отфильтрована (фильтр 0.45 мкм) в пластиковые боксы объемом 15 и 50 мл. Пробы воды в пластиковых боксах объемом 15 мл были подкислены концентрированной азотной кислотой. В этих пробах проводилось определе-

ние солевого состава воды методами ICP-MS и ICP-AES. Определения выполнялись в Аналитическом центре ИПТМ РАН (г. Черноголовка). Ошибка определения концентраций элементов в воде была не хуже 15% [Karandashev et al., 2016].

Пробы воды, отобранные в 50 мл боксы, хранились в холодильнике без консервации и предназначались для определения концентраций ионов HCO_3^- и Cl^- (выполнялись методом кислотного и AgNO_3 титрования в химико-аналитической лаборатории ГИН РАН, г. Москва). В таких же боксах хранилась вода для определения изотопных характеристик H, C и O.

Изотопные характеристики кислорода и водорода воды были определены в лаборатории геохимии изотопов и геохронологии на масс-спектрометре Delta-V-Advantage (ЦКП ГИН РАН, г. Москва). Результаты определений δD and $\delta^{18}\text{O}$ приводятся в ‰ относительно стандарта V-SMOW. Погрешность определений $\delta^{18}\text{O}$ была не хуже $\pm 0.2\text{‰}$, а для δD — $\pm 2\text{‰}$.

Оценки пластовых температур формирования грязевулканических вод проводились по различным гидрохимическим геотермометрам. Однако ранее было показано [Лаврушин, 2012; Kikvadze et al., 2020], что для грязевулканических вод оптимален Mg-Li геотермометр, разработанный для оценки температур пластовых вод нефтегазоносных бассейнов в интервале значений от 0 до 350°C [Kharaka, Mariner, 1989]:

$$t(\text{Mg} - \text{Li}) = \frac{2200}{\lg\left(\frac{\sqrt{\text{Mg}}}{\text{Li}}\right) + 5.47} - 273.$$

В формуле используются концентрации Mg и Li, выраженные в мг/л; исходные данные для расчетов представлены в табл. 2 и 1п (Приложение 1). Результаты расчетов пластовых температур приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности солевого состава грязевулканических вод

В целом грязевулканические воды Керченского и Таманского полуостровов достаточно однотипны. Величина pH в них варьирует от 7.0 до 8.9, а Eh — от –220 до +430 мВ. Высокие значения Eh характерны для сальз со стоячей водой, длительно контактировавших с атмосферой. Однако в некоторых случаях и самые низкие значения Eh (–220 ...–100 мВ) также могут быть следствием поверхностных искажений — биогенной сульфатредукции, которая активизируется в донных отложениях сальз при поступлении в них сульфатов, смываемых с поверхности грязевулканических

Таблица 1. Координаты пунктов опробования, изотопные характеристики ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) и расчетные температуры формирования ($t(\text{Mg-Li})$) грязевулканических и других типов вод Керченско-Таманской области

№ на рис. 1	№ обр.	Пункт опробования (грязевые вулканы)	Широта	Долгота	Абс. огм., м	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	$t(\text{Mg-Li})$, °C
Грязевые вулканы Таманского полуострова									
1	10-20	Шапугетский	44.727358	38.071827	111	08.07.2020	2.5	-14	94
2	47/01	Семигорский	44.901111	37.597833	71	22.08.2001	9.7	-22	79
2	14-1/09	Семигорский, сальза 1	44.901110	37.597830	70	09.07.2009	10.3	-25	87
2	14-2/09	Семигорский, сальза 2	44.901110	37.597830	70	09.07.2009	6.3	-20	-
2	14-3/09	Семигорский, сальза 3	44.901110	37.597830	70	09.07.2009	10.0	-27	86
2	11-20	Семигорский	44.901180	37.597660	65	08.07.2020	9.7	-20	79
3	48/01	Гладковский, центральный, сальза	45.005611	37.723722	131	23.08.2001	6.2	-13	128
3	2/09БГ	Гладковский, центральный, сальза	45.005611	37.723722	131	03.07.2009	5.0	-21	136
3	2-1/09	Гладковский, центральный, сальза 1	45.005611	37.723722	131	03.07.2009	6.2	-13	-
3	2-4/09	Гладковский, центральный, сальза 4	45.005611	37.723722	131	03.07.2009	5.0	-18	-
3	2-8/09	Гладковский, центральный, сальза 8	45.005611	37.723722	131	03.07.2009	5.0	-19	-
3	2-12/09	Гладковский, центральный, сальза 12	45.005611	37.723722	131	03.07.2009	5.7	-14	-
3	2-13/09	Гладковский, центральный, сальза 13	45.005611	37.723722	131	03.07.2009	6.1	-12	-
3	13-20	Гладковский, центральный, сальза А	45.005489	37.723620	122	09.07.2020	1.8	-5	130
3	13-20-1	Гладковский, центральный, сальза Б	45.005489	37.723620	122	09.07.2020	5.8	-12	129
3	13-20-2	Гладковский, северная группа сальз	45.006610	37.723338	120	09.07.2020	5.0	-1	123
4	49/01	Шуго	45.070583	37.610417	148	23.08.2001	10.0	-23	128
4	3-1/09 БГ	Шуго	45.070583	37.610417	148	03.07.2009	5.2	-31	137
4	3-2/09	Шуго	45.070583	37.610417	148	03.07.2009	5.6	-32	-
4	3-3/09	Шуго	45.070583	37.610417	148	03.07.2009	4.9	-34	-
4	14-20	Шуго	45.070414	37.610717	139	09.07.2020	9.5	-20	134
5	50/01	Восток	45.028361	37.585611	172	23.08.2001	6.8	-21	57
5	15/09	Восток	45.028361	37.585611	170	10.07.2009	3.3	-29	63
5	15/09БГ	Восток	45.028361	37.585611	170	10.07.2009	3.2	-31	-
5	15-20	Восток	45.028390	37.585590	167	09.07.2020	6.3	-14	67
6	9-1/09	Гнилая, озеро в центре вулкана	45.251806	37.439167	29	07.07.2009	4.7	-20	-
6	9-2/09БГ	Гнилая, центр, сальза рядом с озером	45.251806	37.439167	29	07.07.2009	1.5	-34	41
6	9-2/09	Гнилая, центр, сальза рядом с озером	45.251806	37.439167	29	07.07.2009	1.9	-32	-
6	63/01	Гнилая, южная группа	45.251806	37.439167	32	27.08.2001	2.4	-37	32
6	9-3/09	Гнилая, южная группа	45.251806	37.439167	29	07.07.2009	0.9	-39	51
6	2-20	Гнилая, южная группа сальз	45.249670	37.436555	25	05.07.2020	3.2	-13	51
6	2-20-2	Гнилая, северная группа сальз	45.253754	37.435404	27	05.07.2020	1.8	-29	45
7	62/01	Миска	45.278083	37.387444	72	27.08.2001	1.2	-34	47
8	Т-17-10-1	Курчанский (Дачный)	45.180748	37.637557	50	20.09.2017	7.2	-9	57
9	52/01	Поливадина	45.129778	36.921194	47	24.08.2001	2.8	-30	62

Таблица 1. Продолжение

№ на рис. 1	№ обр.	Пункт опробования (грязевые вулканы)	Широта	Долгота	Абс. отм., м	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	t(Mg-Li), °C
9	5/09	Поливадина	45.129778	36.921194	39	06.07.2009	3.7	-37	—
9	8-20	Поливадина	45.129795	36.921168	40	07.07.2020	2.7	-25	62
10	51/01	Бугазский	45.118667	36.897750	13	24.08.2001	8.5	-23	75
10	4-1/09	Бугазский	45.118667	36.897750	12	06.07.2009	10.1	-26	83
10	4-2/09	Бугазский	45.118667	36.897750	12	06.07.2009	10.2	-28	80
10	4-3/09 БГ	Бугазский	45.119063	36.898585	10	06.07.2009	8.8	-26	—
10	4-3/09	Бугазский	45.119063	36.898585	10	06.07.2009	8.9	-27	81
10	7-20	Бугазский	45.119094	36.898617	8	07.07.2020	8.5	-18	75
11	1/09-БГ	Карabetова гора	45.201051	36.794771	114	02.07.2009	13.1	-19	—
11	1/09	Карabetова гора	45.201051	36.794771	114	02.07.2009	14.2	-24	89
11	53/01	Карabetова гора (вода)	45.195222	36.768972	104	24.08.2001	6.6	-28	82
11	9-20	Карabetова гора	45.201086	36.794770	116	07.07.2020	12.2	-20	80
12	6-1/09	Шапурский	45.269250	36.962560	50	06.07.2009	3.2	-33	76
12	6-2/09	Шапурский	45.269250	36.962560	50	06.07.2009	3.2	-20	—
12	6-3/09	Шапурский	45.269250	36.962560	50	06.07.2009	4.2	-22	—
12	6-4/09	Шапурский	45.269250	36.962560	50	06.07.2009	6.3	-9	—
12	6-5/09	Шапурский	45.269250	36.962556	50	06.07.2009	3.3	-32	—
12	54/01	Шапурский	45.269250	36.962556	54	25.08.2001	2.2	-23	67
12	18-20	Шапурский	45.269349	36.962460	46	10.07.2020	2.6	-16	78
13	55/01	Южно-Нефтяной	45.189389	37.183528	64	25.08.2001	0.7	-11	20
13	7/09	Южно-Нефтяной	45.189389	37.183528	64	06.07.2009	-3.2	-33	18
13	17-20	Ист. на восточном склоне Южно-Нефтяного	45.188811	37.187609	57	10.07.2020	-2.5	-23	111
14	8/09	Северно-Нефтяной	45.249484	37.200062	64	06.07.2009	0.6	-28	—
14	16-20	Северно-Нефтяной	45.249484	37.200062	64	10.07.2020	1.3	-24	63
15	5-20	Ахтанзовский	45.312109	37.082015	65	06.07.2020	—	—	95
16	11/09 БГ	Сопка	45.324611	37.171139	35	07.07.2009	-3.4	-35	56
16	11/09	Сопка	45.324611	37.171139	35	07.07.2009	-2.2	-27	—
16	3-20	Сопка	45.324572	37.171144	41	05.07.2020	2.2	-9	66
17	60/01	Синяя балка (Тиздар)	45.357167	37.099194	12	27.08.2001	-1.6	-34	63
18	17/09	Центральные Цимбалы	45.309420	37.039280	98	11.07.2009	2.9	-35	82
18	17-1/09	Центральные Цимбалы	45.309420	37.039280	98	11.07.2009	3.8	-28	37
19	16/09	Западные Цимбалы	45.309417	37.039278	90	11.07.2009	7.8	-29	—
19	Т-17-16-8	Западные Цимбалы (вершина)	45.308729	37.030301	90	22.09.2017	6.3	-28	66
19	6-20	Западные Цимбалы	45.309372	37.032474	91	06.07.2020	4.4	-28	96
20	59/01	Фонталовский	45.348111	36.905083	29	26.08.2001	0.8	-31	88
21	57/01	Кучугурский	45.432306	36.922528	10	25.08.2001	-4.9	-50	36
21	13-1/09	Кучугурский	45.432306	36.922528	10	09.07.2009	5.4	-22	66

Таблица 1. Продолжение

№ на рис. 1	№ обр.	Пункт опробования (грязевые вулканы)	Широта	Долгота	Абс. отм., м	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	t(Mg-Li), °C
21	13-2/09	Кучугурский	45.432306	36.922528	10	09.07.2009	-0.8	-33	
21	1-20	Кучугурский (боковая соль)	45.432205	36.922539	11	04.07.2020	-7.4	-56	40
21	T-17-4-3	Кучугурский, H ₂ S грифон у берега Азовского моря	45.432219	36.923910	13	20.09.2017	4.7	-35	63
22	58/01	Чушка (верхняя соль)	45.354139	36.713806	1	26.08.2001	3.7	-28	69
22	12/09	Чушка (верхняя соль)	45.354139	36.713806	1	09.07.2009	3.0	-22	82
22	12-1/09	Чушка (нижняя соль)	45.354250	36.714234	0	09.07.2009	5.0	-33	75
22	4-20	Чушка (нижняя соль)	45.354250	36.714234	-7	06.07.2020	3.4	-24	68
Грязевые вулканы Керченского полуострова									
23	9-15	Еникальский	45.377953	36.618516	20	21.07.2015	0.4	-23	34
23	9-2-15	Еникальский, восточная соль	45.379238	36.619914	29	21.07.2015	12.8	-30	89
23	26-20	Еникальский, восточная соль	45.379220	36.619912	27	17.07.2020	0.7	-20	90
23	208-17	Еникальский	45.377993	36.618391	23	17.09.2017	11.2	-24	36
23	208-1-17	Еникальский	45.378377	36.619699	14	17.09.2017	-1.0	-44	60
23	E-17-4-4	Еникальский, небольшая соль	45.377930	36.617920	15	17.09.2017	-	-	48
23	26-20-1	Еникальский (кратерное поле)	45.378004	36.618568	20	15.07.2020	-	-	-
24	209-17	нефтяной ист. с. Глазковка	45.375678	36.558819	77	17.09.2017	-	-	-
25	3-15	Ольденбургского, соль 1-1	45.424549	36.485453	62	20.07.2020	-	-	100
25	202-1-17	Ольденбургского, соль 1	45.424514	36.485539	54	09.09.2017	10.8	-20	117
25	202-2-17	Ольденбургского, соль 2	45.424556	36.485477	53	09.09.2017	12.5	-20	106
25	202-3-17	Ольденбургского, соль 3	45.424671	36.485536	53	09.09.2017	11.8	-23	104
25	202-4-17	Ольденбургского, соль 4	45.424589	36.485628	53	09.09.2017	9.0	-19	117
25	202-5-17	Ольденбургского, соль 5	45.424704	36.485447	53	09.09.2017	12.8	-22	103
25	19-20	Ольденбургского, соль 1	45.424619	36.485437	88	12.07.2020	12.8	-21	113
25	19-20-1	Ольденбургского, соль 2	45.424543	36.485495	59	12.07.2020	9.2	-13	100
26	4-15	сопка Андрусова боковая соль	45.426704	36.477574	66	20.07.2015	13.0	-23	108
26	203-17	сопка Андрусова боковая соль	45.426673	36.477517	58	09.09.2017	13.5	-24	107
26	22-20	сопка Андрусова боковая соль	45.426674	36.477525	67	12.07.2020	11.8	-17	105
27	5-15	Бултанакская группа, сопка Бултанакская	45.425899	36.478852	60	20.07.2015	13.3	-22	110
27	B-17-5-2	Бултанакская группа, газирующее озеро рядом с пересошей кальдерой вулкана	45.424917	36.480722	62	05.09.2017	7.0	-14	110
27	201-17	Бултанакская группа, небольшая соль рядом с центральным озером	45.422998	36.477758	51	09.09.2017	4.2	-24	160

