

УДК 556+550.845

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-142-156

ИЗОТОПНО-ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ИССЫК-КУЛЬСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

Екатерина Ивановна Барановская¹✉, Наталья Александровна Харитоновна²,
Георгий Алексеевич Челноков³, Александр Валерьевич Ермаков⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; baranovskaya_kat@mail.ru✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tchenat@mail.ru

³ Геологический институт РАН, Москва, Россия; geowater@mail.ru

⁴ Геологический институт РАН, Москва, Россия; a.v.ermakov@gmail.com

Аннотация. В статье представлены новые данные о химическом составе, содержании и закономерностях распределения стабильных изотопов кислорода и водорода в природных водах Исык-Кульского межгорного артезианского бассейна. Сложные геологические и гидрогеологические условия региона исследований определяют разнообразие термоминеральных вод по химическому составу, минерализации и температуре. Результаты показали, что исследуемые воды региона имеют исходно метеорное происхождение с отчетливо выраженным высотным эффектом, а фракционирование изотопов обусловлено вторичными наложенными процессами. Геологическое и тектоническое строение рассматриваемого региона способствует формированию минеральных вод различного химического состава: в пределах скальных пород и открытых трещин образуются углекислые воды незначительной минерализации, в случае присутствия значительной толщи осадочного чехла формируются углекислотно-азотные или азотно-метановые воды с минерализацией более 2,0 г/л (иногда значительно выше, до 35,0 г/л). Для оценки глубинных температур формирования термоминеральных вод были применены ионно-солевые геотермометры, которые показали широкий интервал значений температур (от 21,4 до 144,8 °С), что указывает на различные условия формирования исследуемых вод.

Ключевые слова: минеральные воды, гидрогеохимические условия, изотопный состав, горно-складчатые области, межгорные бассейны, Исык-Куль

Для цитирования: Барановская Е.И., Харитоновна Н.А., Челноков Г.А., Ермаков А.В. Изотопно-гидрогеохимическая характеристика термоминеральных вод Исык-Кульского артезианского бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 5. С. 142–156.

ISOTOPE-HYDROGEOCHEMICAL FEATURES OF THE THERMOMINERAL WATERS OF THE ISSYK-KUL ARTESIAN BASIN

Ekaterina I. Baranovskaya¹✉, Natalya A. Kharitonova², Georgiy A. Chelnokov³,
Aleksandr V. Ermakov⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; baranovskaya_kat@mail.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tchenat@mail.ru

³ Geological Institute, RAS, Moscow, Russia; geowater@mail.ru

⁴ Geological Institute, RAS, Moscow, Russia; a.v.ermakov@gmail.com

Abstract. The article presents a new data on the chemical composition, content and distribution patterns of stable oxygen and hydrogen isotopes in the natural waters of the Issyk-Kul intermountain artesian basin. The complex geological and hydrogeological conditions of the research region have led to a variety of thermomineral waters in terms of chemical composition, TDS and temperature. The results showed that the studied waters of the region have an initial meteoric origin with a clearly pronounced high-altitude effect, and the fractionation of isotopes is due to secondary superimposed processes. The geological and tectonic structure of the region under consideration contributes to the formation of mineral waters of various chemical composition: carbon dioxide waters of insignificant TDS are formed within rocks and open cracks, in the case of the presence of a significant thickness of the sedimentary cover, carbon dioxide-nitrogen or nitrogen-methane waters with a TDS of more than 2,0 g/l (sometimes significantly higher up to 35,0 g/l) are formed. Ion-salt geothermometers were used to assess the deep temperatures of the formation of thermomineral waters, which showed a wide range of temperature values (from 21,4 to 144,8 °C), which indicates different conditions for the formation of the studied waters.

Keywords: mineral waters, hydrogeochemical conditions, isotopic composition, mountainous-folded region, intermountain basins, Issyk-Kul

For citation: Baranovskaya E.I., Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Ermakov A.V. Isotope-hydrogeochemical features of the thermomineral waters of the Issyk-Kul artesian basin. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 5: 142–156. (In Russ.).

Введение. Кыргызская Республика обладает значительным бальнеологическим потенциалом, так как на ее территории локализовано большое количество минеральных вод, отличающихся по температурному режиму, химическому и газовому составу, по минерализации. Только в пределах Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна выявлено более 100 естественных выходов минеральных вод, которые, в большей своей части, сосредоточены в горной области. В пределах межгорной впадины минеральные воды на поверхность не выходят, но вскрыты скважинами на глубинах более 1,0 км. Благоприятные ландшафтные и климатические условия Иссык-Кульской котловины совместно с наличием разнообразных в бальнеологическом отношении минеральных вод создают подходящие условия для функционирования сети санаториев и бальнеолечебниц.

На данный момент на побережье озера Иссык-Куль функционирует множество бальнеологических здравниц, осуществляющих лечение разнообразными по химическому типу, газовому составу, минерализации и температуре минеральными водами. Эти воды преимущественно применяют для лечения сердечных заболеваний, при болезнях обмена веществ, кроме того, их активно использует местное население в качестве питьевых столовых вод. Уникальность данного района также обусловлена сосуществованием двух типов минеральных вод: трещинно-поровых вод, приуроченных к артезианским бассейнам межгорного типа, и трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений скальных массивов.

Основные исследования минеральных вод Иссык-Кульского бассейна были выполнены в шестидесятых годах прошлого века [Григоренко, 1968; Катаева, 1969], тогда же были пробурены основные эксплуатируемые и по сей день скважины. Последняя работа по систематизации минеральных вод региона была опубликована в 1987 г. [Матыченков, 1987] и в дальнейшем никаких систематических исследований данного типа вод не проводилось, однако местное население активно продолжает использовать старые скважины для бальнеопроцедур, предполагая, что химический состав воды за сорок лет остался стабильным. В рамках данной статьи мы приводим новые данные по химическому и изотопному ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) составу природных (поверхностных, пресных и термоминеральных) вод Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна. Систематизация разнообразного фактического материала: полученных нами данных, результатов предшественников, детальное изучение геологического строения и гидрогеологических условий региона, позволили провести реконструкцию условий формирования и распространения минеральных вод территории, а также выявить факторы, влияющие на их разнообразие.

Объект исследования. Иссык-Кульский артезианский бассейн представляет собой межгорную

депрессию (впадину), развитую в пределах Северо-Тяньшаньской каледонской складчатой системы [Мандычев, 2002].

Впадина обрамлена высокогорными хребтами Кюнгей-Ала-Тоо (высшая точка 4770 абс.м) на севере и Терской-Ала-Тоо на юге (достигая отметок 5200 абс.м). Хребты сложены комплексом пород протерозойского и палеозойского возраста [Катаева, 1969]. На наиболее высоких отметках горных участков сосредоточены значительные площади снега и льда. Длина впадины составляет 240 км, ширина — 90 км.

Центральную часть Иссык-Кульской впадины занимает одноименное глубоководное бессточное озеро. Озеро Иссык-Куль представляет собой котловину, вытянутую в широтном направлении, и расположенное на дне тектонической впадины на высоте 1609 абс. м. Площадь бассейна озера составляет более 22 тыс км², а его максимальная глубина достигает 668 м (в среднем 278 м) [Матыченков, 1987]. Береговая зона озера представляет собой предгорную равнину (конусы выноса горных рек), шириной от 2 до 20 км, где сосредоточены города и населенные пункты, являющиеся основной курортной зоной Прииссыкулья.

Температурный режим озера определяется, главным образом, его глубоководностью, в зимнее время поверхностные слои воды (до 100 м) достигают температур около 5,0 °C и 3,6÷4,2 °C на глубинах 500–600 м; в летнее время (июль–август) температура верхних слоев воды достигает 18÷20 °C. По данным опробований в июне 2023 г. (т. I₁) температура воды в озере Иссык-Куль составила 13,7 °C (табл. 1).

Минерализация воды озера Иссык-Куль по данным [Матыченков, 1987] составляла 5,97 г/л, по данным наших опробований 2023 г. — 5,7 г/л (табл. 1). По химическому типу вода озера характеризуется Cl–SO₄–Na–Mg типом. По соотношению катионов (преобладание Na, Mg) вода озера Иссык-Куль соответствует океанической, по преобладанию анионов (Cl, SO₄) ближе к водам материковых озер [Матыченков, 1987]. Основным источником питания озера являются реки, формирующиеся в высокогорной гляциальной зоне.

Согласно общепринятой схеме гидрогеологического районирования Киргизии по П.Г. Григоренко [Григоренко, 1968; Гидрогеология..., 1971] рассматриваемый Иссык-Кульский артезианский бассейн (рис. 1, табл. 2) входит в Тянь-Шанскую гидрогеологическую область, Иссык-Кульский регион (Б. IV). В гидрогеологическом отношении, Иссык-Кульская межгорная впадина — это артезианский бассейн с пластовыми водами в осадочных породах мезо-кайнозойского чехла, а также с трещинными, трещинно-жильными водами в основании и в скальных породах окружающих хребтов [Минеральные..., 1974]. Бассейн сложен мезо-кайнозойскими континентальными осадочными породами типа моласс, мощностью порядка 5,0 км.

