

ГЕОХИМИЯ УГЛЕКИСЛЫХ ВОД ПРИРОДНОГО КОМПЛЕКСА ЧОЙГАН (северо-восток Тувы)

Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, К.Д. Аракчаа*, А.А. Хвашевская

Томский политехнический университет, 634050, Томск, просп. Ленина, 30, Россия

* Научно-исследовательский институт медико-социальных проблем и управления Республики Тува,
667000, Кызыл, ул. Ленина, 48, Россия

В углекислых водах природного комплекса Чойган исследована распространенность химических элементов, в том числе редких, редкоземельных и радиоактивных. По особенностям геохимической обстановки и химического состава выделены три группы вод: грунтовые воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки; грунтовые воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, обогащенные углекислотой; трещинно-жилые углекислые воды восстановительной геохимической обстановки. Установлено, что определяющим процессом при формировании химического состава подземных вод является их взаимодействие с горными породами, интенсифицируемое воздействием повышенной температуры и свободной углекислоты.

Углекислые воды, химический состав, взаимодействие воды с горными породами, Чойган, Тува.

GEOCHEMISTRY OF CARBON DIOXIDE MINERAL WATERS OF THE CHOIGAN NATURAL COMPLEX (northeastern Tuva)

Yu.G. Kopylova, N.V. Guseva, K.D. Arakchaa, and A.A. Khvashchevskaya

The abundance of various chemical elements (including trace, rare-earth, and radioactive) in the carbon dioxide mineral waters of the Choigan complex has been investigated. Three groups of waters are recognized according to the geochemical conditions and chemical composition: groundwaters of regional-jointing zone with oxidizing conditions; CO₂-enriched groundwaters of regional-jointing zone with oxidizing conditions; and groundwaters of fault zones with reducing conditions. It is shown that water-rock interaction intensified by high temperature and carbon dioxide action is the main process determining the chemical composition of groundwaters.

Carbon dioxide waters, chemical composition, water-rock interaction, Choigan, Tuva

ВВЕДЕНИЕ

На территории Евразии углекислые минеральные воды распространены в областях альпийской складчатости (Кавказ, Закарпатье, Памир и др.) и в зонах более древней складчатости, где они связаны с кайнозойской тектонической активизацией (Забайкалье, Алтай, Восточные Саяны и др.). В Сибири одним из районов распространения холодных и термальных углекислых вод являются Восточные Саяны, представляющие собой область современного и недавно потухшего вулканизма. Природный комплекс «Чойганские минеральные воды» находится на западном склоне Восточных Саян и крайнем северо-востоке Тувы в 2.5 км от границы с Бурятией на абсолютных отметках 1560—1580 м. Чойганские термальные и холодные источники — это потенциальное месторождение углекислых лечебных вод. Оно проявляется на поверхности разгрузкой подземных вод в виде холодных и термальных углекислых родников с уникальным составом биологически активных компонентов — радон, кремнекислота, углекислый газ, железо и др.

Этот уникальный природный памятник вызывает неизменный интерес ученых и исследователей. Начало их изучения связано с именами И.С. Крыжина (1858), С.В. Обручева (1945), В.Г. Ткачук (1955), Е.В. Пиннекера (1966—1967). Последующие исследования источников Чойгана на комплексной основе проводились в 90-х годах XX в. сотрудниками ТКО СО РАН (ныне ТИКОПР СО РАН) под руководством к.х.н. К.Д. Аракчаа и к.г.-м.н. К.С. Кужугета с привлечением ученых Иркутского государственного университета (руководитель — к.х.н. Г.М. Шпейзер) в 1989—1991 гг. и Томского политехнического университета (руководитель — к.г.-м.н. М.Б. Букаты) в 1992—1995 гг. Результаты исследований представлены в работах [Аракчаа и др., 1996, 2012а; Arakchaa et al., 2011]. Летом 2007 г. и в последующие годы изучение химического и газового состава родников Тувы, в том числе и углекислых вод, было продолжено сотрудниками ТИКОПР СО РАН с участием проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета [Рычкова и др., 2007, 2012; Копыло-