Таблица 1. Продолжение

№ на рис. 1	№ обр.	Пункт опробования (грязевые вулканы)	Широта	Долгота	Абс. отм., м	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	t(Mg-Li), °C
27	201-1-17	Булганакская группа, центральное озеро	45.422943	36.477616	54	09.09.2017	11.0	-15	141
27	21-20	Центральное озеро (Булганакская группа)	45.423124	36.477529	57	12.07.2020	12.3	-16	120
27	В-17-4-5	Пересыхающий водоток рядом с центральным озером (Булганакская группа)	45.423505	36.479058'	50	05.09.2017	—	—	114
28	20-20	Сопка Павлова (озеро)	45.425888	36.478756	58	12.07.2020	12.3	-18	108
29	Tish-17-5-9	Сопка Тищенко, H ₂ S грифон	45.426056	36.473694	65	16.09.2017	—	—	76
29	27-20	Сопка Тищенко	45.426071	36.473762	64	15.07.2020	—	—	82
30	8-15	Тарханский	45.424660	36.464380	86	21.07.2015	8.8	-14	103
31	7-15	Большой Тарханский вулкан, главный выход (1) – травергиновый	45.440499	36.438072	3	20.07.2015	13.5	-21	108
31	204-17	Большой Тарханский вулкан, главный выход (1) – травергиновый	45.440458	36.438094	3	11.09.2017	14.0	-22	101
31	28-20	Большой Тарханский вулкан, главный выход (1) – травергиновый	45.440451	36.438068	3	16.07.2020	12.7	-19	112
31	204-1-17	Большой Тарханский, 2-ой выход	45.440701	36.437739	2	11.09.2017	10.2	-16	105
31	204-2-17	Большой Тарханский, 3-ий выход	45.440706	36.437546	2	11.09.2017	14.5	-22	114
31	204-3-17	Большой Тарханский, 4-ый выход у склона долины	45.440812	36.437954	2	11.09.2017	12.6	-11	100
31	28-20-1	Большой Тарханский, сальза на солончаке	45.440723	36.437502	12	16.07.2020	12.7	-17	60
32	17-15	Солдатско-Слободской	45.328983	36.450390	1	24.07.2015	4.3	-23	46
32	SS-17-1-6	Солдатско-Слободской	45.329207	36.450946	4	08.09.2017	5.6	-24	52
32	SS-17-3-4	Солдатско-Слободской	45.329207	36.450946	4	08.09.2017	5.5	-29	52
32	25-20	Солдатско-Слободской	45.328967	36.450539	5	15.07.2020	3.4	-23	72
33	19-15	Чонгеленский (Тобечик), грязевой вулкан	45.153579	36.377368	-10	25.07.2015	0.1	-29	76
33	205-17	Чонгеленский (Тобечик), грязевой вулкан	45.153527	36.377339	-10	12.09.2017	1.0	-25	43
34	19-1-15	Чонгеленский (Тобечик), нефтяной источник	45.153405	36.378520	-10	26.07.2015	-0.1	-30	45
34	205-1-17	Чонгеленский (Тобечик), нефтяной источник	45.153393	36.378508	-10	12.09.2017	0.7	-29	39
34	23-20	Чонгеленский (Тобечик), нефтяной источник	45.153396	36.378511	-9	14.07.2020	-0.7	-20	68
35	16-15	Бурашский	45.398712	36.336109	117	24.07.2015	3.6	-19	70
35	34-20	Бурашский	45.398679	36.336051	124	18.07.2020	6.4	-11	52
36	1-2-15	Сююрташский	45.446844	36.112164	38	19.07.2015	-0.5	-21	105
36	1-3-15	Сююрташский, сероводородный источник	45.447060	36.113499	18	19.07.2015	-3.2	-41	108
37	20-15	Борух-Оба (старая газифирующая скважина)	45.116288	36.023137	61	26.07.2015	10.4	-23	101
37	33-20	Борух-Оба (старая газифирующая скважина)	45.116278	36.023164	63	14.07.2020	10.4	-15	97
38	21-15	Борух-Оба	45.121333	35.999804	74	26.07.2015	11.2	-14	94
38	32-20	Борух-Оба	45.121788	36.000820	75	17.07.2020	9.2	1	—
39	23-15	ист. Сеит-Эли	45.312331	36.185415	70	26.07.2015	9.2	-38	—

Таблица 1. Окончание

№ на рис. 1	№ обр.	Пункт опробования (грязевые вулканы)	Широта	Долгота	Абс. отм., м	Дата отбора	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	t(Mg-Li), °C
40	13-15	Королёвский (озеро у подножья Королёвской сопки)	45.266848	35.784911	25	23.07.2015	13.8	-4	149
40	Кг-17-6-1	Королёвский (озеро у подножья Королёвской сопки)	45.266804	35.784866	25	06.09.2017	—	—	157
40	29-20	Королёвский (озеро у подножья Королёвской сопки)	45.266850	35.784903	23	17.07.2020	10.1	-15	132
41	11-15	Насырский	45.290809	35.681821	31	23.07.2015	0.8	-25	70
41	207-17	Насырский	45.290870	35.681930	24	23.07.2015	—	—	—
41	30-20	Насырский	45.290769	35.681645	28	17.07.2020	-0.4	-23	70
42	10-15	Арма-Эли (боковая сольза)	45.182564	35.578069	38	22.07.2015	6.1	-22	86
42	31-20	Арма-Эли (боковая сольза)	45.182577	35.578149	34	17.07.2020	5.3	-10	90
43	206-17	Владиславовский	45.155876	35.437780	26	15.09.2017	—	—	95
43	35-20	Владиславовский	45.155559	35.437645	28	20.07.2020	12.2	-26	91
Поверхностные воды Таманского полуострова									
	10-20Р	Река (недалеко от вулкана Шапсутский)	44.732530	38.064438	91	08.07.2020	-9.2	-55	—
	8р/09	р. Казачий Ерик, протока р. Кубань	45.230861	37.289132	1	07.07.2009	-12.1	-75	—
	10р/09	Озеро на в. Миска	45.275929	37.385514	61	07.07.2009	0.0	-22	—
	12/09 БГ	Лиман, рядом с в. Чушка	45.354139	36.713806	0	09.07.2009	-0.2	-14	—
	12р/09	Лиман, рядом с в. Чушка	45.354139	36.713806	0	09.07.2009	-0.3	-13	—
	4-20р	Лиман, рядом с в. Чушка	45.354250	36.714234	0	06.06.2020	0.8	-3	—
	16/09р	Озеро на в. Западные Цимбалы	45.309353	37.032461	98	11.07.2009	4.4	1	—
Поверхностные воды и источники Керченского полуострова									
	б.н.	Темрюк, вода из водопровода	45.376667	36.430833	—	22.09.2017	-14.4	-97	—
	б.н.	с. Войково, скв., глубина 400м	45.329580	37.275607	3	24.09.2017	-10.6	-73	—
	14-15	Колодец рядом с с. Новоселовка	45.237120	36.115506	102	23.07.2015	-8.3	-57	—
44	12-15	Мыс Казантип, нефтяная скважина	45.456432	35.823591	47	23.07.2015	0.7	-35	—
	24-15	Азовское море	45.417710	36.074930	0	23.07.2015	-2.8	-22	—
	25-15	с. Золотое, частная скв.	45.417710	36.074930	2	27.07.2015	-14.5	-104	—
	26-15	Пресный ист. С. Новоотрадное	45.390603	36.057663	1	27.07.2015	-14.6	-107	—
	10-20-1р	Дождь в р-не Шапсутского вулкана	44.742583	38.074592	81	08.07.2020	-1.0	-3	—
	26-20 р	Колодец рядом с Еникальским вулканом	45.377960	36.622490	23	15.07.2020	-8.5	-62	—
	б.н.	Озеро Кояшское (соленое)	45.053637	36.168842	0	03.07.2020	2.2	-23	—
	Сл-20-1-2	Озеро Чокрак (соленое)	45.470445	36.312100	0	23.09.2017	-3.5	-18	—
	Тв-20-27	Озеро Тобечик (соленое)	45.536146	36.378180	0	Сентябрь. 2020	-0.1	-32	—
	2-15	Серводородный источник	45.461789	36.312878	-5	19.07.2015	-3.3	-36	—

Примечание. б.н. — без номера; прочерк — определения не производились.

Таблица 2. Характеристика солевого состава вод грязевых вулканов Керченско-Таманской области

№ на рис. 1	№ пробы	Название вулкана/ пункта опробования	Дата отбора	Сумма солей, г/л	T _{изм.} , °C	Eh, mV	pH	F ⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁺ , мг/л	Na ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л
Грязевые вулканы Таманского полуострова															
1	10-20	Шапсутский	08.07.2020	18.4	23	272	7.72	<0.3	1001	10257	14.8	6825	56	33	165
2	47/01	Семигорский	22.08.2001	9.9		—	7.9	1.7	5361	1668.5	5.8	2798	24	14.6	9.4
2	14-1/09	Семигорский, сальза 1	09.07.2009	10.2	22.3	-50	7.95	1.9	5246	2128	36.0	2706	28	20	13.7
2	14-2/09	Семигорский, сальза 2	09.07.2009		23	120	8.42	1.4	4626	2127	—	—	—	—	—
2	14-3/09	Семигорский, сальза 3	09.07.2009	11.0	23	120	8.25	1.8	5612	2128	176	3006	28	16	8.1
2	11-20	Семигорский	08.07.2020	9.4	17	142	7.46	<0.3	4850	1568	3.8	2943	29	19	25
3	48/01	Гладковский, центральная сальза	23.08.2001	19.1	—	—	7.95	0.42	204.3	11892.5	1.1	5468	79	206	1293
3	2/09БГ	Гладковский, центральный, сальза 1	03.07.2009	19.7	—	—	6.93	0.4	610	11347	1.5	5836	115	230	1560
3	2-1/09	Гладковский, центральный, сальза 1	03.07.2009	—	23.5	—	—	0.5	244	19645	—	—	—	—	—
3	2-4/09	Гладковский, центральный, сальза 4	03.07.2009	—	16.6	233	—	0.3	366	12553	—	—	—	—	—
3	2-8/09	Гладковский, центральный, сальза 8	03.07.2009	—	25.3	—	—	0.6	366	14326	—	—	—	—	—
3	2-12/09	Гладковский, центральный, сальза 12	03.07.2009	—	18.9	—	—	0.3	366	14184	—	—	—	—	—
3	2-13/09	Гладковский, центральный, сальза 13	03.07.2009	—	23.6	—	—	0.4	183	13475	—	—	—	—	—
3	13-20	Гладковский, центральный, сальза А	09.07.2020	27.3	19	300	7.74	<0.3	84.4	16126	134	8623	139	298	1925
3	13-20-1	Гладковский, центральный, сальза Б	09.07.2020	22.3	19	50	7.71	<0.3	94.6	13331	38.0	7023	103	253	1505
3	13-20-2	Гладковский, северная группа сальз	09.07.2020	19.8	20	—	—	<0.3	127	11834	н.о.	6175	93	240	1336
4	49/01	Шуто	23.08.2001	19.2	—	—	7.41	1	4749	8094	6.5	6188	65	72	40
4	3-1/09 БГ	Шуто	03.07.2009	17.4	21	212	7.76	1	3538	7801	120	5725	77	66	30
4	3-2/09	Шуто	03.07.2009	—	—	211	7.54	0.9	3294	16524	—	—	—	—	—
4	3-3/09	Шуто	03.07.2009	—	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	14-20	Шуто	09.07.2020	—	23.8	-11	7.47	—	13900	—	49.4	7508	80	101	39
5	50/01	Восток	23.08.2001	11.3	—	—	7.6	0.65	4493	3231	4.4	3486	62	32	37
5	15/09	Восток	10.07.2009	10.6	—	-160	8.67	0.8	3904	3191	353	3011	43	41	16
5	15-20	Восток	09.07.2020	12.3	—	-10	7.21	<0.3	3863	3825	168	4236	71	64	37
6	9-1/09	Гнилая, озеро в центре вулкана	07.07.2009	—	—	—	—	0.7	2196	7943	—	—	—	—	—
6	63/01	Гнилая, южная группа	27.08.2001	13.2	—	—	9.46	2.2	2470	5999	19.5	4681	7.5	2.0	1.6
6	9-2/09БГ	Гнилая, центр вулкана, сальза рядом с озером	07.07.2009	12.9	—	—	—	1.6	2440	5815	24.0	4597	13.3	5.8	4.6
6	9-3/09	Гнилая, южная группа	07.07.2009	12.9	—	—	—	1.3	2562	5532	48.3	4755	5.8	6.1	3.3
6	2-20	Гнилая, южная группа сальз	05.07.2020	23.0	29.5	33	8.83	<0.3	4239	9509	183	9035	4.2	9.0	1.8
6	2-20-2	Гнилая северная	05.07.2020	13.1	—	-39	8.88	<0.3	2729	5258	20.0	5074	5.1	6.2	1.5
7	62/01	Миска	27.08.2001	11.6	—	—	7.81	0.48	2385	5290	27.6	3812	32	14	18
8	T-17-10-1	Курчанский (Дачный)	20.09.2017	16.2	30.4	—	8.7	—	5002	6028	14.5	5094	58	32	10.0
9	52/01	Поливадина	24.08.2001	12.0	—	—	8.12	0.65	4941	3372	6.2	3526	63	29	40
9	5/09	Поливадина	06.07.2009	—	—	—	—	0.3	4270	3191	—	—	—	—	—
9	8-20	Поливадина	07.07.2020	11.9	—	—	—	<0.3	4570	3308	13.1	3844	71	33	42

Таблица 2. Продолжение

№ на рис. 1	№ пробы	Название вулкана/ пункта опробования	Дата отбора	Сумма солей, г/л	T _{изм.} , °C	Eh, мВ	pH	F ⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁺ , мг/л	Na ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л
10	51/01	Бугазский	24.08.2001	13.1	—	—	8.1	0.73	6100	2947	15.6	3894	77	50	14.4
10	4-1/09	Бугазский	06.07.2009	12.9	20	154	7.94	0.3	6222	2624	35.5	3832	102	80	25
10	4-2/09	Бугазский	06.07.2009	14.5	23.2	318	8.27	0.3	6832	3050	64.4	4411	108	56	20
10	4-3/09	Бугазский	06.07.2009	13.9	—	-20	8.0	0.8	6100	3191	30.7	4409	78	36	10.2
10	7-20	Бугазский	07.07.2020	12.7	20	-26	7.85	<0.3	5683	2743	45.5	4119	68	48	11.3
11	1/09	Карabetова гора	02.07.2009	14.7	17.9	56	8.02	0.9	9248	1455	23.9	3819	63	55	21
11	53-1/01	Карabetова гора	24.08.2001	12.3	—	—	7.76	0.98	5505	3124	1.8	3607	21	21	33
11	9-20	Карabetова гора	07.07.2020	12.4	26.0	21	7.17	<0.3	7361	1244	<0.1	3634	45	53	21
12	6-1/09	Шалурский	06.07.2009	18.2	21.6	40	7.73	0.3	4270	5744	61.3	8013	53	30	15
12	6-2/09	Шалурский	06.07.2009	—	29.7	—	8.81	0.3	7930	9361	—	—	—	—	—
12	6-3/09	Шалурский	06.07.2009	—	27.2	—	8.52	0.4	6100	6808	—	—	—	—	—
12	6-4/09	Шалурский	06.07.2009	—	31.1	310	8.91	1.3	9028	12766	—	—	—	—	—
12	6-5/09	Шалурский	06.07.2009	—	—	—	—	0.6	4636	6383	—	—	—	—	—
12	54/01	Шалурский	25.08.2001	17.9	—	—	7.92	0.7	5490	6851.5	47.2	5420	34	25	17.4
12	18-20	Шалурский	10.07.2020	16.5	—	50	8.18	<0.3	4519	6086	24.7	5763	34	46	25
13	55/01	Южно-Нефтяной	25.08.2001	0.7	—	—	6.74	0.19	292.8	142	60.7	39	14.3	16.1	104
13	7/09	Южно-Нефтяной	06.07.2009	0.8	30.3	—	—	—	366	142	26.9	108	7.3	9.3	114
13	12-20	Южно-Нефтяной	08.07.2020	—	—	—	5.59	—	200	—	19.9	8	5.1	5.8	56
13	17-20	Ист. на восточном склоне Южно-Нефтяного	10.07.2020	25.1	23.0	14	6.8	<0.3	2755	12238	6.9	9756	139	99	74
14	8/09	Северно-Нефтяной	06.07.2009	—	—	—	—	—	2196	2979	—	—	—	—	—
14	16-20	Северно-Нефтяной	10.07.2020	15.5	—	—	—	<0.3	3574	6119	6.2	5659	53	26	16.0
15	5-20	Ахтановский	06.07.2020	—	—	—	—	<0.3	—	2521	—	3177	40.3	79.5	11.5
16	61/01	Сопка	27.08.2001	—	—	—	—	—	—	—	88.7	4924	60	22	9.0
16	11/09 БГ	Сопка	07.07.2009	9.0	25.5	40	8.84	1.0	1830	3050	1200	2903	10.9	12.8	9.7
16	3-20	Сопка	05.07.2020	32.8	—	-8	7.82	<0.3	8449	10286	2338	11623	98	36	15.4
17	60/01	Синяя балка (Тиздар)	27.08.2001	8.4	—	—	8.8	1.3	2684	3905	114	1727	3.4	11.5	3.4
18	56/01	Центральные Цимбалы	25.08.2001	—	—	—	—	—	—	—	3.9	4196	26	9.9	13
18	17/09	Центральные Цимбалы	11.07.2009	11.8	25.0	—	—	2.9	3294	4468	11.8	3903	34	31	31
18	17-1/09	Центральные Цимбалы	11.07.2009	12.2	23.0	-220	8.5	2.6	3782	3546	16.2	4707	74	11.7	30
19	16/09	Западные Цимбалы	11.07.2009	—	23.3	-80	8.1	0.8	4636	2695	—	—	—	—	—
19	T-17-16-8	Западные Цимбалы (вершина)	22.09.2017	—	—	—	—	—	—	—	209	4324	28	29	21
19	6-20	Западные Цимбалы	06.07.2020	11.4	—	24	7.53	<0.3	3680	3759	19.1	3733	52	67	48
20	59/01	Фонгаловский	26.08.2001	27.5	—	—	7.12	0.2	1360	16117	7.8	9696	167	66	118
21	57/01	Кучугурский	25.08.2001	25.6	—	—	7.15	0.53	1373	7952	7925	6900	873	22	554
21	13-1/09	Кучугурский	09.07.2009	15.3	—	—	—	0.6	3782	4964	1462	4814	116	30	173
21	13-2/09	Кучугурский	09.07.2009	—	—	—	—	0.4	1464	5035	—	—	—	—	—