Таблица 1

Химический состав природных вод Иссык-Кульского артезианского бассейна

№	№ пробы	Абс. отмет-ка пов-ти, м	Пункт опробования	Формула Курлова	Eh	M _{изм}	M _{расч}	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	F	Br
					мВ	г/л	мг/л									
Поверхностные воды																
1	I ₁	1601,0	озеро Иссык-Куль	M _{5,6} $\frac{Cl47SO_4,46}{(Na+K)67Mg27}$ pH8,7 T13,7	-91,0	5,7	5,6	1204,0	48,2	101,0	264,0	1531,0	2035,0	427,1	12,3	1,2
2	I ₂	1601,0	озеро Иссык-Куль	M _{5,5} $\frac{Cl51SO_4,49}{(Na+K)68Mg26}$	-	-	5,5	1304,0	50,5	106,0	279,0	1609,0	2118,0	-	12,6	<0,05
3	T ₂₀	2128,0	ручей в ущелье Джети-Огуз	M _{0,2} $\frac{Cl48HCO_3,40SO_4,12}{Ca59(Na+K)34}$ pH8,6 T14,0	-84,0	0,3	0,2	22,4	1,1	35,5	2,6	61,7	20,1	88,5	<0,3	<0,05
Грунтовые воды																
4	T ₁₀	1626,0	г. Чолпон-Ата	M _{0,3} $\frac{HCO_3,48Cl42}{Ca52(Na+K)39}$ pH8,3 T16,2	-68,2	0,2	0,3	42,2	1,5	50,8	5,0	74,4	22,3	147,0	<0,3	0,1
5	T ₁₃	1614,0	с. Чон-Орукту	M _{0,3} $\frac{HCO_3,71Cl23}{Ca65(Na+K)21}$ pH8,6 T18,8	-89,6	0,2	0,3	12,9	0,8	37,3	4,9	30,5	10,8	158,7	<0,3	<0,05
Минеральные воды																
6	T ₂	1611,0	г. Балыкчи	M _{10,7} $\frac{SO_4,73Cl27}{(Na+K)78Ca15}$ pH7,5 T40,2	-26,6	9,3	10,7	2508,0	19,1	427,0	117,0	1619,0	5959,0	-	<0,3	<0,05
7	T ₃	1620,0	с. Чок-Тал	M _{0,4} $\frac{SO_4,46HCO_3,34Cl21}{(Na+K)98}$ pH9,8 T37,3	-164,4	0,4	0,4	106,0	0,4	1,8	0,1	39,3	117,0	109,8	3,2	<0,05
8	T ₄	1625,0	с. Бает	M _{0,7} $\frac{SO_4,61Cl22HCO_3,17}{(Na+K)98}$ pH9,2 T30,7	-123,6	0,9	0,7	216,0	0,6	4,0	0,1	78,8	289,0	103,7	6,7	<0,05
9	T ₅	1620,0	с. Долинка	M _{18,3} $\frac{Cl87SO_4,12}{(Na+K)81Ca18}$ pH7,4 T52,3	-19,3	21,3	18,3	5330,0	18,8	1055,0	16,1	9943,0	1912,0	36,6	<0,3	11,0
10	T ₆	1628,0	г. Чолпон-Ата	M _{18,7} $\frac{Cl90SO_4,10}{(Na+K)64Ca35}$ pH7,6 T18,0	-29,0	20,1	18,7	4364,0	9,4	2080,0	17,9	10641,0	1568,0	22,3	<0,3	8,8
11	T ₇	1618,0	с. Кара-Ой	M _{1,0} $\frac{SO_4,54Cl38}{(Na+K)95}$ pH8,9 T33,9	-114,8	1,2	1,0	309,0	0,8	12,6	0,3	200,0	386,0	73,2	13,5	<0,05
12	T ₈	1617,0	г. Чолпон-Ата	M _{22,2} $\frac{Cl89SO_4,11}{(Na+K)77Ca21}$ pH7,7 T43,2	-38,8	25,1	22,2	6167,0	18,3	1455,0	84,7	12408,0	1997,0	36,6	<0,3	10,0
13	T ₁₁	1618,0	с. Бостери	M _{34,0} $\frac{Cl93}{(Na+K)73Ca26}$ pH7,8 T26,6	-42,0	35,0	34,0	9068,0	0,1	2814,0	47,2	20048,0	2047,0	18,3	<0,3	11,6
14	T ₁₂	1627,0	с. Булан-Соготту	M _{11,8} $\frac{Cl76SO_4,23}{(Na+K)89Ca10}$ pH7,7 T43,8	-36,8	11,8	11,8	3530,0	12,8	361,0	23,0	5470,0	2277,0	140,4	<0,3	3,3
15	T ₁₄	1620,0	с. Чон-Орукту	M _{7,4} $\frac{Cl98}{(Na+K)61Ca39}$ pH8,1 T38,0	-59,6	9,8	7,4	1678,0	3,4	946,0	1,2	4641,0	94,1	36,6	2,2	1,9
16	T ₁₅	1607,0	с. Ой-Булак	M _{22,2} $\frac{Cl89SO_4,11}{(Na+K)77Ca21}$ pH7,7 T43,2	-55,9	7,8	6,2	1393,0	3,4	781,0	0,7	3546,0	464,0	36,6	2,3	<0,05
17	T ₁₆	1621,0	г. Каракол	M _{0,9} $\frac{Cl79HCO_3,11SO_4,10}{(Na+K)90}$ pH8,6 T33,5	-90,0	1,3	0,9	288,0	0,8	26,5	1,4	441,0	74,5	109,8	5,9	0,5
18	T ₁₈	2042,0	ущелье Джети-Огуз	M _{12,5} $\frac{Cl94}{(Na+K)54Ca46}$ pH7,7 T32,0	-37,5	15,3	12,5	2476,0	39,2	1859,0	2,4	7517,0	565,0	39,7	<0,3	1,6
19	T ₁₉	2126,0	ущелье Джети-Огуз	M _{1,8} $\frac{Cl73SO_4,25}{(Na+K)63Ca37}$ pH8,5 T17,9	-81,2	2,1	1,8	387,0	5,1	203,0	0,4	783,0	367,0	42,7	3,3	<0,05
20	T ₂₁	2195,0	ущелье Джети-Огуз	M _{0,5} $\frac{Cl58SO_4,36}{(Na+K)70Ca30}$ pH9,2 T22,0	-134,9	0,4	0,5	122,0	1,8	45,4	0,2	158,0	132,0	30,5	6,3	0,1
21	T ₂₂	2061,0	ущелье Ак-Суу	M _{0,3} $\frac{Cl38SO_3,36HCO_3,26}{(Na+K)93}$ pH9,2 T48,0	-130,2	0,4	0,3	84,6	1,6	5,4	0,1	58,4	74,8	67,1	13,0	<0,05
22	T ₂₃	1635,0	с. Кирпичное	M _{0,4} $\frac{HCO_3,48Cl28SO_4,24}{(Na+K)95}$ pH9,3 T40,3	-132,4	0,4	0,4	97,5	0,5	4,3	0,1	51,9	61,2	152,6	11,7	<0,05
23	T ₂₄	2383,0	с. Чон-Кызыл-Суу	M _{0,4} $\frac{Cl54SO_4,24HCO_3,22}{(Na+K)86Ca13}$ pH9,4 T28,4	-139,1	0,5	0,4	101,0	3,4	14,1	0,1	114,0	69,9	79,3	10,7	0,1
24	T ₂₆	2361,0	ущелье Джууку	M _{0,3} $\frac{SO_4,41Cl32HCO_3,27}{(Na+K)81Ca18}$ pH8,9 T37,9	-112,1	0,4	0,3	74,0	1,4	14,8	0,3	50,4	86,9	73,0	10,9	<0,05
25	T ₂₇	1630,0	с. Каджи-Сай	M _{2,4} $\frac{Cl43SO_4,31HCO_3,26}{(Na+K)98}$ pH8,0 T43,4	-51,8	2,5	2,4	723,0	3,2	15,1	0,7	569,0	545,0	585,8	19,2	<0,05
26	T ₂₈	1616,0	с. Бар-Булак	M _{4,3} $\frac{Cl78SO_4,22}{(Na+K)75Ca25}$ pH8,0 T38,6	-67,4	5,2	4,3	1139,0	9,1	328,0	1,2	2031,0	778,0	24,4	2,9	<0,05

Гидрогеологическое районирование Киргизии (по данным [Гидрогеология..., 1971])

Таблица 2

Области	Регионы		Подрегионы		Основные артезианские бассейны	
Тянь-Шанская	А	Чу-Таласский	A ₁	Чуйский	I	Восточно-Чуйский
			A ₂	Таласский	II	Таласский южный
					III	Таласский северный
	Б	Иссык-Кульский			IV	Иссык-Кульский
	В	Нарынский	B ₁	Северный Нарынский	V	Кочкорский
					VI	Суусамырский
					VII	Джумгалский
					VIII	Токтогульский
					IX	Сонгкёльский
					X	Кара-Куджурский
			B ₂	Южный Нарынский	XI	Верхненарынский
					XII	Алабуга-Нарынский
					XIII	Тогуз-Тороский
					XIV	Ат-Башынский
					XV	Арпинский
					XVI	Балгартский
	Г	Сарыджаз-Аксакий	Г ₁	Сары-Джазский		
			Г ₂	Ак-Сайский	XVII	Чатыр-Кёльский
					XVIII	Ак-Сайский
	Д	Ферганский	Д ₁	Чаткало-Ферганский	XIX	Узёнгю-Куушский
					XX	Чаткальский
			D ₂	Ош-Джалалабадский	XXI	Сёокский
			D ₃	Алай-Туркестанский	XXII	Ферганский
Памиро-Алайская	Е	Алайский			XXIII	Алайский