ва и др., 2009б, 2012; Пашагин, 2011; Kopylova et al., 2014]. Новые данные определения значений теплового потока, полученные с помощью изотопно-гелиевого метода, позволили выявить и пространственно оконтурить обширную положительную аномалию теплового потока на востоке Тувы [Соколова, Дучков, 2008; Рычкова, 2009; Дучков и др., 2010; Рычкова, Оюн, 2012], возможно, обусловленную подъемом астеносферы до 60—70 км. Эта тепловая аномалия является продолжением изотопно-гелиевой аномалии юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны, в пределах которой наблюдается проявление термальных вод [Кустов, Лысак, 2000; Рычкова, 2009; Плюснин и др., 2013], и с ней также связано развитие термальных вод северо-востока Тувы. Углекислые Чойганские термы, выводимые на поверхность глубинным широтным разломом, характеризуются высоким изотопным отношением гелия, что позволяет предполагать магматогенное происхождение содержащегося в них CO_2 [Рычкова, Оюн, 2012].

Вместе с тем до настоящего времени не обоснованы механизмы формирования химического состава разгружающихся на территории природного комплекса Чойган углекислых подземных вод, не исследован характер геохимической обстановки, распространенность в них широкого комплекса химических элементов, в том числе редких, редкоземельных и радиоактивных.

В этой связи, целью настоящей публикации является обоснование механизма формирования химического состава подземных вод природного комплекса Чойган и выявление степени влияния таких факторов, как повышенная температура, наличие свободной углекислоты, характер геохимической обстановки и состояние термодинамического равновесия вод с минералами горных пород.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются углекислые подземные воды природного комплекса Чойган, располагающиеся на северо-востоке Тувы. Минеральные источники этого комплекса связаны с крупным широтным разломом в докембрийских породах (гнейсы, мраморы, сланцы), прорванных гранитами и диоритами палеозоя [Аракчаа и др., 2012б, 2013]. Водовмещающие породы представлены верхнепротерозойским комплексом айлыгской свиты, сложенной мраморами, слоистыми мраморизованными известняками с прослоями сланцев, кварцитов, конгломератов и прорванной девонскими интрузиями гранитов бреньского комплекса. Глубина циркуляции термальных подземных вод Чойгана оценивается в 1500—2000 м [Пиннекер, 1968]. Разгрузка углекислых термальных и холодных вод в природном комплексе приурочена к зоне сопряжения Окинского и Азасского грабенов [Пиннекер, 1968; Рычкова, 2009; Аракчаа и др., 2012а; Аржанникова и др., 2013], происходит в тектоническом блоке, ограниченном разрывными нарушениями северо-восточного и северо-западного направлений, и сопровождается отложениями современных травертинов.

Природные условия и высокая тектоническая нарушенность участка, определяющая хорошие коллекторские свойства вмещающих пород, создают благоприятные условия для накопления подземных вод. Этому способствуют происходящие и в настоящее время современные смещения земной коры Алтае-Саянского региона [Тимофеев и др., 2014].

Комплексные экспедиционные исследования вод природного комплекса Чойган были проведены в 2011 г., в процессе которых обследовано 33 источника подземных вод (рис. 1). Координаты родников определялись с помощью GPS навигатора.

Выходы подземных вод локализованы на нескольких участках — южной, центральной и северной частях изучаемого отрезка долины р. Аржан-Хем с абсолютными отметками 1560—1580 м. Разгрузка подземных вод отмечается вдоль подножия правого коренного склона на поверхности первой речной террасы (источники 2—8, 11—13) и непосредственно в пойме у правого (источники 1, 10, 15—17, 23—27) и левого берегов реки (источники 28—31). Разгрузка минеральных вод Чойгана идет также по руслу р. Аржан-Хем. Вокруг источников широко развиты отложения травертинов (см. рис. 1). На правом коренном склоне выше дна долины на 300—350 м расположен источник 33. На левом берегу р. Аржан-Хем находится источник 29, который представляет собой лизиметрические воды, просачивающиеся в небольшую скальную пещеру.