Таблица 2. Продолжение

№ на рис. 1	№ пробы	Название вулкана/ пункта опробования	Дата отбора	Сумма солей, г/л	T изм., °C	Eh, mV	pH	F ⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁺ , мг/л	Na ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л
21	1-20	Кучугурский (боковая соль)	04.07.2020	8.4	20.0	—	—	<0.3	1144	2696	1508	2458	246	28	320
21	1-20-1	Кучугурский (H ₂ S источник)	04.07.2020	—	14.0	-100	7.01	<0.3	235	2601	—	—	—	—	—
21	T-17-4-3	Кучугурский, H ₂ S грифон у берега Азовского моря	20.09.2017	13.1	—	372	7.3	—	3660	4609	12.0	4615	82	32	56
22	58/01	Чушка (верхняя соль)	26.08.2001	10.9	—	—	7.6	0.72	3721	3656.5	7.7	3394	30	28	12.8
22	12/09	Чушка (верхняя соль)	09.07.2009	11.5	17.8	60	7.82	0.6	3050	4255	8.4	4122	33	31	30
22	12-1/09	Чушка (нижняя соль)	09.07.2009	10.9	18.2	100	7.81	0.6	3904	3262	<0.1	3599	36	25	35
22	4-20	Чушка (нижняя соль)	06.07.2020	11.2	21.4	20	7.37	<0.3	3731	3518	7.5	3808	37	34	28
Грязевые вулканы Керченского полуострова															
23	9-15	Еникальский	21.07.2015	11.5	26.7	30	8.5	1.0	3940	3475	667	3368	60	14	21
23	9-2-15	Еникальский, восточная соль	21.07.2015	11.3	21.5	277	7.6	0.6	6710	1433	2.6	2982	26	45	55
23	26-20	Еникальский, восточная соль	17.07.2020	11.2	—	265	7.29	<0.3	5719	1455	2.2	3867	26	41	47
23	208-17	Еникальский	17.09.2017	10.5	—	—	8.2	—	3904	3120	342	3111	51	8.4	10.5
23	208-1-17	Еникальский	17.09.2017	9.8	—	—	8.2	—	3904	2659	501	2578	110	29	28
23	E-17-4-4	Еникальский, небольшая соль	17.09.2017	9.3	—	—	7.9	—	1830	2836	284	4282	25	9.1	5.6
25	3-15	Ольденбургского, соль 1-1	20.07.2020	12.7	19.0	127	7.62	0.3	5124	3475	4.4	3907	34	79	52
25	202-1-17	Ольденбургского, соль 1	09.09.2017	17.4	—	—	8.2	—	6710	5319	<0.1	5306	23	45	14
25	202-2-17	Ольденбургского, соль 2	09.09.2017	13.5	—	—	8.0	—	5856	3368	<0.1	4097	35	66	56
25	202-3-17	Ольденбургского, соль 3	09.09.2017	13.1	—	—	8.0	—	5856	3191	<0.1	3855	36	64	50
25	202-4-17	Ольденбургского, соль 4	09.09.2017	18.7	—	—	8.1	—	7320	4964	46.6	6218	37	81	19
25	202-5-17	Ольденбургского, соль 5	09.09.2017	12.5	—	—	8.1	—	5490	3191	<0.1	3682	35	59	51
25	19-20	Ольденбургского, соль 1	12.07.2020	14.0	28	61	7.64	<0.3	4656	3396	24.6	5846	25	50	10
25	19-20-1	Ольденбургского, соль 2	12.07.2020	14.3	28	50	7.47	<0.3	5754	4158	4.4	4206	35	58	57
26	4-15	Сопка Андрусова боковая соль	20.07.2015	13.9	16.1	142	7.62	0.4	5612	3758	23.7	4376	29	44	56
26	203-17	Сопка Андрусова, боковая соль	09.09.2017	13.6	—	—	8.0	—	5978	3368	16.0	4112	27	32	49
26	22-20	Сопка Андрусова, боковая соль	12.07.2020	—	—	—	—	<0.3	5673	3749	20.5	4536	27	32	44
27	5-15	Бултанакская группа, сопка Бултанакская	20.07.2015	13.6	21.2	122	7.11	0.54	5246	3830	26.9	4336	36	85	56
27	B-17-5-1	Бултанакская группа, газифирующее озеро рядом с пересохшей кальдерой вулкана	05.09.2017	24.8	—	279	8.7	—	10370	6666	58.7	7498	84	111	19
27	201-17	Бултанакская группа, небольшая соль рядом с центральным озером	09.09.2017	38.0	—	—	8.3	—	12932	12552	111	12291	11	119	10
27	201-1-17	Бултанакская группа, центральное озеро	09.09.2017	69.1	—	—	8.4	—	7564	55141	49.0	6187	26	74	25

Таблица 2. Продолжение

№ на рис. 1	№ пробы	Название вулкана/ пункта опробования	Дата отбора	Сумма солей, г/л	T _{изм.} , °C	Eh, мВ	pH	F ⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁺ , мг/л	Na ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л
27	21-20	Центральное озеро (Булганакская группа)	12.07.2020	13.2	26	28	6.7	<0.3	5174	3649	14.7	4220	22	70	61
27	В-17-4-5	Пересыхающий водоток рядом с Центральным озером (Булганакская группа)	05.09.2017	20.2	—	244	9.5	—	6344	6028	1338	6465	7.9	41	10.7
28	20-20	Сопка Павлова (озеро)	12.07.2020	—	23.0	28	6.73	—	6100	—	53.9	4401	34	64	43
29	Tish-17-5-9	Сопка Тищенко, H ₂ S грифон	16.09.2017	10.1	20.3	-90	8.6	—	—	—	1998	7836	164	56	32
30	8-15	Тарханский	21.07.2015	24.5	24.0	33	7.9	0.1	9150	7446	31.8	7541	164	112	22
31	7-15	Большой Тарханский вулкан, гл. выход (1) — травертиновый	20.07.2015	—	—	—	—	—	—	—	1.9	4328	54	136	177
31	204-17	Большой Тарханский вулкан, гл. выход (1) — травертиновый	11.09.2017	13.0	—	—	7.8	—	4270	4609	<0.1	3937	51	110	22
31	28-20	Большой Тарханский вулкан, гл. выход (1) — травертиновый	16.07.2020	—	—	234	7.13	<0.3	3935	4531	—	4488	52	115	72
31	204-1-17	Большой Тарханский, 2-ой выход	11.09.2017	16.1	—	—	7.8	—	5368	5319	—	5076	59	139	93
31	204-2-17	Большой Тарханский, 3-ий выход	11.09.2017	12.5	—	—	7.6	—	4270	4255	—	3633	57	106	216
31	204-3-17	Большой Тарханский, 4-ый выход у склона долины	11.09.2017	17.3	—	—	8.1	—	5490	6028	—	5568	61	163	28
31	28-20-1	Большой Тарханский сольза на солончаке	16.07.2020	—	—	157	6.68	<0.3	4290	4551	—	4411	54	116	218
32	17-15	Солдатско-Слободской	24.07.2015	9.5	24.5	65	8.5	0.34	2928	4184	4.2	2283	21	13	20
32	SS-17-1-6	Солдатско-Слободской	08.09.2017	10.0	23.4	—	8.1	—	3050	3900	—	3072	12.6	9.2	4.4
32	SS-17-3-4	Солдатско-Слободской	08.09.2017	9.9	23.0	—	8.0	—	3050	3900	24.2	2881	21	11.7	6.9
32	25-20	Солдатско-Слободской	15.07.2020	—	—	-4	8.52	<0.3	3029	3870	36.5	3992	24	12.7	7.5
33	19-15	Чонгеленский (Тобечик), грязевой вулкан	25.07.2015	15.0	20.5	35	7.82	0.6	4270	6170	58.2	4348	52	67	32
33	205-17	Чонгеленский (Тобечик), грязевой вулкан	12.09.2017	14.1	27.2	—	7.9	—	4148	5319	14.1	4529	43	41	24
34	19-1-15	Чонгеленский (Тобечик), нефтяной источник	26.07.2015	69.2	—	—	7.5	0.1	5978	41346	2565	17002	1585	558	141
34	205-1-17	Чонгеленский (Тобечик), нефтяной источник	12.09.2017	64.9	—	—	7.6	—	3660	35708	350	22860	1669	582	87
34	23-20	Чонгеленский (Тобечик), нефтяной источник	14.07.2020	—	—	-151	7.63	<0.3	3685	38850	560	25166	1595	637	52
35	16-15	Бурашский	24.07.2015	10.9	23.0	435	7.9	0.6	1708	5815	64.4	3216	52	34	45
35	34-20	Бурашский	18.07.2020	—	—	88	8.0	<0.3	1926	7683	4.4	5471	70	38	37

Таблица 2. Окончание

№ на рис. 1	№ пробы	Название вулкана/ пункта опробования	Дата отбора	Сумма солей, г/л	T _{изм.} , °С	Eh, мВ	pH	F ⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	SO ₄ ²⁺ , мг/л	Na ⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	K ⁺ , мг/л	Ca ²⁺ , мг/л
36	1-3-15	Сююрташский, сероводородный источник	19.07.2015	22.8	13.0	-29	7.0	—	2562	2	14841	5032	161	81	111
37	20-15	Урочище Борух-Оба (старая газирующая скважина)	26.07.2015	6.9	25.2	23	8.48	3.1	3721	1418	12.8	1735	2.5	9.5	5.9
37	33-20	Урочище Борух-Оба (старая газирующая скважина)	14.07.2020	6.2	—	-93	8.56	<0.3	2948	1229	3.2	2032	2.1	9.6	5.3
38	21-15	Борух-Оба	26.07.2015	14.0	22.7	86	8.38	1.3	7808	1773	224	4184	10.2	14.1	6.1
38	32-20	Борух-Оба	17.07.2020	17.3	—	—	9.22	<0.3	6628	3736	1026	5906	8.0	12.8	5.3
39	23-15	ист. Сеит-Эли	26.07.2015	9.4	26.8	215	7.63	1	4514	1872	141	2595	77	111	123
40	13-15	Королёвский (озеро у подножья Королёвской сопки)	23.07.2015	35.4	14.8	150	7.7	<0.1	2684	21205	23.1	10928	188	214	198
40	Кг-17-6-1	Королёвский (озеро у подножья Королёвской сопки)	06.09.2017	42.6	22.7	275	8.1	—	2928	21985	—	16949	246	260	188
40	29-20	Королёвский (озеро у подножья Королёвской сопки)	17.07.2020	21.2	—	195	6.29	<0.3	1504	11291	—	7726	122	126	423
41	11-15	Насырский	23.07.2015	15.3	23.9	59	7.65	0.2	2562	7446	31.8	5057	71	32	68
41	30-20	Насырский	17.07.2020	16.4	—	—	—	<0.3	2648	7227	12.3	6362	75	28	63
42	10-15	Арма-Эли, боковая сальза	22.07.2015	12.4	19.6	146	8.4	0.3	2440	5886	14.2	3914	37	29	39
42	31-20	Арма-Эли, боковая сальза	17.07.2020	16.6	—	217	8.82	<0.3	2846	7743	5.6	5900	40	26	14
43	206-17	Владиславовский	15.09.2017	11.8	—	—	7.7	—	1830	6028	—	3803	34	25	68
43	35-20	Владиславовский	20.07.2020	11.9	—	55	7.15	<0.3	1916	5739	—	4188	30	17.2	57
Поверхностные воды Таманского полуострова															
	10р/09	озеро на в. Миска	07.07.2009	3.7	—	—	—	0.4	4.2	620	1959	793	163	13	128
	12/09 БГ	Лиман, рядом с в. Чушка	09.07.2009	—	—	—	—	0.5	220	11220	—	—	—	—	—
	4-20р	Лиман, рядом с в. Чушка	06.06.2020	25.5	31.5	218	8.33	<0.3	275	13782	1928	7801	1080	303	344
	16/09р	Озеро на в. Западные Цимбалы	11.07.2009	—	—	—	—	0.9	512	2312	—	—	—	—	—
Поверхностные воды и источники Керченского полуострова															
	б. н.	Темрюк, вода из водопровода	22.09.2017	—	—	—	7.0	—	305	78	—	—	—	—	—
	б. н.	с. Войково, скв., глубина 400м	24.09.2017	—	—	—	7.4	—	370	234	—	—	—	—	—
44	12-15	Мыс Казантип, нефтяная скважина	23.07.2015	191.1	—	—	11.7	0.2	2928	93614	9879	25583	<0.1	58127	945
	24-15	Азовское море	23.07.2015	13.3	—	—	7.9	0.4	122	7304	1105	3898	479	151	215
	25-15	База с. Золотое, скв.	27.07.2015	2.1	—	—	7.8	0.2	305	851	443	251	107	27	84
	10-20-1р	Дождь в р-не Шапугского вулкана	08.07.2020	—	—	—	—	<0.3	40	796	—	—	—	—	—
	2-15	Сероводородный источник	19.07.2015	—	18.3	-110	7.4	<0.1	610	15035	6486	8360	503	148	464

Примечание. Прочерк — измерение не проводилось, н.о. — не обнаружено.

построек. Поэтому мы считаем, что для свежей пульпы характерны значения E_h более узкого диапазона — от ~ -50 до $\sim +150$ мВ.

Минерализация вод (сумма солей) в исследуемых водопроявлениях варьирует от 0.7 до 65 г/л. Однако общий диапазон замеренных величин не дает объективного представления об истинных значениях минерализации грязевулканических вод. Самые высокие значения (>20 г/л) отмечаются в крупных грязевулканических озерах (диаметром от 3–5 до 15–20 м) с ограниченным стоком, в сальзах со стоячей водой или на вулканах, расположенных в понижениях рельефа, где на поверхности образуются солончаки. Очевидно, что в условиях засушливого климата солевой состав таких водопроявлений в различной мере искажен процессами упаривания воды (все пробы отбирались в летне-осенний период). Такие искажения солевого состава вод неоднократно фиксировались нами в отдельных сальзах на вулканах Тобечик, Тарханский, Королёвский, Булганакский, Гладковский, Шуго и Фонталовский (см. табл. 2).