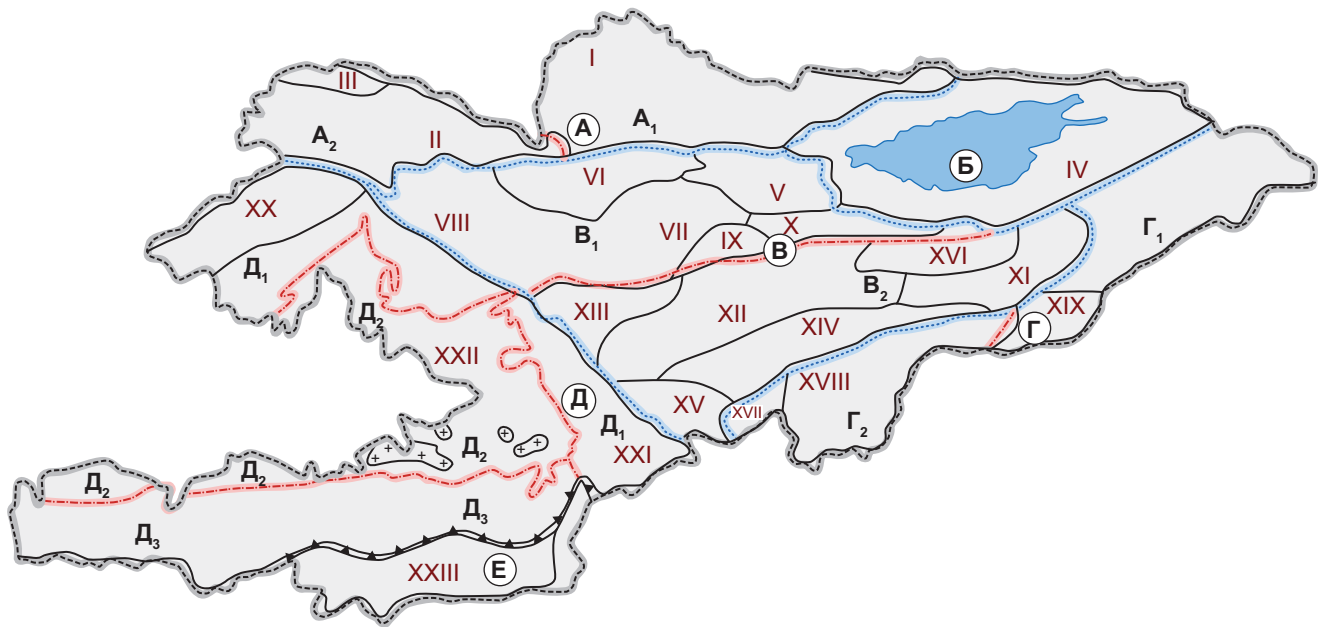


Рис. 1. Схема гидрогеологического районирования Киргизии (по данным [Гидрогеология..., 1971]). Обозначения см. в табл. 1

зов, отфильтровывали через целлюлозный фильтр (0,45 мкм) на месте отбора.

Определение содержания основных катионов и анионов проводилось методом ионной хроматографии на высокоэффективном ионном жидкостном хроматографе LC-20 (Shimadzu, Япония). Определение органического углерода выполнено методом ИК-детектирования на анализаторе общего органического углерода ТОС-V (Shimadzu, Япония) в аналитической лаборатории ДВГИ ДВО РАН.

Определение микрокомпонентного состава было выполнено методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700 в аналитической лаборатории ДВГИ ДВО РАН.

Определение изотопного состава природных вод ($\delta^{18}\text{O}$ и δD) выполнялось на изотопном анализаторе воды (Picarro, США) в аналитической лаборатории ГИН РАН. Результаты измерений $\delta^{18}\text{O}$ и δD приведены относительно международного стандарта VSMOW.

Для оценки глубинных температур формирования термоминеральных вод применялись ионно-солевые геотермометры, основанные на реакциях химического равновесия ряда элементов в системе «вода-минерал» [Fournier, 1979; Giggenbach, 1988; Chelnokov, 2022; Bragin, 2021; Шестакова, 2018].

Результаты исследования и их обсуждение. Грунтовые воды на данной территории формируются в подгорном шлейфе путем инфильтрации из русел рек, каналов и ирригационной сети. Водоносные горизонты представлены галечниками, гравием и песками, фильтрационные показатели которых уменьшаются от периферии предгорного шлейфа к зоне вторичного погружения. В предгорьях коэффициент фильтрации варьирует от 10,0 до 100,0 м/сут; в пределах аллювиально-пролювиальной равнины коэффициент фильтрации значительно меньше и составляет 0,5÷1,0 м/сут [Кендирбаева, 2023]. Нами были опробованы грунтовые воды на севере Иссык-Кульского артезианского бассейна (г. Чолпон-Ата и с. Чон-Орукту) с глубины 30–50 м (рис. 3, табл. 1). По минерализации эти воды пресные (0,2 г/л) хлоридно-гидрокарбонатные натриево-кальциевого типа. В воде также обнаружено незначительное количество ионов магния (~5,0 мг/л) и сульфата (10,8÷22,3 мг/л). По показателю pH изучаемые воды являются слабощелочными (pH 8,3÷8,6), а по температуре холодными (16,2÷18,8 °C). Окислительно-восстановительный потенциал варьирует от –89,6 до –68,2 мВ. Содержание органического углерода повсеместно низкое <1,0 мг/л (табл. 3), однако в пробе T₁₀ (г. Чолпон-Ата) выявлен повышенный уровень концентрации общего азота (1,1 мг/л) и нитратов (5,6 мг/л), что обусловлено загрязнением данного пункта опробования азотными удобрениями, приносимыми в водоносный комплекс с расположенных неподалеку сельскохозяйственных земель. Концентрации фтора, брома, бора и кремния (как Si)

Таблица 3
Содержание различных форм углерода и азота в пробах природных вод Иссык-Кульского артезианского бассейна

№	№ пробы	Пункт опробования	ТС	IC	ТОС	TN
			мг/л			
Поверхностные воды						
1	I ₁	озеро Иссык-Куль	70,6	66,0	4,6	0,8
2	I ₂	озеро Иссык-Куль	66,5	64,8	1,7	<0,1
3	T ₂₀	ручей в ущелье Джети-Огуз	13,7	13,0	0,7	0,6
Грунтовые воды						
4	T ₁₀	г. Чолпон-Ата	32,9	31,9	1,0	1,1
5	T ₁₃	с. Чон-Орукту	24,0	23,0	1,0	<0,1
Минеральные воды						
6	T ₂	г. Балыкчи	19,0	18,8	0,2	0,7
7	T ₃	с. Чок-Тал	13,8	13,1	0,7	0,5
8	T ₄	с. Бает	26,0	25,2	0,8	0,1
9	T ₅	с. Долинка	5,5	5,5	0,1	0,5
10	T ₆	г. Чолпон-Ата	4,0	4,0	0,1	0,3
11	T ₇	с. Кара-Ой	14,2	14,0	0,2	<0,1
12	T ₈	г. Чолпон-Ата	6,2	6,2	0,1	2,7
13	T ₁₁	с. Бостери	7,6	7,6	0,1	1,6
14	T ₁₂	с. Булан-Соготту	23,4	22,3	1,1	0,5
15	T ₁₄	с. Чон-Орукту	2,6	1,4	1,3	1,2
16	T ₁₅	с. Ой-Булак	2,6	2,6	0,1	<0,1
17	T ₁₆	г. Каракол	20,7	19,2	1,5	0,4
18	T ₁₈	ущелье Джети-Огуз	6,1	6,1	0,1	0,8
19	T ₁₉	ущелье Джети-Огуз	5,6	5,6	0,1	<0,1
20	T ₂₁	ущелье Джети-Огуз	15,7	14,9	0,8	0,1
21	T ₂₂	ущелье Ак-Суу	9,9	8,2	1,6	0,5
22	T ₂₃	с. Кирпичное	22,1	19,1	3,0	0,3
23	T ₂₄	с. Чон-Кызыл-Суу	6,9	6,7	0,2	0,4
24	T ₂₆	ущелье Джууку	9,7	8,0	1,7	0,4
25	T ₂₇	с. Каджи-Сай	94,0	88,2	5,8	0,3
26	T ₂₈	с. Бар-Булак	4,2	4,2	0,0	0,6

Примечание: ТС — общий углерод; IC — неорганический углерод; ТОС — общий органический углерод; TN — общий азот.

низкие и составляют <0,3 мг/л, ≤0,1 мг/л, ≤26,0 мкг/л и <7,0 мг/л соответственно.

Термоминеральные воды в пределах исследуемой территории существенно отличаются по многим параметрам: температуре, минерализации, химическому и газовому составу, по содержанию бальнеокомпонентов (рис. 4, табл. 1).

Температура природных минеральных вод на месте опробования варьирует в широком диапазоне от 16,2 до 52,3 °C (рис. 4, табл. 1). Все исследуемые подземные воды по температуре были разделены на четыре группы: к первой группе (6 точек опробования) отнесены холодные воды с температурой

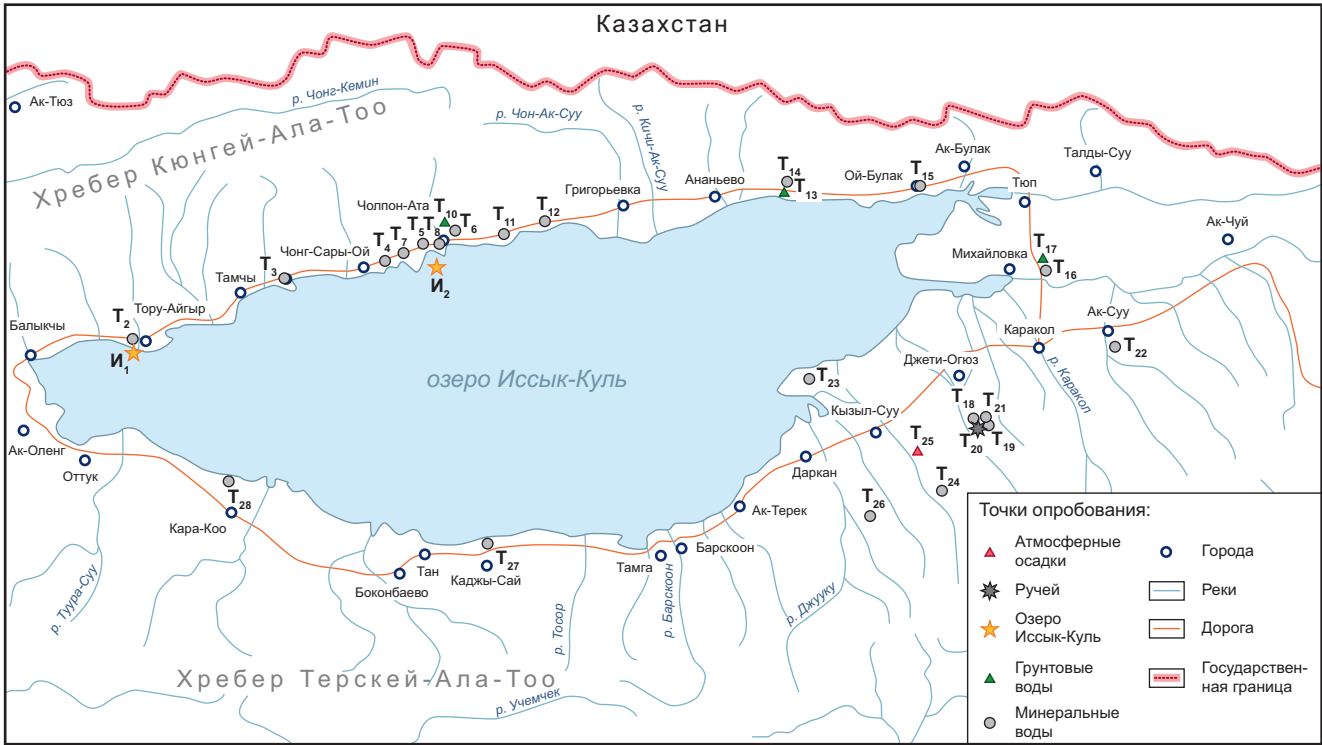


Рис. 3. Обзорная карта района исследований и расположения точек опробования

Таблица 4
Основные химические типы природных минеральных вод
Иссык-Кульского артезианского бассейна