В процессе полевых исследований на месте отбора всех проб определяли неустойчивые параметры состава вод: температуру, pH, Eh, удельную электрическую проводимость с использованием портативного мультипараметрового анализатора Water Test фирмы Hanna. Воду для анализа макрокомпонентного состава отбирали в пластиковую посуду объемом 1 л. Для микрокомпонентного анализа пробы отбирали в пластиковые пробирки с малой сорбционной способностью объемом 50 мл. Ионная составляющая химического состава вод исследовалась методами турбидиметрии, титриметрии, колориметрии и ионной хроматографии.

Микрокомпонентный состав вод изучали с использованием масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой на приборе NexION 300 фирмы Perkin-Elmer. Исследование проводили по программе общего количественного анализа. Газовый состав вод определяли хроматографическим методом на приборе «Кристалл 2000М».

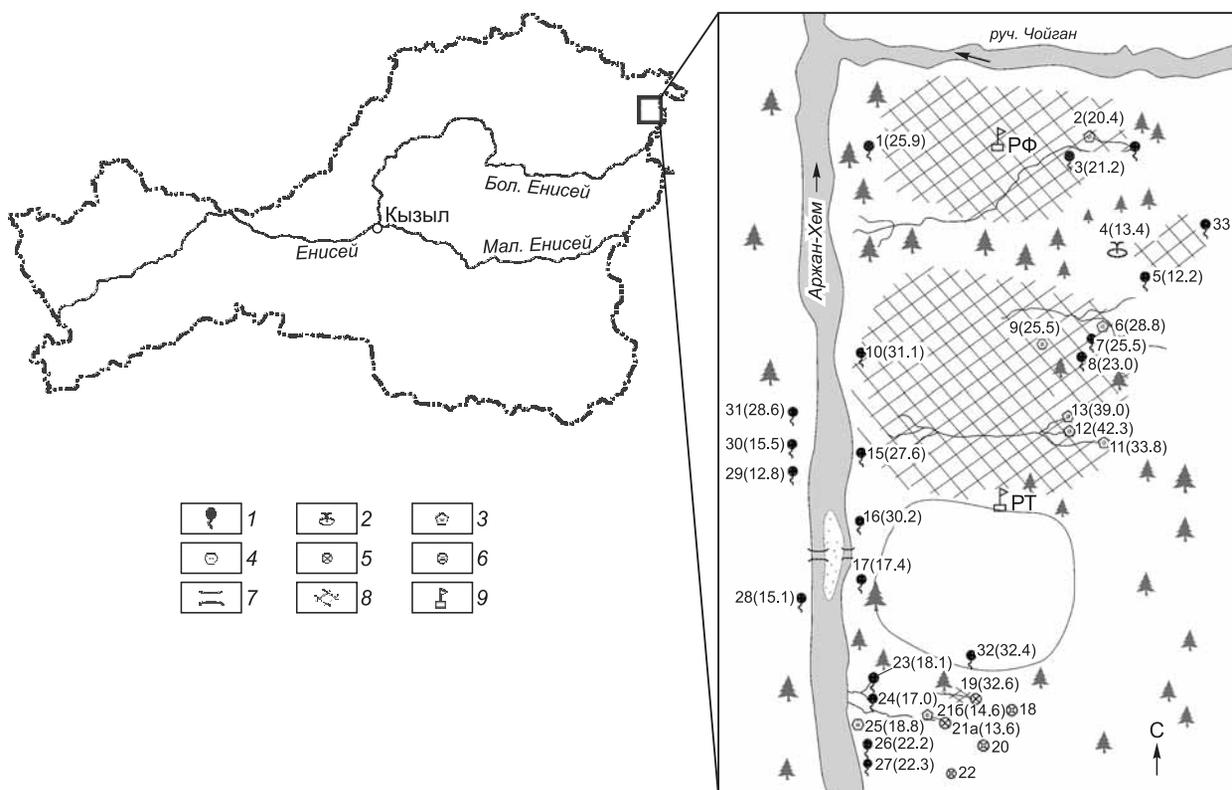


Рис. 1. Карта-схема расположения родников природного комплекса Чойган, по [Пиннекер, 1968] с дополнениями К.Д. Аракчаа.

1 — источник и его номер, 2 — источник основной, питьевой, 3 — ванна в срубе, 4 — грязевая ванна, 5 — воронка с водой, 6 — сухая воронка, 7 — мост, 8 — травертиновое поле, 9 — флагшток.