Аномально низкие значения минерализации (0.7–0.8 г/л) были отмечены только для вод Южно-Нефтяного вулкана. Они воспроизводились в 1994, 2001 и 2009 гг. (см. табл. 2), и из этого следует, что минерализация вод этого вулкана не искажена случайной примесью атмосферных осадков. Поскольку для этого объекта характерно бурное выделение газа и нефти при отсутствии глинистой пульпы, он скорее напоминает малолетний минеральный источник. Вероятно, в его водном балансе участвуют конденсационные воды газовой залежи, или поток газа поднимает к поверхности воды пресного грунтового горизонта.

Таким образом, без учета сильно “искаженных” значений, минерализация вод, изливаемых грязевыми вулканами Керченско-Таманской области, характеризуется величинами от 5 до 20 г/л ($\text{Min}_{\text{средн}} = 12.6 \pm 3.5$ г/л; $n = 78$).

Для грязевулканических вод региона типичны низкие концентрации сульфат-иона, которые, как правило, не превышают первых десятков мг/л и достигают 350 мг/л только в отдельных вулканах (см. табл. 2). Более высокие концентрации (до 1.5–14 г/л) характерны для сероводородных источников, иногда встречающихся на периферии вулканов, а также для отдельных бессточных сальз. Поэтому мы считаем, что присутствие сульфат-иона является признаком подмешивания вод, генетически не связанных с грязевулканическими системами (поверхностных или грунтовых вод из зоны гипергенеза).

В анионном составе вод доминируют ионы HCO_3^- и Cl^- (см. табл. 2п, Приложение 2). Доля HCO_3^- варьирует от 14 до 79 мг-экв. %, составляя

в среднем 39 мг-экв. %. Таким образом, по составу анионов большинство исследуемых вод относится к Cl-HCO_3^- или $\text{HCO}_3^- \text{Cl}^-$ -типу. Исключения составляют воды вулканов Гладковский и Шапсугский (Таманский полуостров), в которых доля хлоридов достигает 95–99 мг-экв. %. Такой же высокой долей хлор-иона (93–94 мг-экв. %) характеризуются воды вулканов Королёвский и Тобечик, подвергшиеся упариванию на поверхности.

В абсолютном выражении концентрация HCO_3^- изменяется от 0.2 до 12.9 г/л. Минимальные концентрации (0.2–0.6 г/л) характерны только для двух вулканов — Гладковского и Южно-Нефтяного (Тамань) (см. табл. 2). Максимальная концентрация HCO_3^- (12.9 г/л) обнаружена нами в небольшой сальзе со стоячей водой, располагающейся у восточного берега Центрального озера Булганакской группы вулканов. В этом случае можно предполагать инсоляционное концентрирование иона HCO_3^- , что подтверждается присутствием троны $(\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ в составе высолов на высохшей глине из этого вулкана. Таким образом, после исключения экстремальных значений, диапазон концентраций HCO_3^- в грязевулканических водах региона существенно сужается — до 1.4...9.2 г/л ($\text{HCO}_3^-_{\text{cp}} = 4.5 \pm 1.8$ г/л; $n = 82$).

Для основной выборки какая-либо зависимость между концентрациями ионов HCO_3^- и Cl^- не обнаруживается (рис. 2), что указывает на отсутствие влияния процессов концентрирования и/или разбавления на солевой состав вод. На рисунке видно, что только фигуративные точки пяти вулканов образуют линейный тренд. Очевидно, он отражает процессы поверхностного концентрирования и/или смешения вод разного генезиса. Например, в формировании солевого состава вод, как минимум, двух вулканов (Тобечика и Королёвского) помимо собственно грязевулканических явно участвуют и посторонние воды — морские или грунтовые, подвергшиеся существенному упариванию.

Следует отметить, что процессы упаривания или смешения грязевулканических вод с водами иного происхождения далеко не всегда проявляются в виде прямых зависимостей между концентрациями ионов HCO_3^- и Cl^- , вариации которых исследовались в водах разных сальз одного и того же вулкана (рис. 3). На некоторых вулканах Тамани (Гладковский, Семигорский, Гнилая) зависимость между концентрациями этих ионов обратная или отсутствует. Очевидно, что помимо процессов концентрирования, смешения, разбавления на состав таких вод дополнительно влияют про-

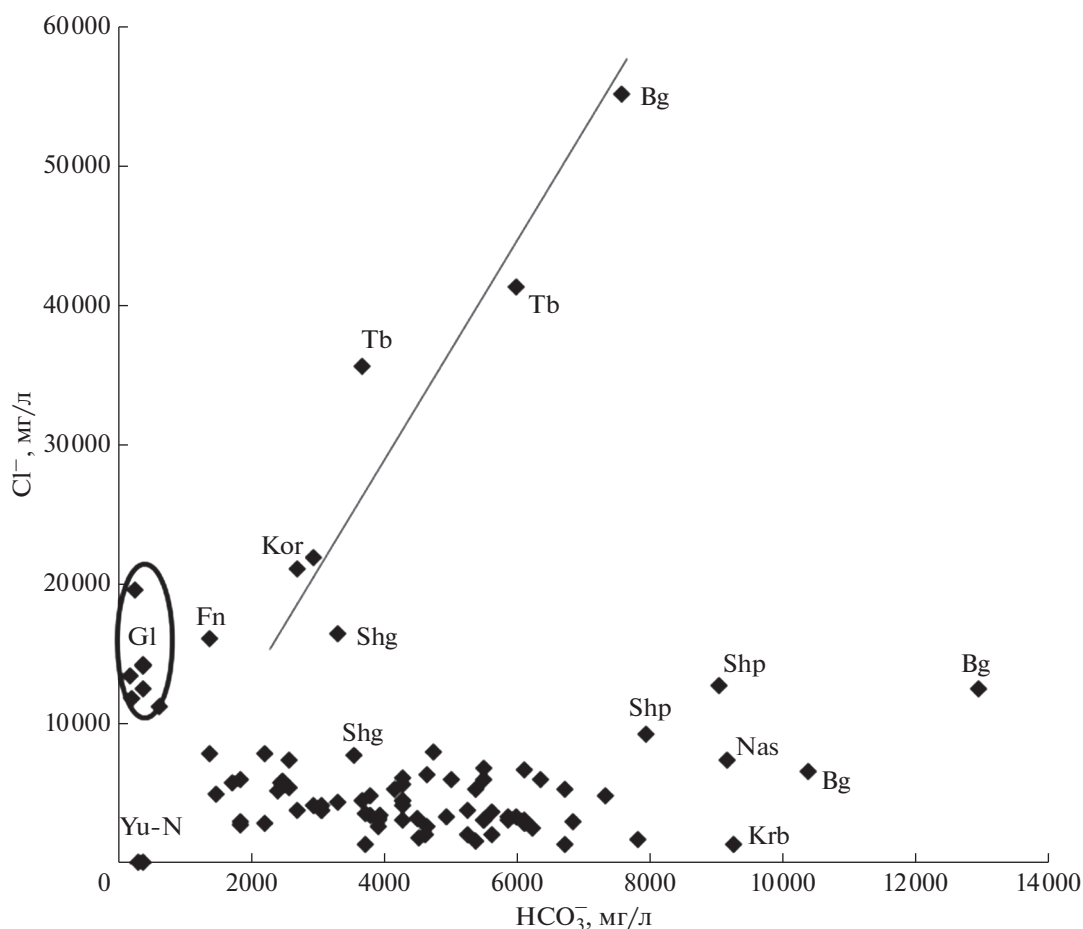


Рис. 2. Соотношение концентраций ионов HCO_3^- и Cl^- в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской грязевулканической области.

Прямой линией показана тенденция к зависимости изменения концентраций, овальным контуром обозначены точки вулкана Гладковский.

Индексы – названия вулканов: Булганакский (Bg), Гладковский (Gl), Караетовский (Krb), Королёвский (Kor), Насырский (Nas), Тобечик (Tb), Фонталовский (Fn), Шапурский (Shp), Шуго (Shg), Южно-Нефтяной (Yu-N).

цессы осаждения–растворения водных Na-Ca карбонатов и троны, обладающих высокой растворимостью [Sokol et al., 2019].

Среди катионов, как правило, доминирует Na^+ (90–99 мг-экв. %) (см. табл. 2п, Приложение 2). Повышение доли Ca^{2+} или Mg^{2+} в катионном составе характерно для сероводородных источников и вод периферических сальз отдельных вулканов (Кучугурского, Южно-Нефтяного и Тобечика), очевидно, имеющих субповерхностное происхождение.

Концентрация Ca^{2+} в большинстве вод не превышает 50 мг/л. Рост концентрации этого иона (от 100 до 240 мг/л) отмечен в вулканах Южно-Нефтяной, Фонталовский, Большой Тарханский, Королёвский и Тобечик (см. табл. 2). Все они или отличаются от остальных исследованных объектов аномально высокой или низкой мине-

рализацией воды, или являются травертинообразующими (Большой Тарханский и Королёвский). От всех исследованных нами грязевулканических вод Керченско-Таманской области по концентрации Ca^{2+} , достигающей 1.3–1.5 г/л, сильно отличается только вода вулкана Гладковский.

В целом большинство исследованных проб грязевулканических вод Керченско-Таманской по макрокомпонентному составу относится к Cl-HCO₃-Na или HCO₃-Cl-Na химическим типам (см. табл. 2п, Приложение 2). Особое место занимает вода вулкана Гладковский, которая относится к Cl-Na-Ca типу и характеризуется минерализацией, достигающей 19–30 г/л.

Другой особенностью грязевулканических вод данного региона является их обогащение В, Br, I, Li и некоторыми другими микрокомпонентами (см. табл. 1п, Приложение 1).

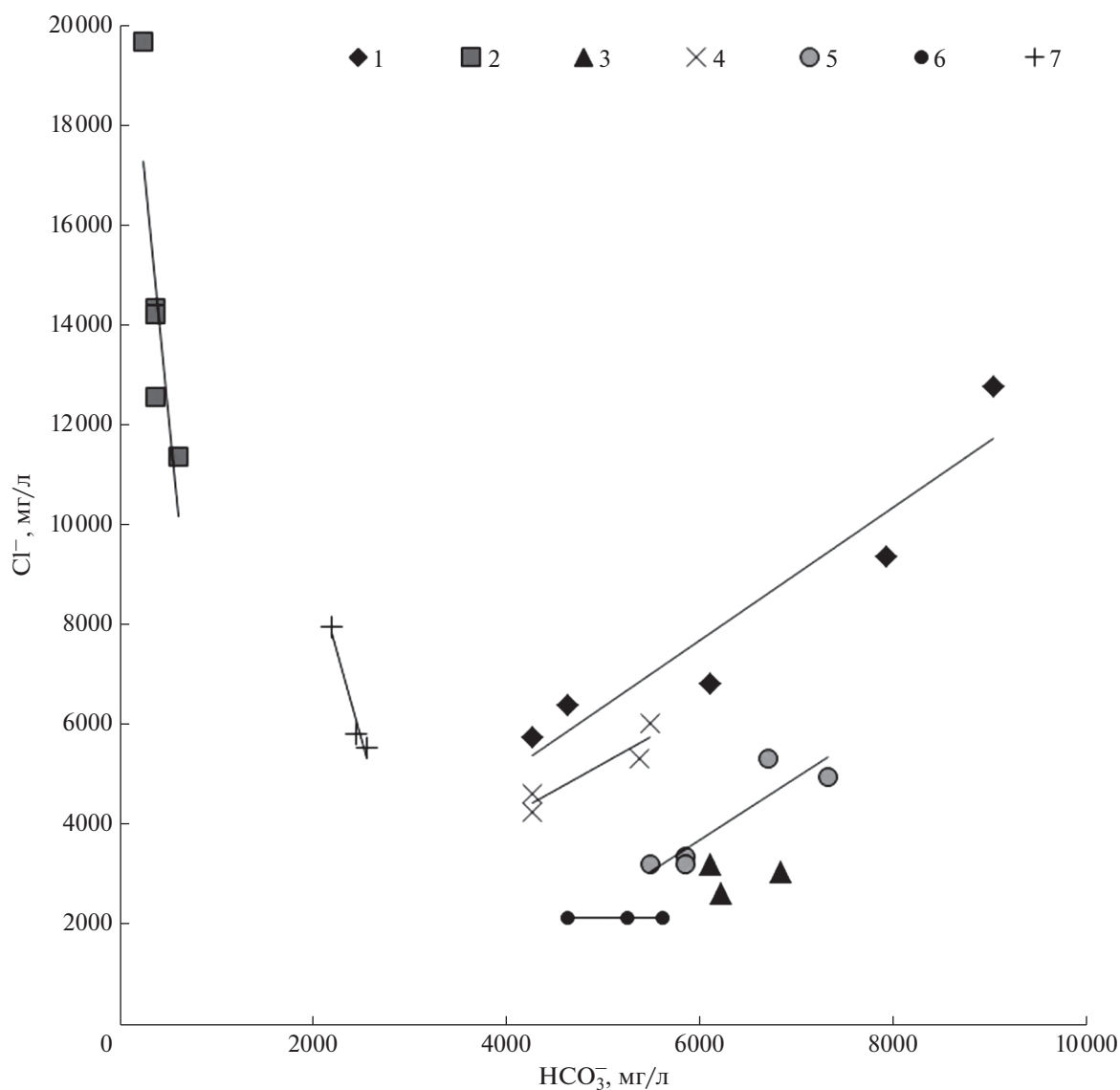


Рис. 3. Соотношение концентраций ионов HCO_3^- и Cl^- в водах разных сальз, расположенных в пределах одного вулкана.

1–7 – вулканы: 1 – Шапурский, 2 – Гладковский, 3 – Бугазский, 4 – Большой Тарханский, 5 – Ольденбургского, 6 – Семигорский, 7 – Гнилая; линиями показаны тренды изменения концентраций для групп точек.

Содержание бора в грязевулканических водах Керченско-Таманской области изменяется от 0.6 мг/л до 1.64 г/л, составляя в среднем 310 мг/л. Самая низкая концентрация В была отмечена в маломинерализованной воде из Южно-Нефтяного вулкана, а самая высокая – в воде из небольшой бессточной сальзы, расположенной около Булганакского озера. Аномальная концентрация бора имеет здесь явно вторичное происхождение, а грунты на этом вулкане содержат водные бораты Na и Ca-Na [Sokol et al., 2019]. Таким образом, содержание бора в грязевулканических водах региона зачастую существенно выше его концентрации в морской воде (4.6 мг/л) [Хорн, 1972]). Коэффици-

циент концентрирования бора² в грязевулканических водах (относительно морской воды) варьирует от 3 до 2100, при среднем значении $K_{B\text{ср}} = 311$. В водах Керченско-Таманской области, так же как и в водах грязевых вулканов Азербайджана [Лаврушин и др., 2015], существует положительная корреляция между концентрациями бора и

² Здесь и далее коэффициенты концентрирования бора и других элементов рассчитывались как отношение величины концентрации элемента к концентрации хлор-иона в пробе, нормированное на аналогичное отношение в океанической воде ($K_B = (B/Cl)/(B_M/Cl_M)$). Величины концентрации ионов в морской воде заимствованы из работы [Хорн, 1972].