Гидрогеологическая структура	Артезианский межгорный бассейн			Гидрогеологический массив	
	Na, Cl	Na, SO ₄	Na, HCO ₃	Na, Cl	Na, SO ₄
Преобладающий ион	Na, Cl	Na, SO ₄	Na, HCO ₃	Na, Cl	Na, SO ₄
Минерализация, г/л	1,3–35,0	0,4–9,3	0,4	0,3–12,5	0,3
T, °C	18,0–52,3	30,7–40,2	40,3	18,0–48,0	38,0

<20 °С, ко второй (8 точек опробования) — теплые воды с температурой 20–37 °С, к третьей группе, она самая многочисленная (10 точек опробования) — очень теплые с температурой 37÷50 °С, и к четвертой (1 точка) — с температурой более 50 °С. В целом, большинство проб имеют температуру более 20 °С. В первую группу попадают преимущественно поверхностные и подземные грунтовые пресные воды, а из минеральных вод только две пробы: Т₆ и Т₁₉, отобранные на севере Иссык-Кульского артезианского бассейна в районе г. Чолпон-Ата и с. Чон-Орукту. Низкие температуры этих вод обусловлены, видимо, их разбавлением холодными приповерхностными водами. Все остальные минеральные воды являются термоминеральными. Горячая вода, относящаяся к 4-ой группе, вскрыта скважиной в осадочном чехле с глубины 1515 м на севере артезианского бассейна (с. Долинка) (рис. 4). В целом, какой-либо явной корреляционной зависимости температуры минеральных вод от глубины их отбора в водоносных

горизонтах межгорного артезианского бассейна не прослеживается (рис. 5). Также не выявлено зависимости между температурой минеральных вод и условиями их циркуляции: трещинно-жильные воды скальных массивов и пластово-поровые артезианские воды межгорного бассейна часто имеют схожие температуры (табл. 4).

Рассматриваемые термоминеральные воды являются умеренно-щелочными (рН 7,4–9,8) и характеризуются восстановительной обстановкой (Eh –164,4 ÷ –19,3 мВ). Их минерализация варьирует в широких пределах от 0,3 г/л до 34,0 г/л (рис. 4; 6) и, в целом, зависит от приуроченности к гидрогеологической структуре формирования: осадочный чехол артезианского межгорного бассейна или его горное обрамление. Воды осадочного чехла имеют часто высокую минерализацию от 1,2 до 35,0 г/л, за исключением нескольких проб пресных вод с минерализацией 0,4÷0,9 г/л, отобранных на севере бассейна (точки Т₃, Т₄) и в районе с. Кирпичное (т. Т₂₃).

Среди анионов преобладают Cl[–] и SO₄^{2–}, доля каждого среди анионов составляет (%-экв): 43÷98 и 46÷73, соответственно. В четырех пробах (точки Т₁₁, Т₁₄, Т₁₅ и Т₁₈) в анионной части присутствует, главным образом, хлорид-ион. Наблюдается закономерность в составе анионов: все термоминеральные воды обогащены либо сульфатом, либо хлоридом. В пробах Т₂, Т₃, Т₄, Т₇ и Т₂₆ сульфат является преобладающим ионом (табл. 1) и для них характерна высокая сульфатность ($rSO_4 \cdot 100/rCl$), которая составляет 120÷271. В одной пробе минеральных вод (т. Т₂₃, с. Кирпичное) преобладающим анионом является HCO₃[–]-ион (48%-экв).

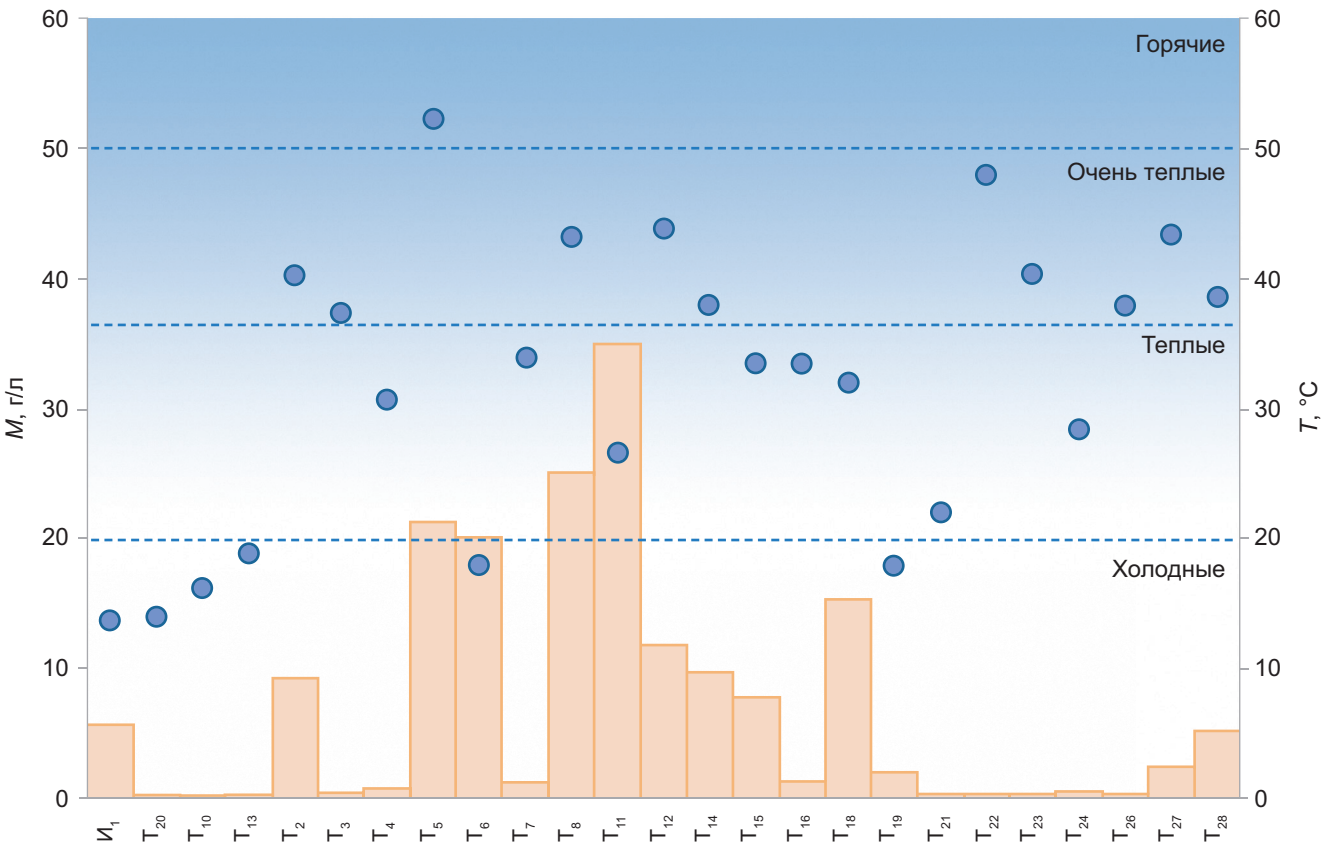


Рис. 4. Распределение минерализации (M , г/л) и температуры (T , °C) в исследуемых пробах природных вод