Родники: 1 — гастритный, 2 — ванна в срубе, холодная, от болезней нервной системы, 3 — от болезней мочеполовой системы, 4 — основной питьевой, 5 — от давления, 6 — ванна в срубе, теплая, 7, 8 — от болезней почек (левой и правой соответственно), 9 — грязевая ванна, теплая, 10 — легочный, 11 — ванна в срубе, детская, 12 — ванна в срубе, горячая, 13 — ванная в срубе, горячая, 15 — почечный основной, 16, 17 — носоглотка, 18 — сухая воронка, глубокая, 19 — воронка с водой, ист. «Молочный», 20 — сухая воронка, неглубокая (не используется), 21a — воронка с водой, ист. «Молодость», 21b — сруб с душем, каптированным от ист. «Молодость», 22 — сухая воронка, неглубокая, 23 — источник «Мама Зина», 24 — источник «Кара-кыс», 25 — грязевая ванна, холодная, 26 — печеночный, 27 — желудочный, 28 — от ангины, 29 — глазной, 30 — от головных болезней, 31 — сердечный, 32 — источник «Севек Миша», 33 — верхний. Цифры в скобках — температура воды.

Аналитические исследования вещественного состава вод выполнены в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Для определения стадии взаимодействия подземных вод проведена оценка степени их насыщенности вторичными минеральными продуктами: гиббситом, каолинитом, монтмориллонитом, гидрослюдай, кальцитом, доломитом, магнезитом, сидеритом, стронцианитом, витеритом, ангидритом, целестином и баритом. В основу изучения геохимических процессов в системе вода—порода положены методы равновесной термодинамики и анализ элементарных реакций, начальными продуктами которых являются основные породообразующие минералы и вода, конечными — вторичные минералы, а также ионы и нейтральные молекулы, перешедшие в жидкую фазу. Расчеты проводились согласно методикам, изложенным в работах [Гаррелс, Крайст, 1968; Зверев, 1982]. Для визуализации результатов расчета представлены широко используемые в гидрогеохимии диаграммы полей устойчивости алюмосиликатных, карбонатных и сульфатных минералов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ гидрогеологических и гидрогеохимических особенностей проявления подземных вод Чойгана позволяет в пределах рассматриваемой территории выделить следующие типы вод: грунтовые воды окислительной обстановки зоны региональной трещиноватости (родник 33 и лизиметрические

Таблица 1.

Химический состав грунтовых вод зоны региональной трещиноватости окислительной обстановки природного комплекса Чойган

Но- мер род- ника	T, °C	Rn, Бк/л	Eh, мВ	pH	CO ₂ св	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃	ОЖ, мг- экв./л	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ионов	Si	Fe _{общ}	F	Li	
					мг/л					мг/л										
Грунтовые воды, обогащенные углекислотой																				
21a	15	51	224	6.2	370	824	62.7	3.6	2.3	12.3	225.0	12.5	62.5	10.4	1426	8.5	0.1	0.4	0.18	
26	23	115	217	6.37	520	1354	30.7	12.2	0.2	14.2	249.1	20.8	193.5	24.5	1737	16.7	0.1	0.6	0.42	
27	22	—	240	6.27	788	1190	22.9	11.3	0.2	12.1	216.5	19.4	173.5	21.7	1611	14.2	0.1	0.6	0.41	
25	16	93	199	6.74	352	1098	58.3	14.8	1.4	14.4	255.0	20.0	108.0	24.7	1508	11.7	0.3	0.5	0.37	
23	17	122	182	6.67	253	952	59.2	7.2	1.6	12.1	217.9	14.4	104.0	15.6	1100	10.3	0.1	0.6	0.34	
24	17	—	140	6.59	209	936	58.5	6.1	1.9	11.7	210.8	14.3	106.7	16.1	1213	9.9	0.0	0.7	0.30	
17	20	74	156	6.20	462	1232	53.4	7.3	3.4	14.4	261.0	17.1	139.8	20.0	1908	12.3	0.1	0.6	0.37	
28	15	354	216	6.27	308	1037	66.7	5.4	2.0	13.7	250.3	14.4	99.8	14.9	1520	10.8	0.1	0.4	0.26	
30	13	53	249	6.78	228	1001	43.9	6.8	1.0	12.7	227.3	16.2	105.7	14.5	1521	10.2	0.1	0.3	0.29	
5	17	126	247	6.03	528	720	7.9	7.3	1.3	7.6	132.8	11.2	96.3	18.3	1137	11.1	0.2	0.4	0.36	
4	12	71	180	5.82	314	512	6.9	4.2	1.0	6.6	119.6	8.2	38.0	8.6	711	8.3	0.1	0.2	0.14	
2	21	655	195	6.08	388	896	8.2	9.5	0.6	8.6	145.2	16.0	139.0	23.1	1222	13.9	0.0	0.6	0.39	
3	21	520	188	6.17	392	927	7.8	8.7	1.5	7.8	130.7	15.0	156.0	21.6	1256	12.8	0.0	0.6	0.42	
Фоновые воды																				
33	7	—	224	8.3	4.4	319	22.8	0.5	0.1	5.6	98.4	7.7	2.2	2.4	453	8.3	0.1	<0.1	0.01	
29	13	62	249	7.8	5.5	213	2.6	0.3	0.9	3.9	76.0	0.8	0.4	0.5	294	0.5	0.2	<0.1	0.01	