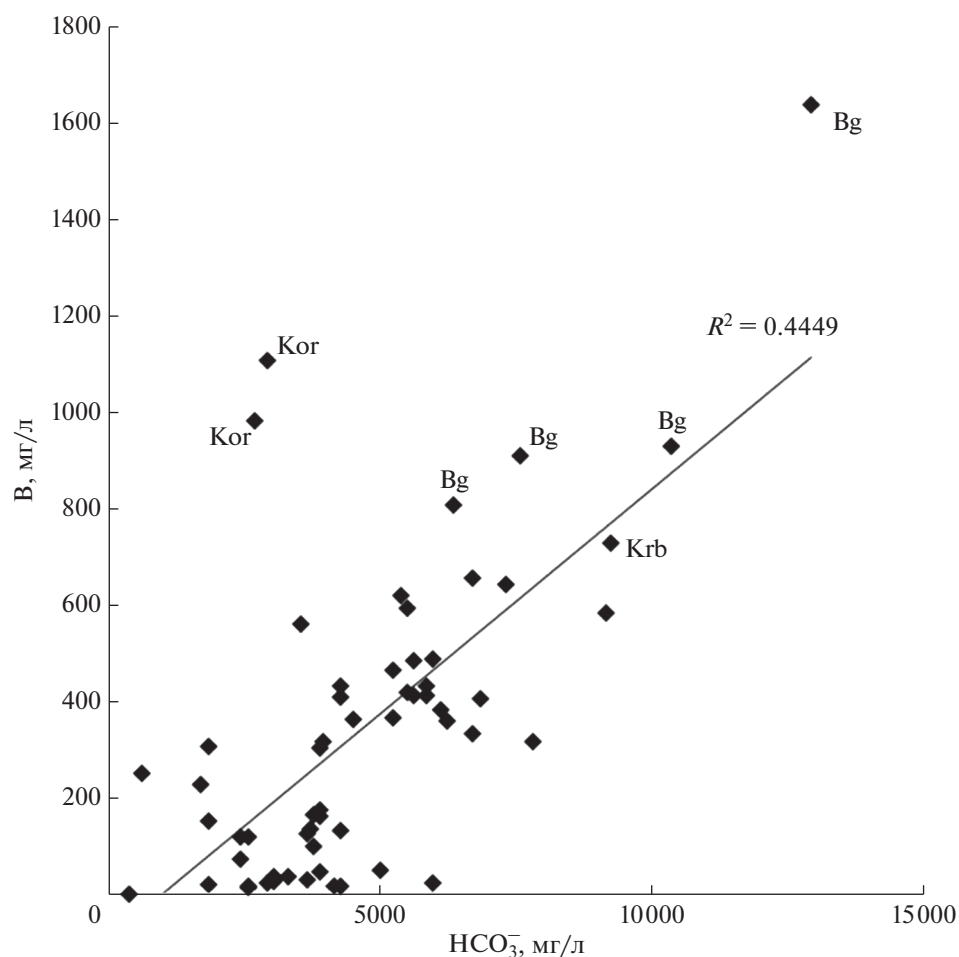


Рис. 4. Соотношение концентраций HCO_3^- и бора в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской области. Прямой линией показан тренд зависимости изменения концентраций. Индексы – названия вулканов: Булганакский (Bg), Карабетовский (Krb), Королёвский (Kor).

иона HCO_3^- (рис. 4). При этом корреляция между концентрациями бора и Cl^- -иона отсутствует.

Грязевулканические воды региона заметно обогащены Li и Bг, однако коэффициенты концентрирования этих элементов ниже, чем для B, изменяясь: для Li – от 2 до 185 для ($K_{\text{Li ср}} = 50$ относительно морской воды) и для Bг – от 1.4 до 5.3 ($K_{\text{Bг ср}} = 2.2$). Концентрации Rb и Cs в водах исследованных вулканов резко различны. Они изменяются от 0.4 до 720 мкг/л и от 0.02 до 578 мкг/л, соответственно, и характеризуются прямой корреляцией друг с другом, а также с Li и K. В водах большинства вулканов концентрация Rb не превышает 50 мкг/л. Только в отдельных вулканах (Гладковский, Королёвский, Большой Тарханский, Сеит-Эли) она оказывается существенно выше (до 300–720 мкг/л) (см. табл. 1п, Приложение 1). Причем в этих же водах отмечаются и самые высокие концентрации Cs (до 20–578 мкг/л).

Другой особенностью грязевулканических вод является их сильное обогащение барием (K_{Ba} от 5 до 3800, $K_{\text{Ba ср}} = 422$). Концентрация Ba в них варьирует от 0.04 до 21 мг/л и связана обратной корреляцией с содержанием сульфат-иона, тогда как корреляции с HCO_3^- не наблюдается. Таким образом, степень концентрирования бария в грязевулканических водах выше, чем у бора. Сохранению высоких концентраций Ba, вероятно, способствует почти полное отсутствие сульфат-иона, способного осадить его в виде барита.

Содержание Sг в исследованных водах также широко варьирует – от 0.1 до 42 мг/л. Наиболее высокие его концентрации характерны для хлоридных вод (Cl-Na и Cl-Na-Ca-типы) вулканов Гладковского, Королёвского и Тобечик (см. табл. 1п и 2п, Приложение 1 и 2). На прочих объектах, с ростом концентрации HCO_3^- в воде содержание Sг резко снижается, регулируясь, очевидно, карбонатным равновесием. Следует отметить, что

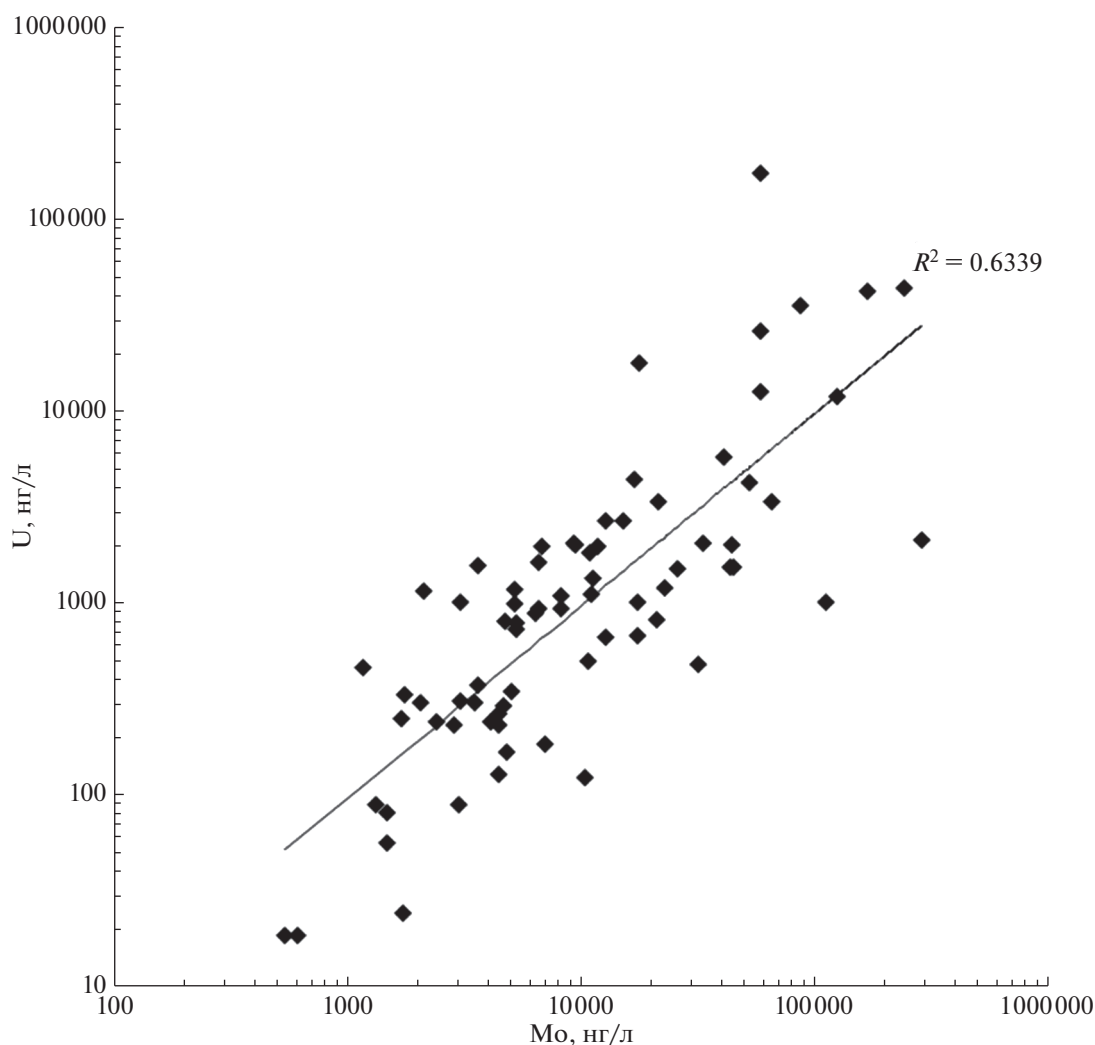


Рис. 5. Соотношение концентраций урана и молибдена в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской области. Прямой линией показан тренд зависимости изменения концентраций.

помимо вод Cl-Na типа, повышенные концентрации Sr характерны для вулканов, располагающихся в предгорьях Большого Кавказа (Семигорский и Шуго). В целом концентрирование Sr в водах большинства вулканов региона незначительное или наблюдается его дефицит (K_{Sr} от 0.1 до 2). Исключение составляют воды вулканов Гладковского, Шуго, Семигорского, Королёвского, Ольденбургского, где величина K_{Sr} достигает ~5–9.

Концентрация F^- в грязевулканических водах изменяется от 0.1 до 2.9 мг/л. Более высокие концентрации этого иона характерны для вод со слабощелочными значениями pH (>8.2) и низким содержанием Cl-иона (см. табл. 2). Для вод с высокими концентрациями F^- , как правило, характерны также и высокие концентрации иона HCO_3^- .

Среди особенностей грязевулканических вод региона следует также отметить достаточно отчетливо проявленную зависимость между величинами концентраций Mo и U (рис. 5), которая отражает накопление этих элементов в растворе в восстановительных обстановках (при отрицательных значениях Eh).

Вариации состава вод в пределах вулканической постройки

Пробы вод, отобранных в 2017 и 2020 гг. из различных сальз вулканов Ольденбургского и Большой Тарханский, заметно различались по содержанию солей (см. табл. 2 и 1п, Приложение 1). Например, на в. Ольденбургского вода из постоянно действующих сальз, располагающихся в его северной части (сальзы № 3 и 5), характеризовалась минерализацией 12.5–13.1 г/л, а в южной ча-

сти (сальза № 1) – достигала 17.4 г/л. Самая высокая концентрация солей (18.7 г/л) была зафиксирована в восточной части вулкана (сальза № 4), что, однако, могло быть следствием естественного упаривания воды. Эта сальза находилась на периферии вулкана – в области застоя вод, куда частично стекала вода и из других сальз. Только в этой сальзе было обнаружено высокое содержание серы – продукта окисления сульфидов.

На Большом Тарханском вулкане также отмечаются заметные вариации солевого состава вод (см. табл. 2 и 1п, Приложение 1). Травертинообразующие сальзы, расположенные на южной и северной периферии вулкана, изливают воду с пониженными концентрациями солей (12.6–13.0 г/л, сальзы № 1 и 3)). В то же время сальзы, располагающиеся в пределах засоленного понижения в центральной части вулкана, изливают воду с более высокой минерализацией – 16.1 и 17.4 г/л (сальзы № 2 и 4), но осаднения травертинов в этих сальзах не происходит.

На обоих вулканах концентрации основных компонентов солевой нагрузки (HCO_3 , Cl, Br, Na, Li) растут одновременно с ростом общей минерализации воды (см. табл. 2 и 1п, Приложение 1). Однако на этом фоне отмечается снижение концентраций двухвалентных катионов, а также Cs и Rb. Такие закономерности изменения химического состава воды, вероятно, можно связывать с процессами упаривания воды на поверхности вулкана. При этом концентрации HCO_3 , Cl, Br, Na, Li в воде растут, а концентрации ионов щелочноземельных металлов снижаются. Последнее является следствием роста концентрации иона HCO_3^- , который через карбонатное равновесие регулирует уровень содержания в растворе Ca, Mg, Sr и Ba.

В целом, даже с учетом возможного влияния испарения, основные гидрохимические характеристики вод, полученные по другим вулканам Керченского и Таманского полуостровов в разные годы, демонстрируют достаточно высокую стабильность (см. табл. 2).

Геотермические условия формирования грязевулканических вод

Все грязевые вулканы в спокойные этапы своей деятельности вследствие медленного истечения флюидов характеризуются низкими измеренными температурами воды, которые сильно искажаются на поверхности земли сезонными вариациями температуры. Поэтому летом в бессточных сальзах измеренные температуры воды могут достигать 30°C и более. При этом в активно изливающих воду сальзах температура воды на глубине первых метров может быть на 10–15°C ниже. Поэтому измеренные температуры (см.

табл. 2) не вполне отражают геотермические условия грязевулканических резервуаров на глубине.

Оценить температуры формирования вод можно лишь опосредованно, используя гидрохимические геотермометры (Mg-Li, Li-Na, Na-K, Si, Mg-K и др.). Для грязевулканических систем Таманского и Керченского полуостровов такие исследования ранее проводились [Лаврушин и др., 2003; Ершов, Левин, 2016; Sokol et al., 2019; Kikvadze et al., 2020]. Оценки глубинных температур, полученные по разным геотермометрам, показали близкие результаты. Тем не менее, в практике наших исследований мы отдавали предпочтение Mg-Li геотермометру [Kharaka, Mariner, 1989].

По данным опробования 2020 г., значения $t(\text{Mg-Li})$ температур формирования грязевулканических вод изменяются от 22 до 134°C (до 160°C – по результатам опробования в предыдущие годы) (см. табл. 1). Минимальным значением $t(\text{Mg-Li}) = 22^\circ\text{C}$ характеризуется вода из Южно-Нефтяного вулкана, а максимальными – $t(\text{Mg-Li}) = 130$ –134°C – воды вулканов Гладковского (130°C), Шуго (134°C) и Королёвского (132°C). При этом воды из вулканов Южно-Нефтяного, Тобечик и боковой сальзы Кучугурского имеют явные признаки подмешивания поверхностных вод (см. выше). На основании данных многолетних наблюдений, для грязевулканических систем Керченско-Таманской области можно принять диапазон температур формирования от 40 до 134°C, при средней величине $t(\text{Mg-Li})_{\text{cp}} = 91 \pm 25^\circ\text{C}$ ($n = 34$).

Необходимо отметить, что полученные ранее по Mg-Li геотермометру температуры в диапазоне 120–160°C [Лаврушин и др., 2003; Kikvadze et al., 2020] могли быть завышены вследствие влияния внешних факторов. Например, температуры 157–160°C были получены в пробах воды, отобранных из упаренных на солнце водоемов, которые располагались в пределах вулканов Булганакской группы (периферия Центрального озера и боковая сальза, отбор 2017 г.) и Королёвского вулкана (отборы 2015 и 2017 гг.). По результатам повторного отбора, выполненного в 2020 г. непосредственно из выходов интенсивного выделения глубинных вод, для них были получены более низкие значения Mg-Li температур – 120 и 132°C соответственно.