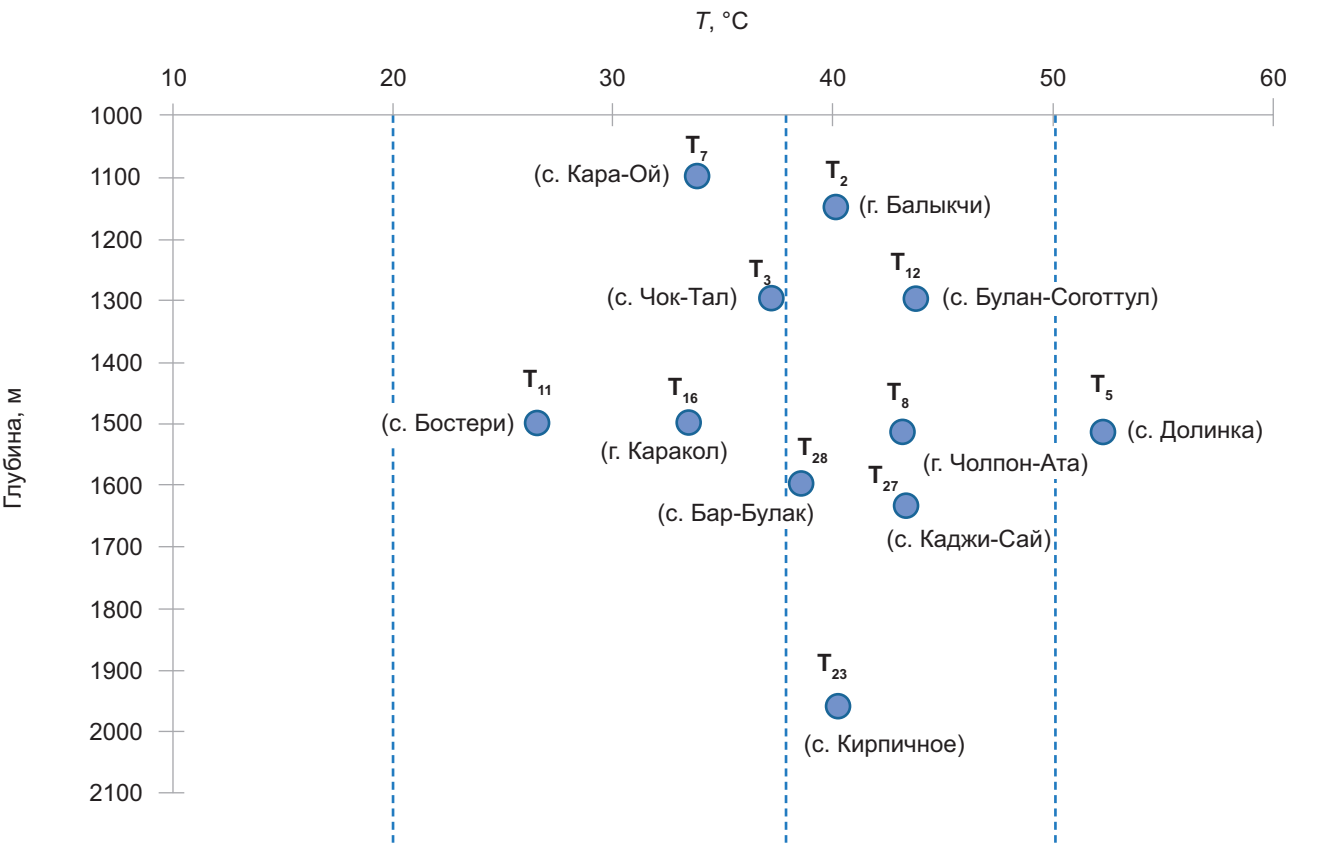


Рис. 5. Зависимость температуры термоминеральных вод от глубины их опробования

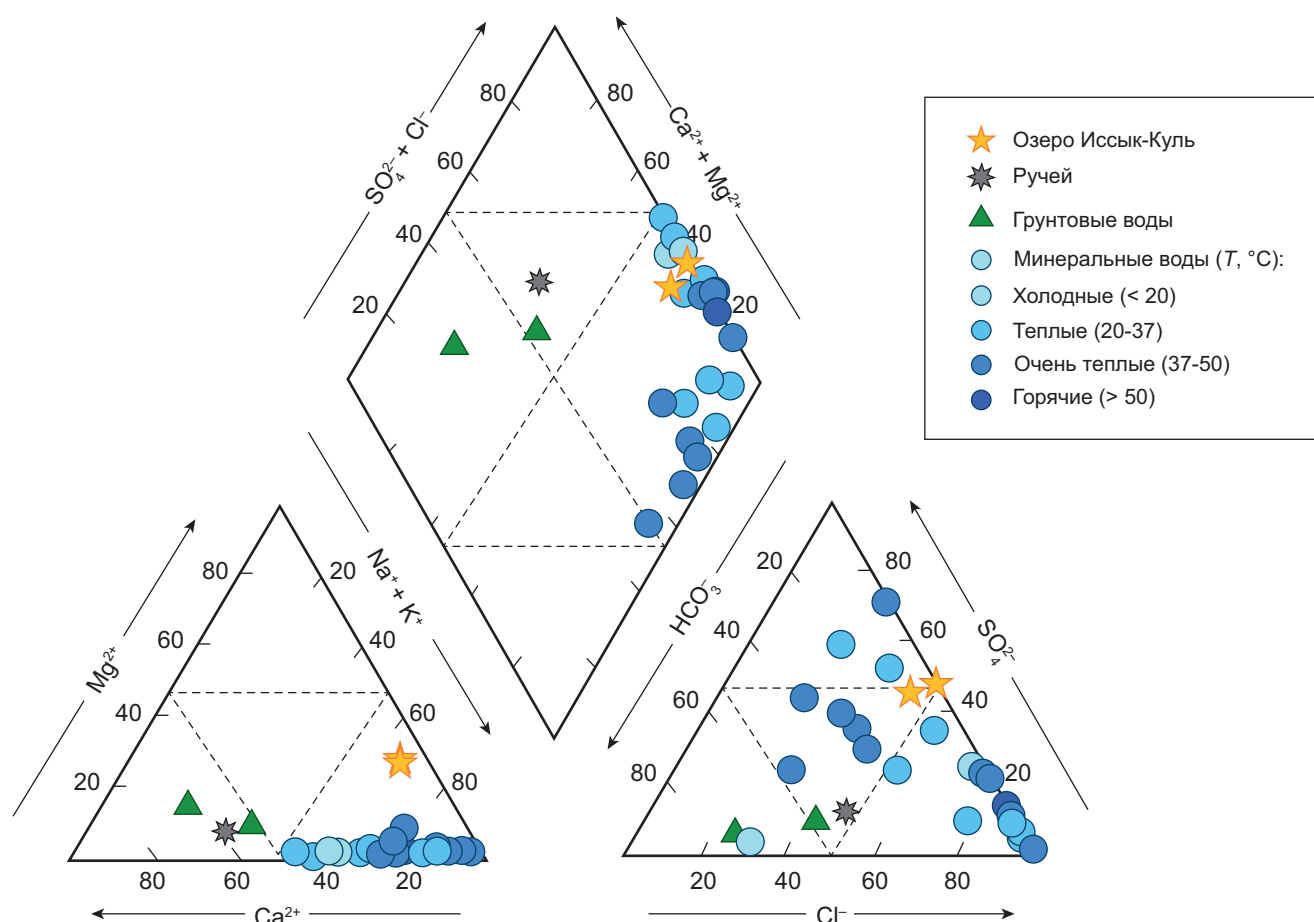


Рис. 6. Диаграмма Пайпера для исследуемых природных вод Иссык-Кульского артезианского бассейна

По химическому составу воды осадочного чехла Иссык-Кульского бассейна преимущественно Cl-SO_4 ($\text{SO}_4\text{-Cl}$)– Na (Na-Ca) типа. В целом, фиксируется прямая зависимость содержания сульфат-иона от минерализации — чем выше концентрация SO_4^{2-} , тем выше минерализация.

В катионном составе исследуемых проб повсеместно преобладает ион натрия (от 61 до 98%-экв), в некоторых пробах наблюдается незначительное количество иона кальция (7÷46%-экв). Магний практически не встречается в данных водах (рис. 6).

Ионы натрия и хлора в водах осадочного чехла демонстрируют хорошую корреляционную зависимость с $R^2=0,9$ и соотношение 1:1, что указывает на единый источник обоих элементов, вероятнее всего, растворение галитовых толщ. В пробах T_2 , T_3 , T_4 и T_7 соотношение Na/Cl увеличивается до 4,2, демонстрируя дополнительный источник натрия, вероятно, это натрийсодержащие силикаты или извлечение натрия из глинистых фаз при катионном обмене.

Воды кристаллических массивов (горного обрамления Иссык-Кульского артезианского бассейна) были опробованы в источниках ущелья Джети-Огуз (T_{18} , T_{19} , T_{21}), Ак-Суу (T_{22}), Джууку (T_{26}) и с. Чон-Кызыл-Суу (T_{24}). Термоминеральные воды кристаллических массивов преимущественно низкоминерализованные 0,3÷0,5 г/л и в них при-

сутствует значительное количество HCO_3^- , превышающего 20%-экв. (табл. 1). В редких случаях воды кристаллических массивов демонстрируют повышенную минерализацию до 12,5 г/л (T_{18} , Джети-Огуз) и принадлежат к Ca-Na-Cl ($\text{SO}_4\text{-Cl}$) типу, что, по-видимому, обусловлено смешением сильно минерализованных вод из артезианского бассейна с водами низкой минерализации, формирующихся в кристаллических массивах. Различные пропорции смешения вод приводят к широкому спектру получаемой минерализации.

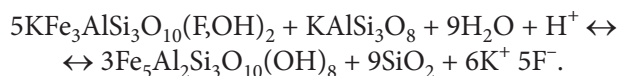
В анионном составе практически всех опробованных минеральных вод преобладает хлорид-ион (содержание Cl^- варьирует от 32 до 94%-экв). Сульфатность термоминеральных вод гидрогеологических массивов довольно высокая 20÷100, за исключением воды из точки T_{18} , содержащей значительное количество хлорид-иона (94 %-экв).

В катионном составе минеральных вод всегда преобладает ион натрия (от 54 до 95%-экв); далее следует кальций, достигая в некоторых пробах 40%-экв., магний практически отсутствует в опробованных источниках (рис. 6). Молярное соотношение Na/Cl больше 1 и находится в диапазоне 1,2÷2,9, указывая на поступление натрия при растворении натрийсодержащих плагиоклазов скальных пород, сложенных крупнокристаллическими биотитовыми гранитами

и гранодиоритами. В двух точках T_{18} и T_{19} молярное соотношение Na/Cl значительно <1 , составляет 0,5 и 0,8 соответственно, указывая на возможное удаление натрия при реакции катионного обмена между водой и породами.

Сопоставление солевого состава вод и места их циркуляции показывает, что минерализация термоминеральных вод, приуроченных к гидрогеологическим кристаллическим массивам, значительно ниже, чем в водах, циркулирующих в осадочном чехле артезианского межгорного бассейна. В катионном составе всех исследуемых проб, главным образом, превалирует ион натрия (табл. 4), а в анионном — ионы хлора, сульфата и гидрокарбоната. Пропорции соотношения данных анионов меняются и сильно зависят от состава водовмещающей толщи. Величина коэффициента rNa/rCl варьирует от 0,5 до 4,2 и, в целом, хорошо соотносится с минерализацией воды — чем выше минерализация, тем ниже коэффициент. Исключение составляет только точка T_2 , в которой при минерализации ($M_{расч}$) 10,7 г/л, значение коэффициента составляет 2,4.