Примечание. Здесь и далее CO₂ св — свободная углекислота, ОЖ — общая жесткость, Fe_{общ} — железо общее подкисленных проб.

воды покровных отложений, родник 29); грунтовые воды окислительной обстановки зоны региональной трещиноватости, обогащенные углекислотой (табл. 1), и трещинно-жильные углекислые воды восстановительной обстановки (табл. 2). С гидродинамическими условиями питания и разгрузки вод связаны особенности геохимической обстановки и химический состав. Подземные воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, разгружающиеся вблизи коренного склона долины р. Аржан-Хем в роднике 33, являются холодными нейтральными гидрокарбонатными кальциевыми с минерализацией 453 мг/л (см. табл. 1) и рассматриваются далее как фоновые при характеристике метаморфизации состава природных вод под воздействием углекислоты и температуры подземных вод.

На остальной территории разгружаются теплые и холодные солоноватые с минерализацией до 2712 мг/л грунтовые воды окислительной обстановки, обогащенные углекислотой, и трещинно-жильные углекислые воды восстановительной геохимической обстановки (табл. 3).

По мере приближения к зоне разлома, совпадающей с руслом р. Аржан-Хем, наблюдается обогащение грунтовых вод углекислотой, поступающей вместе с радоном по зонам разрывных нарушений. При этом происходит повышение минерализации грунтовых вод от 711 до 1908 мг/л в холодных водах окислительной обстановки в роднике 17 с содержанием свободной углекислоты 462 мг/л. В теплых и горячих трещинно-жильных водах восстановительной обстановки минерализация вод повышается до 2712 мг/л в роднике 10 с содержанием свободной углекислоты 496 мг/л.

На участке южной (верхней) части рассматриваемого отрезка долины р. Аржан-Хем (выше моста, см. рис. 1) разгружаются преимущественно холодные со средней температурой 17.6 °C грунтовые воды окислительной обстановки, обогащенные свободной углекислотой. Воды слабокислые с pH от 5.82 до 6.74 с содержанием свободной углекислоты от 209 до 788 мг/л (в роднике 27) и значениями Eh от 140 до 249 мВ. Кроме повышенных значений окислительно-восстановительного потенциала, в среднем составляющих 202 мВ, на окислительный характер среды указывает и присутствие сульфат-иона в водах от 31 до 67 мг/л (см. табл. 1). Повышение температуры воды в роднике от 19 до 33 °C, разгружающегося в верхней части борта долины реки, сопровождается некоторым снижением окислительно-восстановительного потенциала до 142 мВ. При этом наблюдается повышение дебитов родников с понижением их отметок в нижних частях долины реки. Вместе с тем более глубокое залегание уровня грунтовых вод в верхних частях борта долины и его понижение к долине реки определяют появление безводных воронок с теплым углекислым газом. Можно предположить, что в целом на участке природного комплекса Чойган происходит снижение уровня грунтовых вод, что подтверждается наличием на этом участке долины реки сухих воронок с углекислым газом (родники 18, 20 и 22, см. рис. 1) и древних отложений