Кроме того, исследования состава вод, одновременно отобранных из различных сальз вулканов Ольденбургского и Большой Тарханский, показали (рис. 6), что упаривание грязевулканических вод на поверхности земли примерно на 35–40% по отношению к их минимальной минерализации, наблюдаемой на этих постройках, влечет за собой рост расчетных значений $t(\text{Mg-Li})$ примерно на 10°C. Таким образом, процессы испарения воды на поверхности земли могут приве-

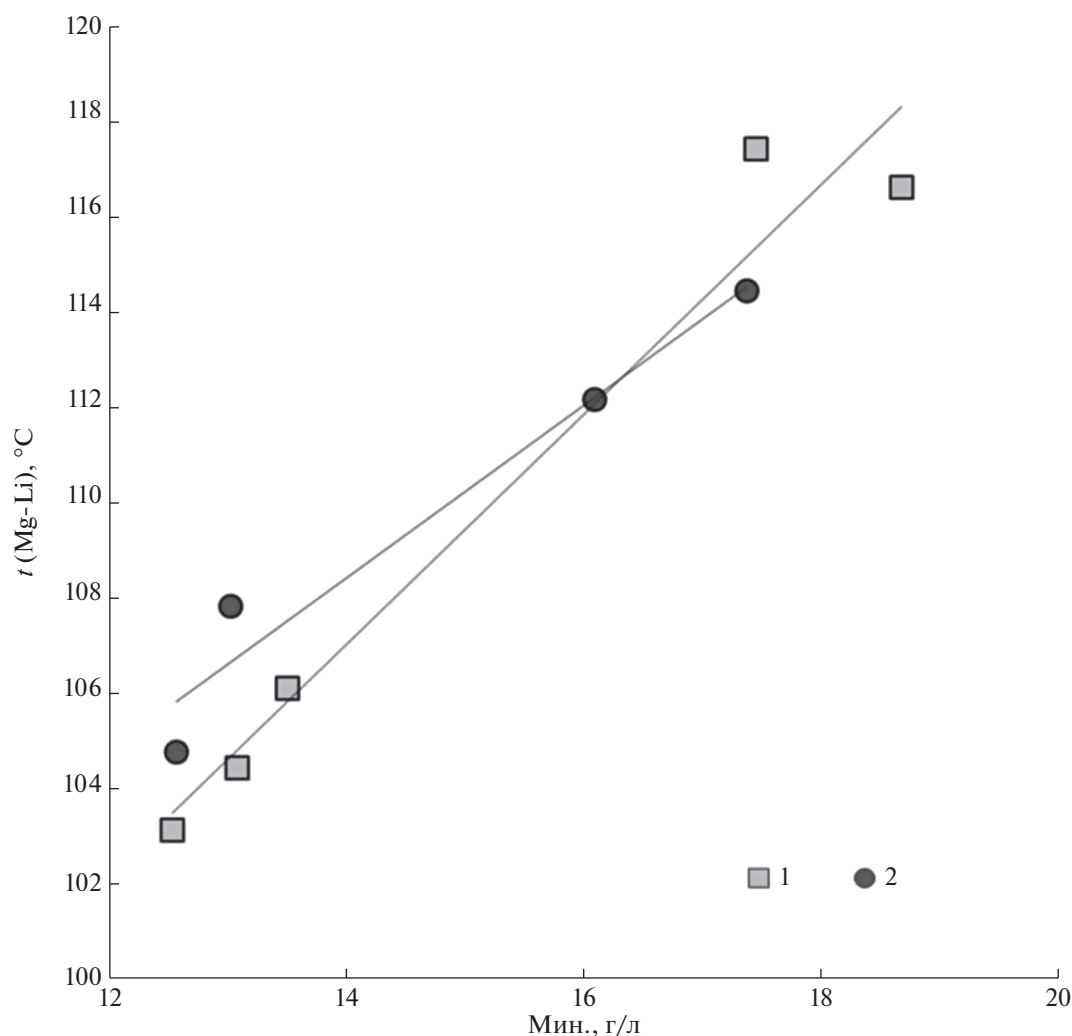


Рис. 6. Зависимость расчетных температур флюидогенерации ($T_{Mg/Li}$) от минерализации в пробах вод, отобранных из различных салз грязевых вулканов Ольденбургского (1) и Большой Тарханский (2). Прямыми линиями показаны тренды зависимости.

сти к существенному (в нашем случае до 25%) завышению значений расчетных температур.

В противоположность рассмотренным выше случаям, высокие значения $t(Mg-Li)$ — 128–138°C, полученные для вод вулканов Гладковский и Шуго, систематически воспроизводились при опробованиях в 2001, 2009, 2020 гг. Наиболее ярко эта особенность проявлена для вулкана Гладковский — единственного вулкана Керченско-Таманской области, изливающего воды Cl-Na-Ca-типа. Мы предполагаем, что в водном балансе этих вулканов могли участвовать более древние воды, например, из мезозойских водоносных комплексов. Вопрос о том, отражают ли в данном случае величины $t(Mg-Li)$ реальную температуру в грязевулканическом резервуаре или она является завышенной вследствие внедрения в грязевулканическую систему вод глубокой циркуляции, остается открытым. Вулканы Гладковский и Шу-

го расположены ближе всего к предгорьям Большого Кавказа. Для этого района характерно широкое развитие надвиговых структур [Попков, 2001, 2006], поэтому источником древних вод (с завышенными $t(Mg-Li)$) могут быть пластины мезозойских пород, надвинутые на майкопские отложения.

Изотопные характеристики O и H грязевулканических вод

Известно, что изотопные характеристики O и H вод грязевых вулканов Кавказского региона существенно отличаются от характеристик местных атмосферных осадков и морской воды [Валяев и др., 1985; Селецкий, 1991; Лаврушин и др., 2005, 2015]. Вследствие более высоких содержаний тяжелого изотопа кислорода (^{18}O), фигуративные точки грязевулканических вод существенно от-

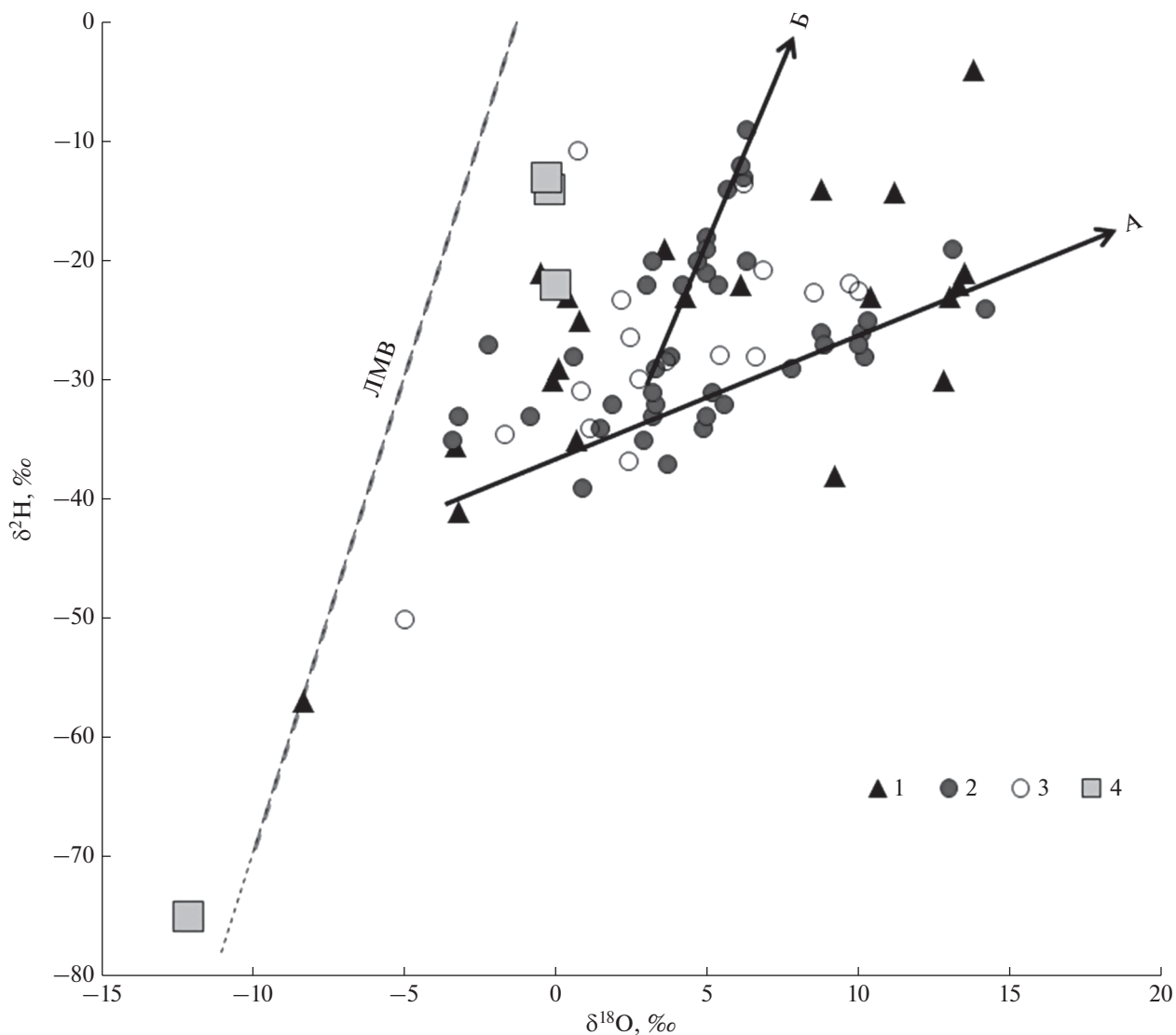


Рис. 7. Изотопный состав О и Н в грязевулканических и поверхностных водах Керченско-Таманской области. 1 – грязевулканические воды Керченского полуострова; 2, 3 – грязевулканические воды Таманского полуострова (2 – отбор 2009 г., 3 – отбор 2001 г. по [Лаврушин и др., 2005]); 4 – поверхностные воды; ЛМВ – глобальная линия метеорных вод; А–Б тренды изменения изотопного состава грязевулканических вод: в результате процессов взаимодействия в системе “вода–порода” (А) и в результате испарения на поверхности земли (Б).

клоняются от глобальной линии метеорных вод (линии Крейга) (рис. 7).

Новый массив данных ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$), полученных нами, в целом подтверждает более ранние результаты [Лаврушин и др., 2005]. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ изменяются от -0.4 до $+14.5\text{‰}$ и от -29 до $+1\text{‰}$ соответственно (см. табл. 1). Средние значения, полученные для вулканических вод Керченско-Таманской области, составляют $\delta^{18}\text{O}_{\text{ср}} = 6.8 \pm 4.3\text{‰}$ и $\delta^2\text{H}_{\text{ср}} = -17 \pm 7\text{‰}$ ($n = 33$, данные 2020 г.). Отрицательные и близкие к нулевым значения $\delta^{18}\text{O}$ отмечаются редко – только на отдельных вулканах, и характерны для вод периферических сальз (в. Кучугурский), где существует

вероятность подмешивания посторонних вод – пресных грунтовых (вулканы Южно-Нефтяной и Фонталовский) или морских (вулкан Тобечик)³. На этом основании мы считаем, что неискаженные составы грязевулканических вод Керченско-Таманской области характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O} > +1\text{‰}$.

На диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ фигуративные точки вод исследованных вулканов формируют отчетливый тренд, заметно отклоняющийся от линии

³ При оценке крайних и средних значений пробы с возможной примесью поверхностных и грунтовых вод исключались из выборки.

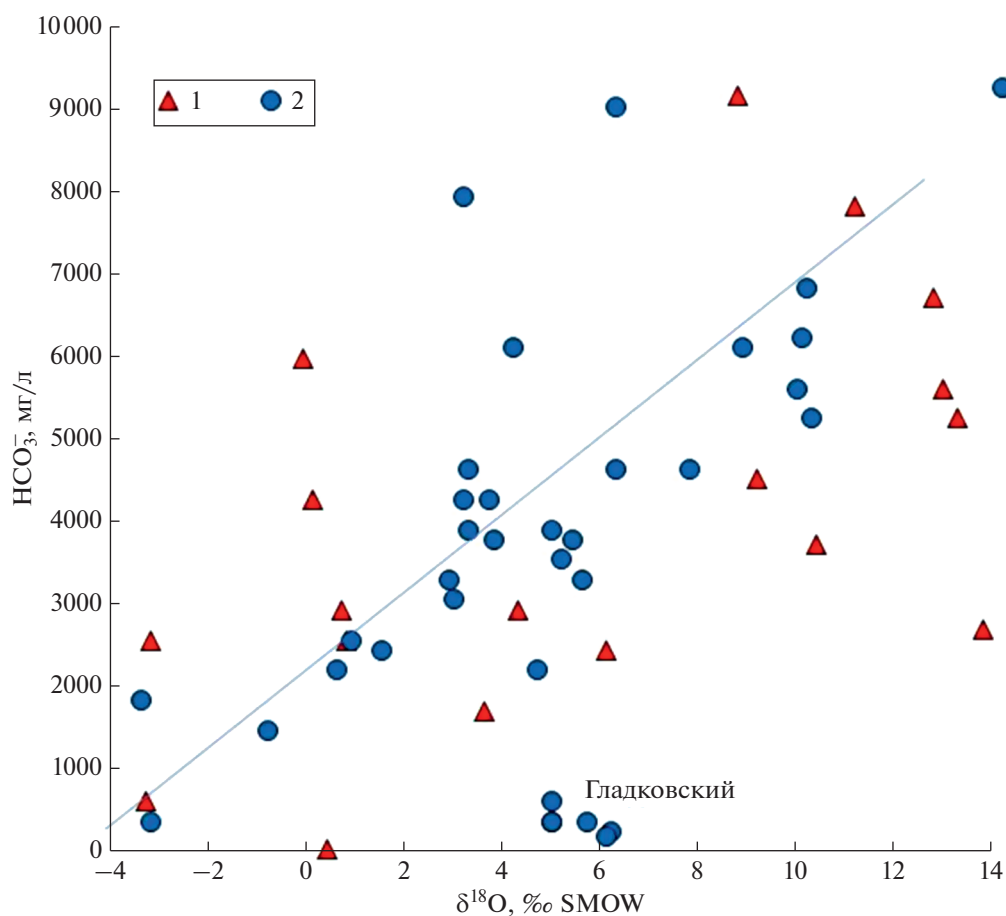


Рис. 8. Соотношение значений $\delta^{18}\text{O}$ и концентрации иона HCO_3^- в водах грязевых вулканов Керченского (1) и Таманского (2) полуостровов. Прямой линией показана зависимость изменения параметров.

метеорных вод (см. рис. 7, линия А). Это отклонение в основном связывается с процессами преобразования глинистых минералов [Селецкий, 1991; Лаврушин и др., 2005]. Опробование разных салз в пределах одного вулкана, проведенное на Тамани (2009 г.) и в Керчи (2017 г.), позволило проанализировать в естественных условиях влияние процессов поверхностного испарения на изотопные характеристики воды. Было установлено, что под влиянием испарения изотопный состав грязевулканических вод утяжеляется (происходит согласованный рост значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$), в результате этого фигуративные точки состава вод систематически смещаются, образуя самостоятельный тренд, параллельный глобальной линии метеорных вод (см. рис. 7, линия Б).