Во многих пробах выявлены повышенные содержания иона фтора, количество которого варьирует от 2,2 до 19,2 мг/л (табл. 1). Наибольшие концентрации элемента характерны для вод (T_7 , T_{22} , T_{23} , T_{24} , T_{26} и T_{27}), циркулирующих в скальных породах. Высокие значения фтора в водах скальных массивов обусловлены его активным извлечением из водовмещающих толщ в условия повышенных температур. Основными фторсодержащими минералами изучаемых вод являются биотит, мусковит и фосфаты. Так как индекс насыщения фосфатов больше единицы, то они не будут растворяться в данных условиях, соответственно, можно предположить, что основным источником фтора являются силикаты. Вынос фтора, вероятнее всего, происходит из слюд, согласно следующей реакции [Seelig, 2010]:



В водах, циркулирующих в скальных массивах, наблюдается положительная корреляция с $R^2=0,7$ между F^- и H_4SiO_4 , а также с температурой, что позволяет утверждать о единстве источников обоих компонентов. Таким образом, фтор поступает в данные термоминеральные воды в результате гидролиза алюмосиликатных минералов.

В термоминеральных водах межгорного артезианского бассейна (T_2 , T_5 , T_6 , T_8 , T_{11} и др.) содержание фтора обычно очень низкое, менее 0,3 мг/л, так как породы осадочного чехла обеднены этим элементом.

Количество Br^- в изученных пробах сильно варьирует и находится в диапазоне значений 0,1÷11,6 мг/л. По содержанию брома данные термоминеральные воды подразделяются на три группы: к первой группе относятся воды с очень низкой концентрацией $< 0,1$ мг/л, ко второй — воды с умерен-

ным содержанием (диапазон 0,1÷3,3 мг/л), и к третьей — воды с высокими концентрациями $>8,8$ мг/л.

Бор в изученных водах варьирует в широких пределах от 0,2 до 19,4 мг/л (как B^-) и по его содержанию все воды, как и в случае с бромом, логично разделить на три группы. В первую группу отнесены термоминеральные воды с низкими значениями компонента ($<1,7$ мг/л). Они являются трещинно-жильными водами кристаллических массивов. Во вторую группу выделены воды с очень высокими концентрациями бора ($>11,0$ мг/л). Третья группа — воды с промежуточными значениями бора (1,7÷11,0 мг/л). Воды второй и третьей групп являются пластовыми водами межгорного артезианского бассейна. Наибольшие концентрации этих микрокомпонентов характерны для вод, циркулирующих в палеоген-неогеновых и юрских отложениях, в интервале глубин 1300–1600 м.

В целом, содержание брома и бора в водах закономерно увеличивается с повышением минерализации (рис. 7). Во всех проанализированных пробах геохимический маркер Cl^-/Br^- высокий и превышает значение 300, характерное для морской воды. В водах скальных массивов $Cl^-/Br^- \approx 1000$, а в водах артезианских толщ хлорбромный коэффициент варьирует от $n \cdot 10^3$ до $n \cdot 10^5$. Это указывает на два независимых источника брома в термоминеральных водах Иссык-Кульской котловины. В водопунктах T_3 , T_6 , T_8 , T_{11} , T_{12} и T_{14} выявлена практически прямая корреляционная зависимость между Cl^- и Br^- с $R^2=0,7$, что указывает на единый источник элементов — испарительное концентрирование исходных морских рассолов. В остальных пробах, бром поступает в термоминеральные воды из водовмещающих толщ (галитовых или кристаллических массивов), содержащих изначально невысокие концентрации элемента. Следовательно, формирующиеся воды будут иметь низкие содержания брома.

Содержание кремния в термоминеральных водах Иссык-Кульской впадины сильно варьирует от 12,0 до 23,7 мг/л. Наибольшее содержание кремния (27,0 мг/л) обнаружено в пробе T_{18} , отобранной в зоне развития гранитоидов из скважины на территории санатория Джети-Огуз, где температура на выходе составляет 32,0°C; а также в пробе T_{27} (южная часть межгорного артезианского бассейна, с. Каджи-Сай), отобранной из скважины на глубине около 1600 м, с температурой на выходе 43,4°C. Стоит отметить, что термоминеральные воды из водопунктов T_3 , T_{11} , T_{18} , T_{19} , T_{23} , T_{26} и T_{27} по концентрации кремния в пересчете на метакремниевую кислоту незначительно превышают бальнеологический порог в 50 мг/л, рекомендованный в классификации В.В. Иванова и Г.А. Невраева [Иванов, 1964]. Содержание метакремниевой кислоты (H_2SiO_3) составляет в данных пробах 54,8; 53,8; 66,0; 56,4; 56,4; 57,0 и 57,7 мг/л, соответственно. В остальных пробах концентрация кремния ниже, однако она выше 20 мг/л, и эти воды в соответствии с ГОСТ Р 54316-

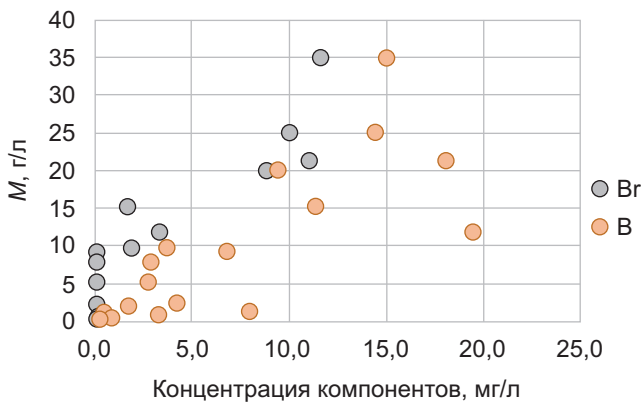


Рис. 7. Взаимосвязь содержания бром-иона и бор-иона (мг/л) от минерализации (г/л) в исследуемых минеральных водах

2020 [ГОСТ, 2020] считаются малокремнистыми, тем самым, могут применяться для терапевтических целей при лечении болезней желудочно-кишечного тракта.

Прямой зависимости между температурой вод и содержанием в ней кремния нет, однако более холодные воды имеют значительно более низкую концентрацию элемента, чем горячие. Нет и зависимости между концентрацией кремния в воде и условиями формирования термоминеральных вод, что логично, так как силикатные/алюмосиликатные минералы широко распространены как в кристаллических массивах, так и в осадочных толщах Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна.

Результаты расчета B/Cl генетического коэффициента показывают, что во всех пробах за исключением точек T_4 и T_8 его значение очень низкое $0,001 \div 0,004$. В водопунктах у с. Байет (T_4) и Кара-Ой (T_8) значение B/Cl на порядок выше и составляет 0,04. В гидротермах областей современного вулканизма B/Cl отношение в среднем составляет $0,01 \div 0,2$ [Киреева, 2017], что может быть связано

с резким увеличением содержания эндогенного бора в вулканических водах. Наши данные показывают, что во всех изученных термоминеральных водах Иссык-Кульской впадины, за исключением двух водопунктов, бор имеет экзогенное происхождение. В точках T_4 и T_8 возможно имеется и дополнительный источник элемента — эндогенный флюид, поступивший в воды по открытым трещинам.

Содержание общего углерода ($C_{общ}$) и азота в исследуемых пробах указывает на значительное преобладание неорганического углерода (рис. 8, табл. 3). Незначительные содержания $C_{орг}$ прослеживаются в природных минеральных водах осадочных отложений. При этом, корреляционной связи между содержанием $C_{орг}$ в минеральных водах и их минерализацией, а также химическим составом установлено не было.

Содержание стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}O$) и водорода (δD) в исследуемых природных водах Иссык-Кульского артезианского бассейна варьируют в широком диапазоне от $-13,9$ до $-8,5$ ‰ для $\delta^{18}O$ и от $-95,8$ до $-66,0$ ‰ (рис. 9, табл. 5). Вода озера Иссык-Куль, а также атмосферные осадки ложатся на линию испарения, что свойственно поверхностным водам исследуемого региона. Большая часть фигуративных точек изотопного состава термоминеральных вод на бинарной диаграмме в координатах $\delta^{18}O_{SMOW} - \delta D_{SMOW}$ располагается вдоль глобальной линии метеорных вод [Craig, 1961], что указывает на их инфильтрационный генезис (рис. 9).

Таким образом, по своему генезису минеральные воды изучаемого региона являются, преимущественно, метеорными, о чем свидетельствуют результаты изотопного анализа состава воды. Вместе с тем, кислородные сдвиги влево и вправо указывают на неравновесное изотопное фракционирование в системе вода-порода-газ. Сдвиг влево, как правило,

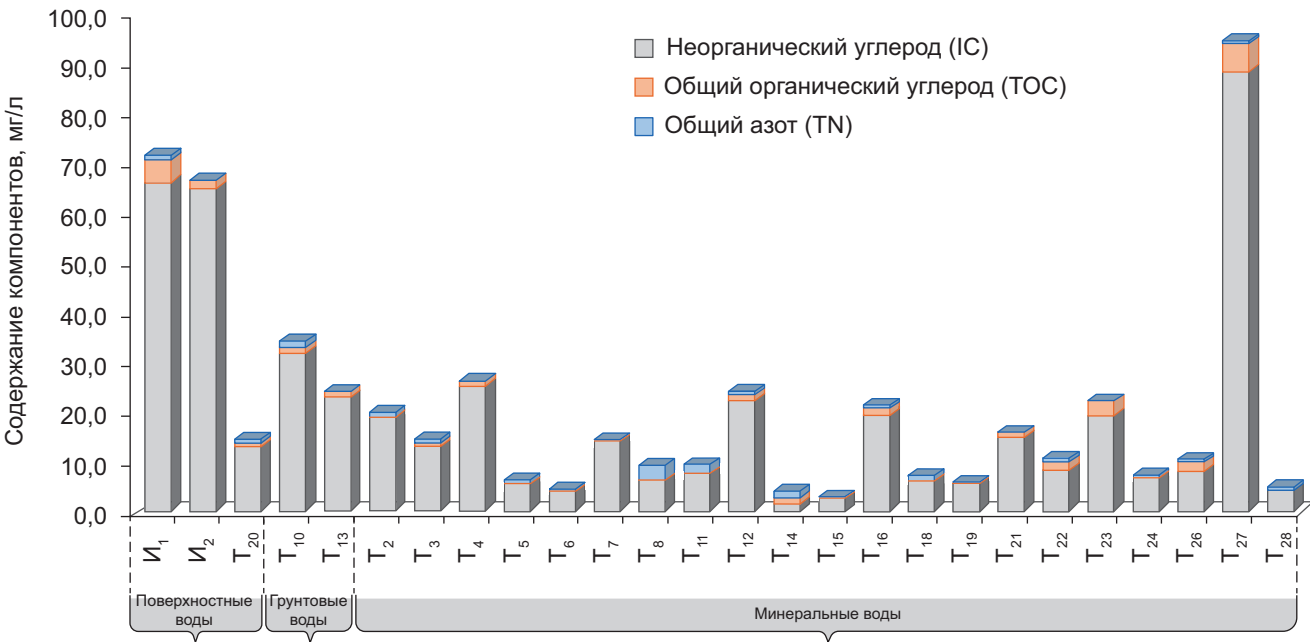


Рис. 8. Распределение различных форм углерода и азота в пробах природных вод Иссык-Кульского артезианского бассейна