Таблица 2. Химический состав трещинно-жильных углекислых вод восстановительной геохимической обстановки природного комплекса Чойган

Номер родника	T, °C	R _n , Бк/л	E _h , мВ	pH	CO _{2св}	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃	ОЖ, мг-экв./л	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ионов	Si	Fe _{общ}	F	Li
					мг/л					мг/л									
1	25	123	46	6.52	356	1537	5.4	19.4	2.4	11.2	180.2	27.1	282.0	45.7	2097	24.8	2.5	1.1	0.85
10	31	64	24	6.48	496	1970	10.3	34.0	0.8	17.0	284.0	34.2	347.5	53.9	2712	23.2	1.6	1.2	0.91
15	27	106	51	6.39	484	1647	19.0	20.3	0.1	15.3	262.8	26.3	270.0	38.8	2265	24.8	0.9	0.9	0.81
9	28	947	12	6.76	352	1692	11.0	17.7	0.6	16.5	290.1	24.9	251.1	39.6	2302	19.9	0.5	0.9	0.92
6	31	370	34	6.35	407	1757	12.4	17.1	0.5	15.9	276.4	24.9	286.7	46.3	2420	21.3	1.7	1.1	0.80
7	21	204	-86	6.41	371	1732	9.1	16.3	0.1	15.8	275.5	24.8	279.6	41.8	2368	17.7	0.3	0.9	0.78
8	22	360	-68	6.32	277	1696	7.5	15.5	0.1	15.2	264.5	24.1	280.0	40.0	2353	19.1	0.2	1.0	0.72
13	39	112	20	6.63	326	1818	8.7	26.2	0.8	15.5	262.3	29.5	316.5	49.3	2511	24.9	1.4	1.2	1.04
12	37	139	55	6.56	333	1830	8.5	22.7	1.2	16.2	275.1	29.5	312.2	50.3	2515	25.4	1.3	1.2	1.08
11	29	310	86	6.45	349	1732	10.3	21.3	0.8	15.4	265.7	25.8	303.0	45.3	2413	20.3	0.4	1.0	0.87
31	27	58	137	6.47	380	1757	8.8	15.9	0.0	15.4	261.6	28.2	280.4	41.0	1976	21.3	0.3	0.9	0.73
16	30	90	16	6.48	408	1598	24.7	20.1	2.2	14.2	243.6	24.9	277.0	39.8	2222	19.0	1.6	1.0	0.84
19	33	8.51	142	6.75	361	1464	43.5	16.0	0.6	13.9	236.0	25.1	231.2	41.8	1928	17.5	5.4	0.9	0.88

травертинов. Кроме того, отмечается также замирание прежде существовавших водных воронок [Рычкова и др., 2012].

С углублением долины р. Аржан-Хем в центральной части территории наблюдается наиболее интенсивная разгрузка теплых и горячих вод, в том числе и на левом берегу долины. Вероятно, этому благоприятствует перекрытие фильтрационного потока подземных вод, вызванного наличием зон разрывных нарушений, пересекающих долину реки. На этом участке разгружаются теплые и горячие воды с температурой от 25 до 42 °С преимущественно восстановительной геохимической обстановки и значениями E_h от отрицательных значений в родниках 7 и 8 (-86 и -68 мВ) до 142 мВ. С понижением отметок выхода по борту долины наблюдается снижение температуры, видимо, за счет увеличения объема воды ближе к пойменной части долины. Вместе с тем разгрузка вод восстановительной обстановки сопряжена с интенсивным проявлением термодинамического барьера благодаря дегазации углекислого газа, нарушения карбонатного равновесия в водах и отложения травертинов.

На нижнем (северном) участке правого борта этого участка долины р. Аржан-Хем и левого борта ее притока руч. Чойган разгрузка подземных вод менее интенсивна, возможно, за счет дренирующего влияния долины ручья. Здесь разгружающиеся теплые воды также сопровождаются образованием травертинов. При этом наиболее теплые воды на этом участке отмечены в пойменной части долины в роднике 1, и им свойствен восстановительный характер геохимической среды. Выше по борту долины температура вод родников уменьшается, геохимическая обстановка становится окислительной, и при этом понижается минерализация вод (источники 2 и 3). Это происходит около коренного склона долины вблизи участка проявления холодных пресных вод (источники 4 и 5, см. табл. 1).