Сопоставление изотопных характеристик и концентрации компонентов главных компонентов вод показывает, что в грязевулканических водах величина $\delta^{18}\text{O}$ растет одновременно с ростом концентраций HCO_3^- (рис. 8) и бора, и связана обратной зависимостью с изменениями concentra-

ций Cl^- и Br^- -ионов. Зависимость $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}$ не отчетливая вследствие искажений, обусловленных испарением грязевулканических вод на поверхности земли или их разбавления пресными атмосферными водами (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования химического состава вод грязевых вулканов Керченско-Таманской области показали, что для них характерно преобладание вод “содового” типа ($\text{Cl}-\text{HCO}_3-\text{Na}$ или $\text{HCO}_3-\text{Cl}-\text{Na}$ типа). В сравнении с морской водой грязевулканические воды, изливающиеся из активных салз, характеризуются низкой минерализацией ($\text{Min}_{\text{ср}} = 12.6$ г/л) и высокой концентрацией в них HCO_3^- -иона (до 9 г/л). Однако при отсутствии стока воды из салз в условиях высокой летней инсоляции, общая минерализация может существенно возрастет, а концентрация HCO_3^- достигать 12 г/л. Специфической региональной особенностью грязевулканических вод

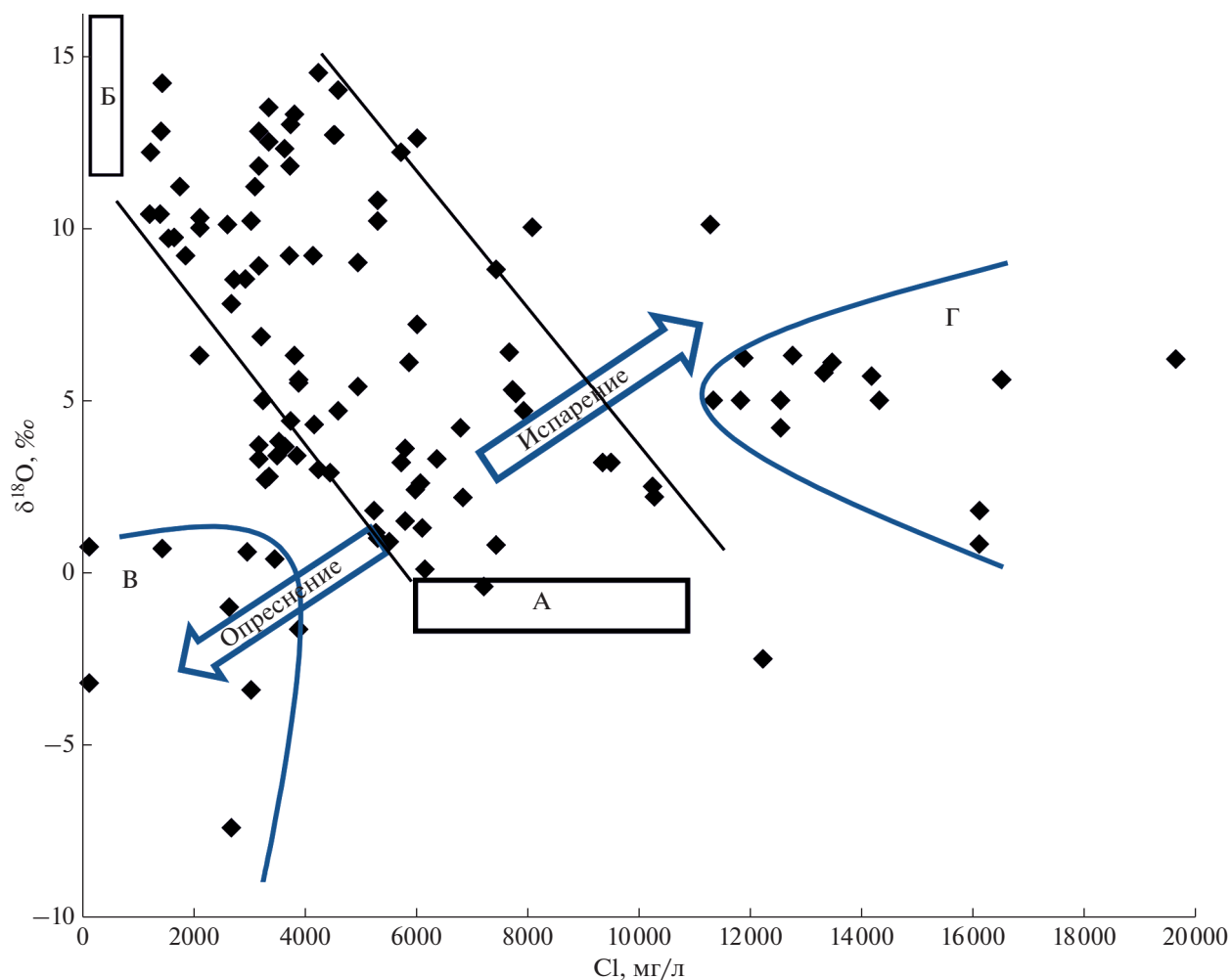


Рис. 9. Соотношение концентраций хлор-иона и значений $\delta^{18}\text{O}$ в грязевулканических водах Керченско-Таманской области (данные опробования 2009, 2017, 2017 и 2020 гг.). Области А и Б: неизменные седиментационные воды морского бассейна (А) и пресные дегидратационные воды зоны катагенеза (Б); прямые линии ограничивают полосу смешения седиментационных (А) и дегидратационных (Б) вод; стрелками показаны тенденции изменения концентрации хлора и изотопного состава кислорода грязевулканических вод под воздействием процессов испарения вод на поверхности земли или смешения с пресными водами; поле В ограничивает опресненные воды, образовавшиеся за счет подмешивания к грязевулканическим водам атмосферных или пресных грунтовых вод; поле В и поле Г ограничивают воды с повышенной минерализацией разного генезиса: воды влк. Гладковский, Королёвский, Тобечик, Центрального озера Булганакской группы.

является их обогащение бором. Наиболее богаты этим элементом воды с высокой концентрацией иона HCO_3^- (см. рис. 3). Для них также характерен тяжелый изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$ до $+14.5\text{‰}$) (см. рис. 8), и на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$ отмечается сильное отклонение фигуративных точек их составов от глобальной линии метеорных вод (сильный “кислородный сдвиг”) (см. рис. 7). Такие изотопные характеристики водной фазы в целом типичны для вод многих грязевулканических областей Земли [Никитенко, Ершов, 2017].

Природа грязевулканических вод Керченско-Таманского региона дискуссионна. Ранее, учи-

тывая обнаруженные в них высокие концентрации Li и B, даже обсуждалось их магматогенное происхождение [Ковалевский, 1940; Валяев и др., 1985]. Однако отсутствие примеси мантийного гелия в газах грязевых вулканов Керченско-Таманской области стало убедительным свидетельством в пользу их формирования исключительно в связи с коровыми процессами [Лаврушин и др., 1996; Polyak et al., 2000; Kikvadze et al., 2010; Поляк и др., 2012; Лаврушин, 2012].

Появление вод с высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ зачастую связывается с процессами дегидратации смектитовой компоненты глинистых осадков и высвобождения воды в ходе диагенетической иллитизации смектитов [Селецкий, 1991; Gigen-

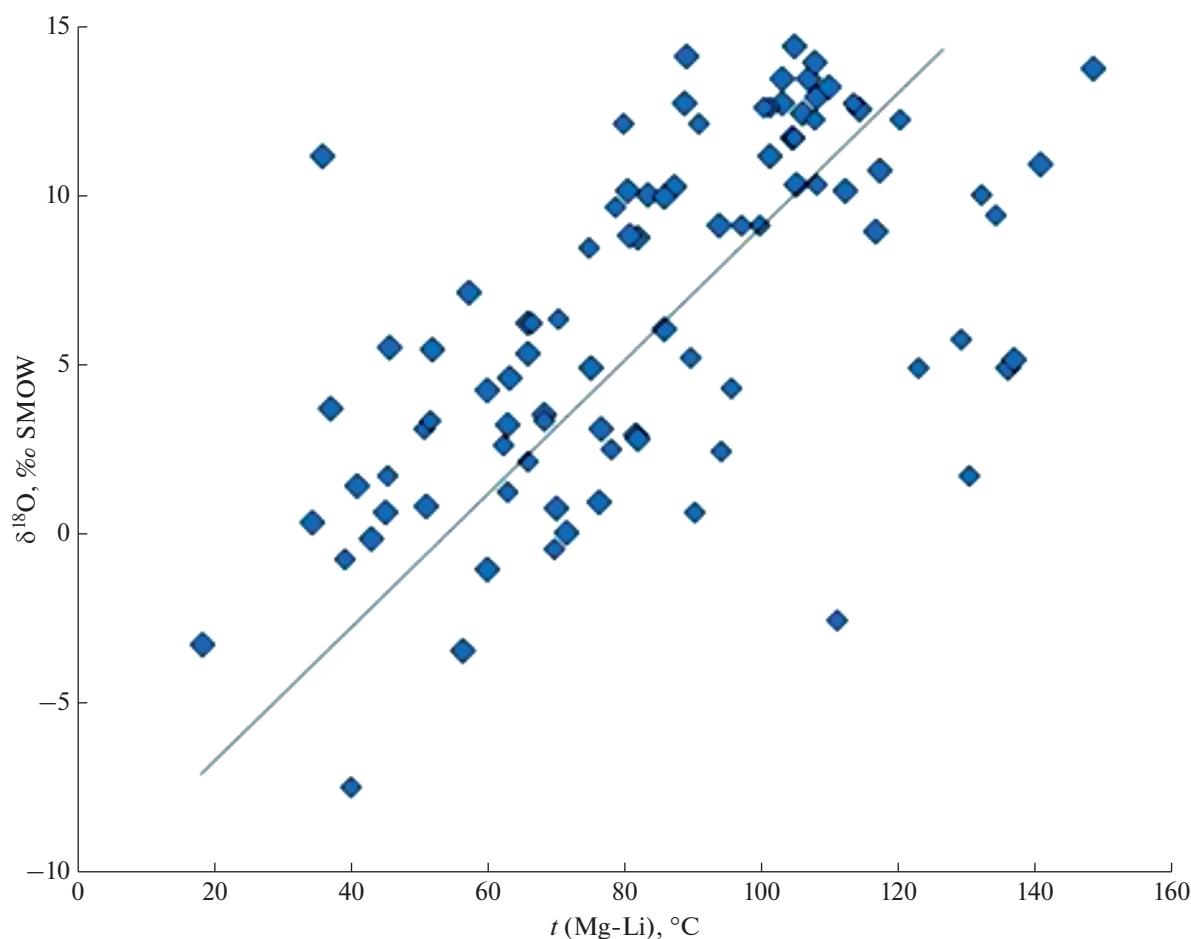


Рис. 10. Соотношение температур флюидогенерации $T_{Mg/Li}$ и значений $\delta^{18}O$ в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской области. Линией показана зависимость изменения параметров.

bach, 1992, 1995; Dählmann, de Lange, 2003; Nakayama et al., 2004; Лаврушин и др., 2005; Revil, 2002; Reyes et al., 2010; Sokol et al., 2019]. Также предполагается, что определенный вклад в утяжеление изотопного состава кислорода формационных вод могут вносить воды, образующиеся при разложении газогидратов [Martinelli, Dadomo, 2005]. Эта гипотеза интересна тем, что позволяет объяснить не только опреснение грязевулканических вод, но и дезинтеграцию глинистых пород (образование глинистой пульпы) на глубине.

Однако экспериментально определенные коэффициенты изотопного фракционирования в системе “газогидрат–вода” оказались недостаточно высокими ($\alpha^{18}O$) = 1.0023–1.0032 [Макава, 2004]) для того, чтобы объяснить весьма существенный “кислородный сдвиг”, наблюдаемый в действительности (см. рис. 7). Воды, продуцируемые в реакциях разложения газогидратов, должны обладать значениями $\delta^{18}O$ всего на 2.3–3.2‰ выше, чем в исходной воде. Кроме того, с “газогидратной” гипотезой происхождения вод, обога-

щенных тяжелым изотопом кислорода, плохо согласуется выявленная зависимость между значениями $\delta^{18}O$ и расчетными Mg-Li температурами флюидогенерации (рис. 10).

О вкладе дегидратационных вод в формирование солевого и изотопного состава изученных нами флюидных систем свидетельствует обратная зависимость между концентрациями Cl^- -иона и величинами $\delta^{18}O$ (см. рис. 9). Выделенная на рис. 9 полоса, в которой расположены фигуративные точки составов грязевулканических вод, очевидно, соответствует линии смешения двух типов вод – первичных соленых, седиментационных (см. рис. 9б, бокс А) и маломинерализованных, богатых ^{18}O дегидратационных вод (см. рис. 9, бокс Б).

Предположительно, первичные седиментационные воды, так же как и воды большинства морских водоемов, могли характеризоваться значениями $\delta^{18}O$ около 0‰. Если это предположение верно, то морские воды, которые были захоронены вместе с майкопскими осадками и являлись исходными для вод грязевулканических систем

региона, должны были характеризоваться концентрациями хлорид-иона 6–12 г/л. Эти значения заметно ниже, чем в океанической воде ($[Cl^-] = 19$ г/л [Хорн, 1972]). Следовательно, питание грязевулканических систем Керченско-Таманской происходит из отложений, сформировавшихся в опресненном морском водоеме.

Дегидратационные воды, располагающиеся на другом конце линии смещения (см. рис. 9, бокс Б), характеризуются нулевой концентрацией хлорид-иона и высокими величинами $\delta^{18}O$ (+13...+17‰). На диаграмме $\delta^{18}O$ – δ^2H таким значениям $\delta^{18}O$ соответствует диапазон величин δ^2H от –25 до –20‰ (см. рис. 7, линия А). Именно такими изотопными характеристиками обладают дегидратационные воды, выделяющиеся при катагенетическом преобразовании смектита в иллит [Селцкий, 1991; Giggenbach, 1992, 1995; Dählmann, de Lange, 2003; Nakayama et al., 2004; Reyes et al., 2010; Chelnokov et al., 2018].

Следует отметить, что диапазоны вариаций концентраций Cl^- и значений $\delta^{18}O$, оцененные нами как соответствующие первичным седиментационным и дегидратационным водам, теоретически могли быть еще уже, если бы на характеристики грязевулканических вод не влияли процессы поверхностного испарения и/или разбавления. Учитывая расположение Керченско-Таманской области в ландшафтно-климатической зоне сухих степей с высокой летней инсоляцией ($T > 24^\circ C$) и малым количеством осадков [Вед, 2000], можно ожидать, что менее измененные поверхностными процессами изотопные характеристики грязевулканических вод должны локализоваться вблизи нижней линии, ограничивающей полосу смешения седиментационных и дегидратационных вод (см. рис. 9). В этом случае для дегидратационных вод должны быть характерны значения $\delta^{18}O = \sim +13\text{‰}$ и $\delta^2H = -25\text{‰}$.

В целом, полученные результаты определений изотопного состава О и Н грязевулканических вод Керченско-Таманской области позволили установить, что в их водном балансе наряду с седиментационными важную роль играют дегидратационные воды. Доля последних в составе водной фазы некоторых вулканов может достигать 70–80%. Специфическими геохимическими “метками” последних всегда являются высокие положительные значения $\delta^{18}O$ и низкие концентрации иона Cl^- . Наряду с частичной дегидратацией, фазовый переход смектит → иллит сопровождается резким сокращением обменной емкости глин. Вследствие этого значительная часть элементов, первоначально входивших в обменный пакет смектитов или сорбированных на поверхности глинистых частиц, в ходе иллитизации переходит в раствор [Дриц, Коссовская, 1990]. Как следствие, дегидратационные воды обогащаются бо-

ром, бромом и, очевидно, натрием. Последний, взаимодействуя с воднорастворенными формами CO_2 , обеспечивает формирование вод с высоким

содержанием HCO_3^- . Действуя вместе, эти процессы определяют совокупные характеристики дегидратационных вод, такие как: химический тип HCO_3^- - Cl - Na , тяжелый изотопный состав кислорода, высокие концентрации бора и ряда других элементов [Sokol et al., 2019].

Вместе с тем, концентрации ионов HCO_3^- и Cl^- изменяются независимо (см. рис. 2) и, следовательно, процессы накопления иона HCO_3^- в грязевулканических водах Керченско-Таманского региона не могут быть описаны в рамках простой двухкомпонентной модели смешения седиментационных и дегидратационных вод. Полученные результаты дают основание полагать, что в формировании солевого и газового баланса грязевулканических вод задействованы несколько источников углекислоты, что указывает на сложность механизмов формирования “содовой части” солевого состава вод грязевулканических систем.