характерен для обмена изотопа кислорода между углекислым газом и водой, а сдвиг вправо характерен для изотопного обмена между кислородом воды и кислородсодержащими фракциями водовмещающих пород. В целом, чем выше температура воды и интенсивней реакция в системе вода-порода, тем значительнее изотопный сдвиг.

Для оценки «глубинных» температур прогрева термоминеральных вод нами были применены два катионных геотермометра: натрий-калиевый (Na–K) [Fournier, 1979]

$$T = \frac{1217}{1,438 + \log \frac{Na}{K}} - 273,15; \tag{1}$$

и калий-магниевый (K–Mg) [Giggenbach, 1988]

$$T = \frac{4410}{14 - \log \frac{K^2}{Mg}} - 273,15, \tag{2}$$

где Na, K и Mg — это концентрация элементов в пробе в мг/л.

Полученные при расчете температуры прогрева исследованных термоминеральных вод по Na–K геотермометру (1) демонстрируют широкий интервал значений от 21,4 до 144,8 °С, что указывает на различные глубины погружения и циркуляции вод. Температуры прогрева вод, рассчитанные с помощью K–Mg геотермометра (2) чуть выше, но также варьируют в широком диапазоне от 34,5 до 120,8 °С. Анализ полученных результатов показывает, что для вод кристаллических массивов наиболее адекватные температуры демонстрирует Na–K геотермометр, в то время как для пластовых вод артезианских бассейнов более применим K–Mg геотермометр. Следовательно, термоминеральные воды кристаллических массивов имеют более высокие температуры прогрева 52÷144 °С, чем пластовые воды артезианского бассейна (21÷69 °С). Диаграмма Гиггенбаха [Giggenbach, 1988] демонстрирует (рис. 10), что подавляющее большинство термоминеральных вод попадает в область «полного» либо «частичного равновесия» с породами, что указывает на применимость выбранных геотермометров для расчета.

Расчет глубины, на которую погружаются изучаемые воды, был проведен по формуле:

$$H = (T_p - T_b) / K + z_0, \tag{3}$$

где T_p — температура, полученная по геотермометру, T_b — средняя температура воздуха в регионе (взято значение 12 °С для Иссык-Кульской котловины), K — геотермический градиент территории (3,2 °С/м) и z_0 — глубина нейтрального слоя (15 м).

Полученные данные показывают, что глубина проникновения вод в кристаллических массивах значительно больше, чем в Иссык-Кульском межгор-

Таблица 5

Изотопная характеристика природных вод Иссык-Кульского артезианского бассейна

№	№ пробы	Пункт опробования	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$
			‰	
Атмосферные осадки				
1	T ₂₅	с. Чон-Кызыл-Суу	0,50	–2,59
Поверхностные воды				
2	I ₁	озеро Иссык-Куль	–0,96	–15,20
3	I ₂	озеро Иссык-Куль	–0,28	–12,47
4	T ₂₀	ручей в ущелье Джети-Огуз	–11,57	–73,04
Грунтовые воды				
5	T ₁₀	г. Чолпон-Ата	–11,74	–76,45
6	T ₁₃	с. Чон-Орукту	–11,83	–76,42
7	T ₁₇	г. Каракол	–13,54	–89,95
Минеральные воды				
8	T ₂	г. Балыкчи	–10,77	–74,76
9	T ₃	с. Чок-Тал	–11,15	–73,40
10	T ₄	с. Бает	–11,42	–76,17
11	T ₅	с. Долинка	–10,43	–78,49
12	T ₆	г. Чолпон-Ата	–9,32	–75,95
13	T ₇	с. Кара-Ой	–11,73	–79,05
14	T ₈	г. Чолпон-Ата	–10,09	–77,66
15	T ₁₁	с. Бостери	–8,48	–74,40
16	T ₁₂	с. Булан-Соготту	–9,29	–76,90
17	T ₁₄	с. Чон-Орукту	–11,34	–88,93
18	T ₁₅	с. Ой-Булак	–8,81	–83,47
19	T ₁₆	г. Каракол	–13,93	–95,78
20	T ₁₈	ущелье Джети-Огуз	–10,82	–77,81
21	T ₁₉	ущелье Джети-Огуз	–13,36	–91,47
22	T ₂₁	ущелье Джети-Огуз	–13,42	–89,37
23	T ₂₂	ущелье Ак-Суу	–13,73	–91,39
24	T ₂₃	с. Кирпичное	–11,75	–76,77
25	T ₂₄	с. Чон-Кызыл-Суу	–11,94	–77,24
26	T ₂₆	ущелье Джууку	–11,89	–77,33
27	T ₂₇	с. Каджи-Сай	–9,88	–67,79
28	T ₂₈	с. Бар-Булак	–9,53	–65,99

ном артезианском бассейне и составляет 3,0÷5,0 км и 1,7÷3,3 км соответственно. Наименьшая глубина циркуляции ~1,8÷2,5 км характерна для термоминеральных вод северного побережья озера Иссык-Куль в районе г. Чолпон-Ата, а наибольшая ~4,6÷5,6 км — для азотных термальных источников, изливающихся в ущельях Ак-Суу и Джууку.

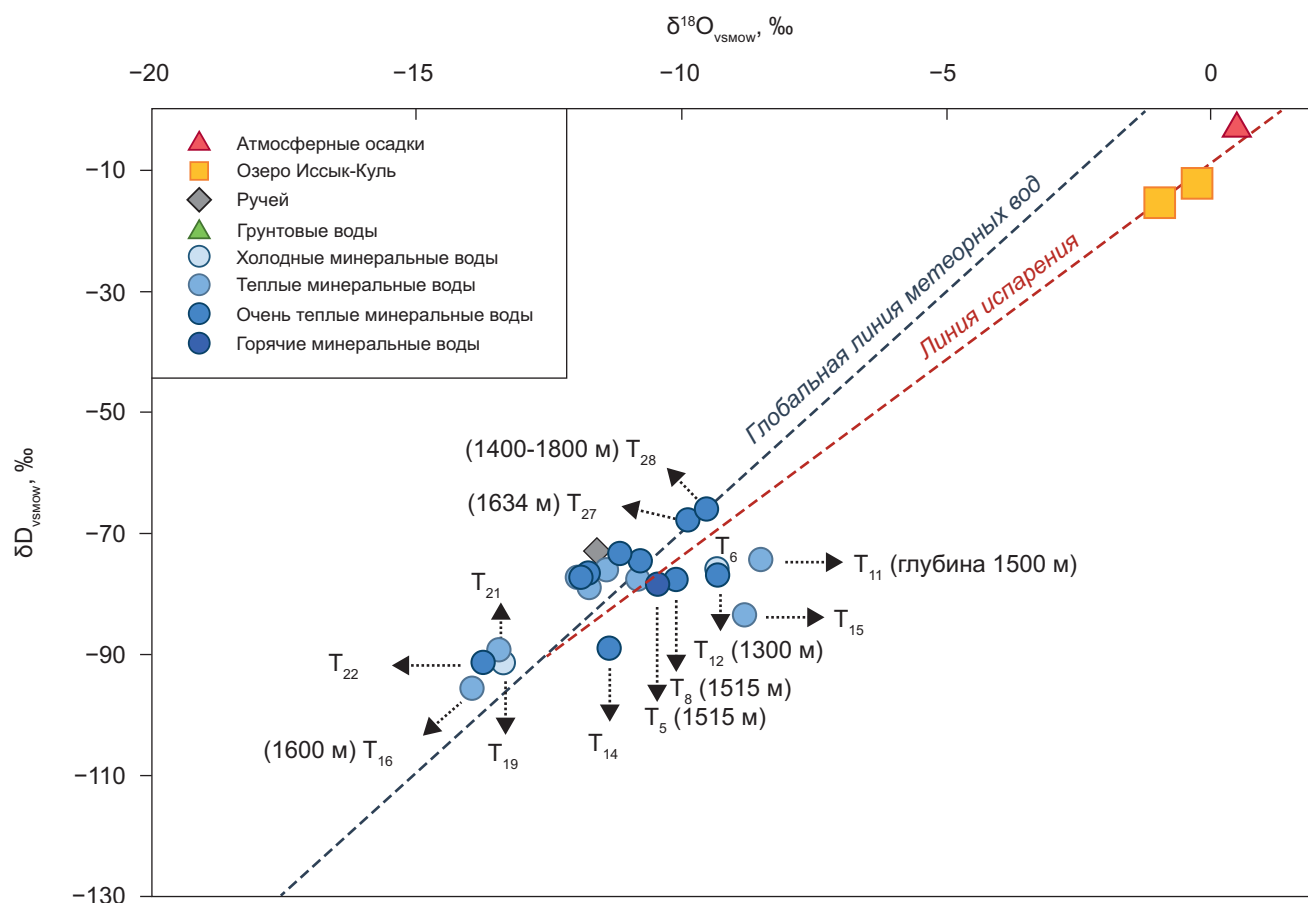


Рис. 9. Распределение изотопов δD и $\delta^{18}O$ в природных водах Иссык-Кульского артезианского бассейна

Заключение. Таким образом, результаты исследований показали, что основными процессами формирования химического состава минеральных вод региона являются процессы смешения инфильтрационных вод с глубинными трещинно-жильными водами, поступающими из пород фундамента по зонам тектонической трещиноватости, а также процессами выщелачивания из водовмещающих пород.

Геологическое и тектоническое строение рассматриваемого региона способствует формированию минеральных вод различного химического и газового состава: в пределах скальных пород и открытых трещин образуются углекислые воды незначительной минерализации, в случае присутствия значительной толщи осадочного чехла формируются углекислотно-азотные или азотно-метановые воды с минерализацией более 2,0 г/л (иногда значительно выше до 35,0 г/л).

Минерализация термоминеральных вод, приуроченных к кристаллическим массивам, значительно ниже, чем в водах, циркулирующих в осадочном чехле артезианского межгорного бассейна. В катионном составе всех исследуемых проб преобладает ион натрия, в анионном — ионы хлора, сульфата и гидрокарбоната. Пропорции соотношения анионов зависят от состава водовмещающей толщи.

Сульфат в исследуемых минеральных водах имеет различные источники: в водах скальных массивов

поступление SO_4^{2-} обусловлено окислением рассеянных сульфидов, поскольку здесь достаточно растворенного кислорода для протекания окислительного процесса, в то время как в пластовых водах осадочного чехла сульфат-ион поступает при разложении сульфатных пород, в изобилии представленных в водовмещающих толщах. Высокие концентрации фтора в водах скальных массивов обусловлены его активным извлечением из водовмещающих толщ в условия повышенных температур. Бром поступает в термоминеральные воды из водовмещающих толщ (галитовых или кристаллических массивов), содержащих изначально невысокие концентрации элемента, а также в результате процессов испарительного концентрирования исходных морских рассолов.

Полученные при расчете температуры прогрева исследованных термоминеральных вод по катионным геотермометрам демонстрируют широкий интервал значений и указывают на различные глубины погружения и циркуляции вод. Глубины погружения вод в кристаллических массивах значительно больше, чем в Иссык-Кульском межгорном артезианском бассейне и составляют 3,0÷5,0 км и 1,7÷3,3 км.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РФФ (проект № 23-27-00119 «Генезис и условия циркуляции термальных вод кристаллических массивов горноскладчатых областей»).

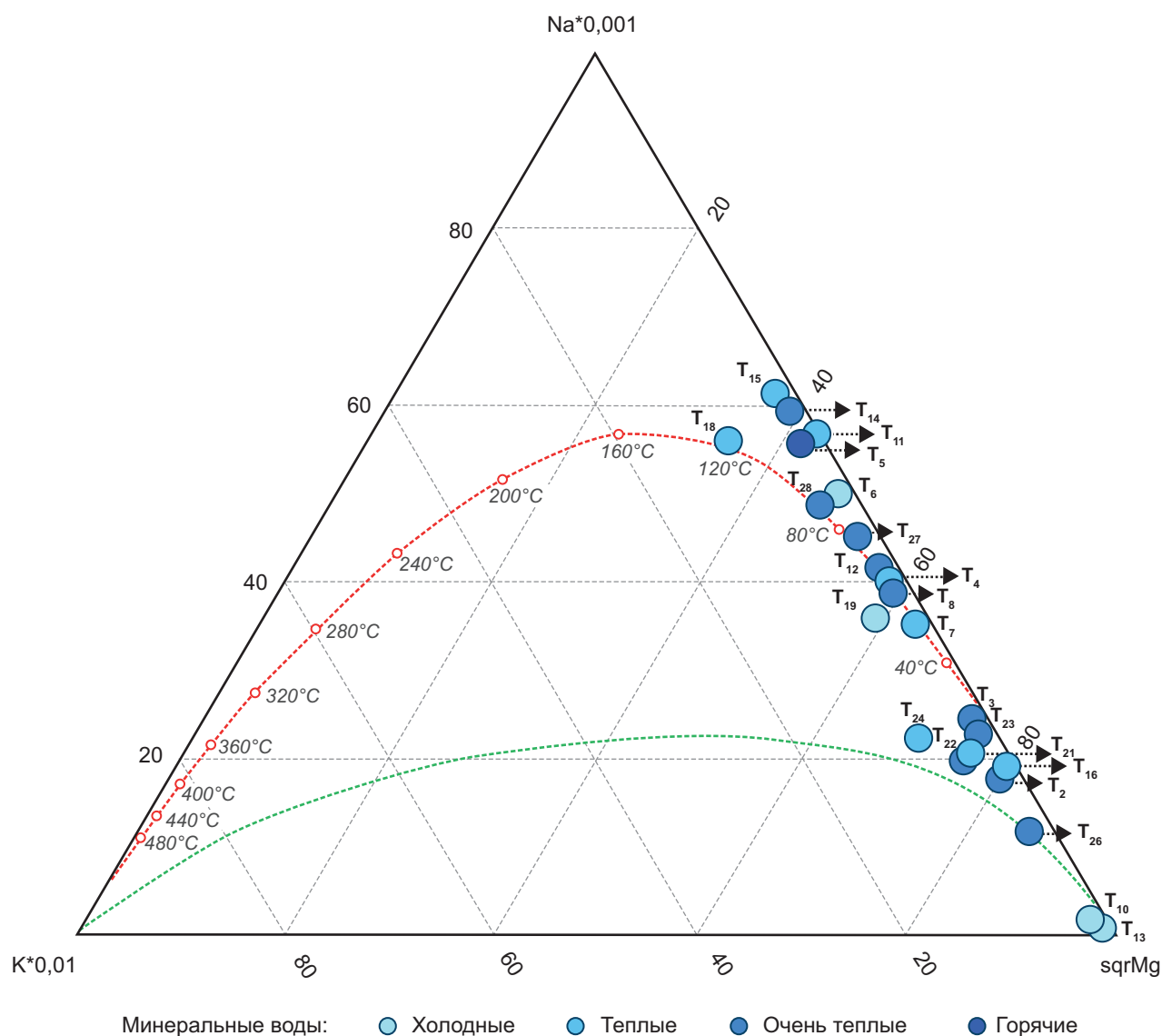


Рис. 10. Диаграмма Гигенбаха для исследуемых подземных вод

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ Р 54316-2020. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 44 с.

Григоренко П.Г. Принципы и схема регионального районирования Киргизской ССР // Изв. АН Кирг. ССР. 1968. Вып. 4. С. 7–14.

Гидрогеология СССР. Т. XL. Киргизская ССР / Гл. ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 1971. 487 с.

Иванов В.В. Классификация подземных минеральных вод / В.В. Иванов, Г.А. Невраев. М.: Недра, 1964. 168 с.

Катаева Н.И. Подземные минеральные воды Киргизской ССР / Н.И. Катаева, З.И. Мельникова, Р.Д. Барсуцкая и др.; М-во здравоохранения Кирг. ССР. Науч.-исслед. ин-т курортологии и физиотерапии. Фрунзе: Кыргызстан, 1969. 142 с.

Кендирбаева Дж.Ж. Подземные воды межгорных впадин — основа водообеспеченности Кыргызстана для устойчивого развития // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: Мат-лы XIII Всерос. научно-технич. конф. с международным участием. М.: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2023. С. 513–520.

Кендирбаева Дж.Ж. Пространственно-временное взаимодействие в системе «сейсмичность-термальные воды-солнечная неоднородность» на территории Кыргызстана // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2019. Т. 29, № 4. С. 110–124.

Киреева Т.А. Нефтегазопромысловая гидрогеохимия / МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет. М.: Макс пресс, 2017. 221 с.

Мандычев А.Н. Подземные воды Иссык-Кульского бассейна // Озеро Иссык-Куль: природные условия. Научные серии НАТО: IV. Земля и экологические науки. Т. 13. 2002. С. 71–76.

Мандычев А.Н. Ресурсы подземных вод глубоких горизонтов Восточно-Чуйского и Иссык-Кульского артезианских бассейнов // Высокогорные исследования: изменения и перспективы в 21 веке. Бишкек, 1996. С. 136–137.

Матыченков В.Е., Иманкулов Б.И. Минеральные воды Киргизии. Фрунзе: Илим, 1987. 251 с.

Минеральные воды СССР: Пояснит. записка к карте минер. вод СССР масштаба 1:4 000 000 / [Гл. ред. В.В. Иванов]; М-во здрав. СССР. ЦНИИ курортологии и физиотерапии. М., 1974. 324 с.

Шестакова А.В., Гусева Н.В. Применение геотермометров для оценки глубинных температур циркуляции термальных вод на примере Восточной Тувы / А.В. Шестакова, Н.В. Гусева // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 1. С. 25–36.

Bragin I.V., Zippa E.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. Estimation of the Deep Geothermal Reservoir Temperature of the Thermal Waters of the Active Continental Margin (Okhotsk Sea Coast, Far East of Asia) // Water. 2021. Vol. 13. No 9. P. 15.

Craig H. Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in natural waters // Science. 1961. Vol. 133, № 3466. P. 1833–1834.

Chelnokov G., Lavrushin V., Bragin I., et al. Geochemistry of Thermal and Cold Mineral Water and Gases of the Tien Shan and the Pamir // Water. 2022. Vol. 14. P. 838.

Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers // Geochimica et Cosmochimica. Acta 52. 1988. P. 2749–2765.

Fournier R.O. A revised equation for the Na/K geothermometer // Geothermal Resources Council. 1979. № 3. P. 221–224.

Seelig U., Bucher K. Halogens in water from the crystalline basement of the Gotthard rail base tunnel (central Alps) // Geochim. Cosmochim. Acta. 2010. № 9. P. 2581–2595.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024,
одобрена после рецензирования 03.06.2024,
принята к публикации 25.10.2024