Сопоставление концентраций HCO_3^- в воде грязевых вулканов с расчетными температурами флюидогенерации ($t(Mg-Li)$) показывает, что концентрация гидрокарбонат-иона прямо зависит от температуры резервуара и постоянно растет вплоть до температуры $\sim 120^\circ C$ (рис. 11). Пока нельзя сказать определенно, продолжается ли этот рост и при больших температурах, поскольку на графиках есть группы точек, характеризующиеся низкими концентрациями HCO_3^- при $t(Mg-Li) > 120^\circ C$. В основном их формируют пробы из вулканов Гладковский и Королёвский (см. рис. 11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования грязевулканических вод Керченско-Таманской области продемонстрировали важную роль в их водном балансе дегидратационных вод, выделяющихся в процессе перехода смектита в иллит. С увеличением доли дегидратационных вод в составе грязевулканических флюидов происходит снижение концентрации Cl^- и рост содержания бора, гидрокарбонат-иона и некоторых других химических элементов. Мы предполагаем, что процесс иллитизации смектита в сочетании с высокой активностью геодинамических процессов может играть определяющую роль в формировании явления грязевого вулканизма.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Для грязевых вулканов Керченско-Таманской области характерны воды Cl - HCO_3^- - Na и, реже, HCO_3^- - Cl - Na типов, со средней минерализацией.

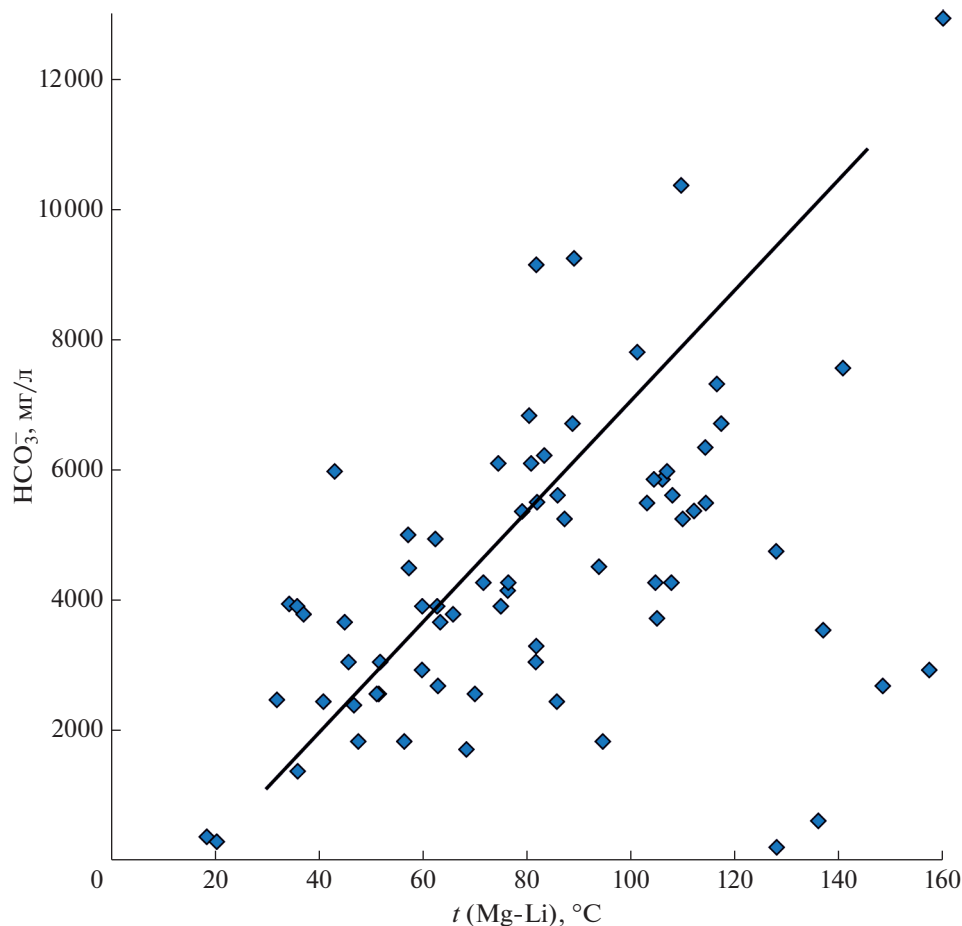


Рис. 11. Взаимотношение концентраций иона HCO_3^- и температур флюидогенерации ($t(\text{Mg-Li})$) в грязевулканических флюидах Керченско-Таманской области. Линией показана зависимость изменения параметров.

зацией 12.6 ± 3.5 г/л. Грязевулканические воды сильно обогащены бором и рядом других микроэлементов (Li, Ba, Sr, Br, I, As, Mo, U).

2. Оценки пластовых температур формирования солевого состава грязевулканических вод, отобранных из активно изливающих воду солей, дают диапазон Mg-Li температур от 40 до 134°C.

3. Многие химические и изотопные характеристики грязевулканических вод могут существенно изменяться вследствие их упаривания на поверхности земли. Изменяя химический состав вод, процессы испарения могут также вызывать завышение расчетных температур флюидогенерации, оцениваемых по гидрохимическим геотермометрам. Это необходимо учитывать при гидрохимическом опробовании вулканов, выбирая для отбора проб воды солевой, имеющие небольшой диаметр (<1 м) и интенсивно изливающие глинистую пульпу.

4. Установлено активное участие в формировании грязевулканических систем дегидратационных вод, выделяющихся в процессах фазового

перехода смектита в иллит. Их доля в водном балансе грязевых вулканов Керченско-Таманской области местами достигает ~80%. Дегидратационная вода характеризуется значениями $\delta^{18}\text{O}$ от +13 до +17‰ и $\delta^2\text{H}$ от -25 до -20‰ и околонулевыми концентрациями Cl^- . При переходе смектита в иллит происходит обогащение поровых вод ионом Na^+ , а также другими компонентами – в том числе бором и литием, выделяющимися из обменного комплекса глин. Ион натрия взаимодействует с растворенной углекислотой, образуемой в качестве “побочного” продукта при метаногенезе. Эти процессы совокупно приводят к формированию вод, обогащенных ионами HCO_3^- и Na^+ .

5. Соотношение между концентрацией Cl^- иона и величинами $\delta^{18}\text{O}$ в грязевулканических водах Керченско-Таманской области позволяет предполагать, что первичные седиментационные воды, захороненные вместе с майкопскими осадками, содержали всего 6–12 г/л Cl^- , что указывает

на существование в Западно-Кубанском прогибе в майкопское время опресненного морского бассейна.

6. Установлена зависимость концентраций В и НСО_3^- , а также значений $\delta^{18}\text{O}$ от значений пластовых ($t(\text{Mg-Li})$) температур.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Б.Г. Покровскому за большой объем выполненных определений изотопного состава О и Н в собранных нами пробах воды.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 17-17-01056-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: Nafta-Press, 2015. 322 с.

Валяев Б.М., Гринченко Ю.И., Ерохин В.Е. и др. Изотопный облик газов грязевых вулканов // Литология и полез. ископаемые. 1985. № 1. С. 72–87.

Вед И.П. Климатический атлас Крыма. Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 118 с.

Гемп С.Д., Дуброва Н.В., Несмелова З.Н. и др. Изотопный состав углерода углеродсодержащих газов (CH_4 и CO_2) грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Геохимия. 1970. № 2. С. 243–247.

Губкин И.М., Федоров С.Ф. Грязевые вулканы Советского Союза и их связь с генезисом нефтяных месторождений Крымско-Кавказской геологической провинции. М., Л.: Изд-во АН СССР. 1938. 44 с.

Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешаннослойные образования. М.: Наука, 1990. 214 с.

Ершов В.В., Левин Б.В. Новые данные о вещественном составе продуктов деятельности грязевых вулканов Керченского полуострова // Докл. РАН. 2016. Т. 471. № 1. С. 82–86.

Киквадзе О.Е., Лаврушин В.Ю., Покровский Б.Г., Поляк Б.Г. Изотопный и химический состав грязевулканических газов Таманского полуострова и проблема их генезиса // Литология и полез. ископаемые. 2014. № 6. С. 525–538.

Ковалевский С.А. Грязевые вулканы Южно-Каспийского региона (Азербайджан и Туркмения). Баку: Азтоптехиздат, 1940. С. 200.

Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Каменский И.Л. Источники вещества в продуктах грязевого вулканизма (по изотопным, гидрохимическим и геологическим данным) // Литология и полез. ископаемые. 1996. № 6. С. 625–647.

Лаврушин В.Ю., Корф А., Дейhle А., Степанец М.И. Изотопы бора и формирование грязевулканических флюидов Тамани (Россия) и Кахетии (Грузия) // Литология и полез. ископаемые. 2003. № 2. С. 147–182.

Лаврушин В.Ю., Дубинина Е.О., Авдеенко А.С. Изотопный состав кислорода и водорода вод грязевых вулканов Тамани (Россия) и Кахетии (Восточная Грузия) // Литология и полез. ископаемые. 2005. № 2. С. 143–158.

Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления / Отв. ред. Б.Г. Поляк // Тр. ГИН РАН. Вып. 599. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.

Лаврушин В.Ю., Гулиев И.С., Киквадзе О.Е., Алиев Ад.А., Поляк Б.Г., Покровский Б.Г. Воды грязевых вулканов Азербайджана: изотопно-химические особенности и условия формирования // Литология и полез. ископаемые. 2015. № 1. С. 3–29.

Никитенко О.А., Ершов В.В. Глобальные закономерности формирования изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, δD) грязевулканических вод // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2017. № 2. Вып. 34. С. 49–60.

Поляк Б.Г., Лаврушин В.Ю., Киквадзе О.Е., Иоффе А.И. Изотопы гелия в подземных флюидах Кавказского региона // Мониторинг, наука и технологии. 2012. № 1. С. 28–42.

Попков В.И. Складчато-надвиговые дислокации. М.: Научный мир, 2001. 136 с.

Попков В.И. Чешуйчато-надвиговое строение Северо-Западного Кавказа // Докл. РАН. 2006. Т. 411. № 2. С. 223–226.

Селецкий Ю.Б. Дейтерий и кислород-18 в проблеме формирования вод грязевых вулканов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 5. С. 133–138.

Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б. и др. Тектоника мезо-кайнозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985. 215 с.

Хорн Р. Морская химия (структура воды и химия гидросферы). М.: Мир, 1972. 400 с.

Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И., Науменко П.И., Кутный В.А. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области (атлас). Киев: Наукова думка, 1986. 148 с.

Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А., Кутный В.А., Гусаков И.Н., Трофимов В.В. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: Глав-Медиа, 2005. 176 с.

Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев А.Д. и др. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазодобываемостью. Баку: ЭЛМ, 1980. 165 с.

Chelnokov G. A., Bragin I. V., Kharitonova N. A. Geochemistry of mineral waters and associated gases of the Sakhalin Island (Far East of Russia) // J. Hydrol. (Amst). 2018. V. 559. P. 942–953.

Dählmann A., de Lange G. J. Fluid-sediment interactions at Eastern Mediterranean mud volcanoes: a stable isotope study from ODP Leg 160 // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 212(3–4). P. 377–391.

Giggenbach W.F. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin // Earth Planet. Sci. Lett. 1992. V. 113(4). P. 495–510.

Giggenbach W.F. Variations in the chemical and isotopic composition of fluids discharged from the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1995. V. 68. P. 89–116.

- Karandashev V.K., Leikin A.Yu., Khvostikov V.A., Kutseva N.K., Pirogova S.V.* Water Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry // *Inorg. Mater.* 2016. V. 52. № 14. P. 1391–1404.
- Kharaka Y.K., Mariner R.H.* Chemical Geothermometers and Their Application to Formation Waters from Sedimentary Basins // *Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories.* N.Y.: Springer-Verlag, 1989. P. 99–117.
- Kikvadze O.E., Lavrushin V.Yu., Pokrovskii B.G., Polyak B.G.* Gases from mud volcanoes of western and central Caucasus // *Geofluids.* 2010. V. 10. P. 486–496.
- Kikvadze O.E., Lavrushin V.Yu., Polyak B.G.* Chemical geothermometry: application to mud volcanic waters of the Caucasus region // *Frontiers of Earth Sciences.* 2020. V. 14. P. 738–757.
- Kopf A.* Significance of mud volcanism // *Rev. Geophys.* 2002. V. 40. P. B-1–B-49.
- Kopf A., Deyhle A., Lavrushin V.Yu. et al.* Isotopic evidence (He, B, C) for deep fluid and mud mobilization from mud volcanoes in the Caucasus continental collision zone // *Int. J. Earth. Sci. (Geol. Rundsch.)*. 2003. V. 92. P. 407–425.
- Maekawa T.* Experimental study on isotopic fractionation in water during gas hydrate formation // *Geochem. J.* 2004. V. 38. P. 129–138.
- Martinelli G., Dadomo A.* Geochemical Model of Mud Volcanoes from Reviewed Worldwide Data // *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity (Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Mud Volcanism, Geodynamics and Seismicity Baku, Azerbaijan 20–22 May 2003)* // Springer. 2005. Series IV: Earth and Environmental Series. V. 51. P. 211–220.
- Nakayama N., Tsunogai U., Ashi J., Gamo T.* Stable isotope anomalies and low chloride concentrations in pore water of CH₄-rich sediments at the Tanegashima mud volcano, Japan // *American Geophysical Union Fall Meeting.* 2004. Abstract #OS23B-1309.
- Polyak B.G., Tolstikhin I.N., Yakovlev L.E., Marty B., Ches-hko A.L.* Helium isotopes, tectonics and heat flow in the Northern Caucasus // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2000. V. 64. № 11. P. 1925–1944.
- Revil A.* Genesis of mud volcanoes in sedimentary basins: a solitary wave-based mechanism // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29(12). P. 81–84.
- Reyes A.G., Christenson B.W., Faure K.* Sources of solutes and heat in low-enthalpy mineral waters and their relation to tectonic setting, New Zealand // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. V. 192(3–4). P. 117–141.
- Saintot A., Angelier J.* Plio-Quaternary paleostress regimes and relation to structural development in the Kertch-Taman peninsulas (Ukraine and Russia) // *J. Struct. Geol.* 2000. V. 22. P. 1049–1064.
- Sokol E., Kokh S., Kozmenko O. et al.* Mineralogy and geochemistry of mud volcanic ejecta: a new look at old issues (a case study from the Bulganak field, Northern Black Sea) // *Minerals.* 2018. V. 8. P. 344.
- Sokol E.V., Kokh S.N., Kozmenko O.A., Lavrushin V.Yu., Belogub E.V., Khvorov P.V., Kikvadze O.E.* Boron in an on-shore mud volcanic environment: Case study from the Kerch Peninsula, the Caucasus continental collision zone // *Chem. Geol.* 2019. V. 525. P. 58–81.
- Zonenshain L.P., Le Pichon X.* Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins // *Tectonophysics.* 1986. V. 123. P. 181–211.

Mud-Volcanic Fluids of the Kerch-Taman Region: Geochemical Reconstructions and Regional Trends. Report 1: Geochemical Features and Genesis of Mud-Volcanic Waters

V. Yu. Lavrushin^{1,2,*}, A. S. Aydarkozhina¹, E. V. Sokol^{2,**}, G. A. Chelnokov¹, O. L. Petrov¹

¹*Geological Institute RAS (GIN RAS), Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (IGM SB RAS), ave. Acad. Koptyuga, 3, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: v_lavrushin@ginras.ru*

***e-mail: sokol_ag@mail.ru*

The chemical and isotopic characteristics ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of water from 42 mud volcanoes of the Kerch-Taman region (Crimean-Caucasus region) were analyzed. The formation temperatures of mud-volcanic waters were estimated using the Mg-Li hydrochemical geothermometer ($t(\text{Mg-Li}) = 40\text{--}134^\circ\text{C}$). It is revealed that dehydration waters released during the transformation of smectite into illite, play significant role in the mud-volcanic fluids balance (up to 80% of the total volume). These waters are characterized by low Cl-ion contents, high concentrations of HCO_3^- , B, Li, Ba and other trace elements. The values of $\delta^{18}\text{O}$ vary from +13 to +17‰, and $\delta^2\text{H}$ vary from –25 to –20‰, VPDB. It is shown that the values of HCO_3^- , B and $\delta^{18}\text{O}$ depend on the fluid generation temperatures.

Keywords: mud volcanoes, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$, in water, Kerch and Taman peninsulas.