Наряду с температурой основным агентом выщелачивания химических элементов из горных пород является свободная углекислота, поступление которой в воды связано с интенсивным развитием на этой территории зон разрывных нарушений. Если в водах зоны региональной трещиноватости вмещающих отложений концентрация свободной углекислоты составляет первые единицы миллиграмм на литр, то поступление углекислого газа по зонам разрывных нарушений и его растворение в водах определяет наличие свободной углекислоты в количествах от 200 до 788 мг/л (см. табл. 1, 2). Как и следовало ожидать, в местах разгрузки горячих вод в центральной части участка Чойган содержания CO₂ наименьшие и составляют 275—350 мг/л. Наибольшие значения углекислоты в водах отмечены в северной части в теплых водах родников в пойме р. Аржан-Хем (источники 10 и 15) и на южном участке в родниках 27 (788 мг/л) и 26 (520 мг/л).

Наличие в водах угольной кислоты определяет слабокислый характер водной среды: pH вод при наличии в них углекислого газа изменяется от 5.82 при минерализации 711 мг/л и концентрации свободной углекислоты 314 мг/л (см. табл. 1) до 6.5 при минерализации 2515 мг/л и концентрации свободной углекислоты 333 мг/л (см. табл. 2). Более щелочные условия в солоноватых водах при практически одинаковых количествах углекислоты формируются вследствие поступления гидроксильной группы OH⁻, образующейся при гидролизе алюмосиликатов в условиях более длительного взаимодействия этих вод с горными породами. В роднике 27 с наибольшим количеством свободной CO₂ минерализация воды составляет 1611 мг/л при pH 6.27.

Таблица 3. Ионный состав подземных вод природного комплекса Чойган, %-экв.

Номер родника	Название и/или лечебное при- менение	T, °C	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	СумА = СумК	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Сумма ио- нов, мг/л
Трещинно-жильные углекислые воды восстановительной геохимической обстановки											
1	Гастритный	25	97	0	2	26	37	9	50	5	2097
10	Легочный	31	96	1	3	33	42	8	45	4	2712
15	Почечный (основной)	27	97	1	2	28	47	8	42	4	2265
9	Теплая грязевая ванна, суставы	28	97	1	2	28	51	7	38	4	2302
6	Ванна в срубе теплая, суставы	31	97	1	2	30	47	7	42	4	2420
7	Левая почка	21	98	1	2	29	47	7	42	4	2368
8	Правая почка	22	98	1	2	28	47	7	43	4	2353
13	Горячая ванна в срубе (левая)	39	97	1	2	31	43	8	45	4	2511
12	Горячая ванна в срубе (правая)	37	97	1	2	31	44	8	44	4	2515
11	Ванна в срубе детская	29	97	1	2	29	45	7	44	4	2413
31	Сердечный	27	99	1	1	29	46	8	43	4	1976
16	Носоглотка	30	96	2	2	27	45	7	44	4	2222
19	Воронка «Молочная ванна»	33	96	4	1	25	47	8	40	4	1928
Грунтовые воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, обогащенные углекислотой											
21а	Воронка с водой «Молодость»	15	88	9	3	15	74	7	18	2	1426
26	Печеночный	23	96	3	1	23	54	7	36	3	1737
27	Желудочный	22	97	2	1	20	52	8	37	3	1611
25	Грязевая ванна, суставы	16	93	6	1	19	65	8	24	3	1508
23	«Мама Зина»	17	92	7	1	17	64	7	27	2	1100
24	«Кара-кыс»	17	92	7	1	17	63	7	28	2	1213
17	Носоглотка (основной)	20	92	5	3	22	62	7	29	2	1908
28	От ангины	15	90	7	2	19	68	6	24	2	1520
30	Головной	13	93	5	2	18	64	8	26	2	1521
5	От давления	17	97	1	2	12	54	8	34	4	1137
4	Основной питьевой	12	97	2	1	9	70	8	19	3	711
2	Ванна в срубе, нервная система	21	97	1	2	15	48	9	40	4	1222
3	Мочеполовая система	21	97	1	2	16	43	8	45	4	1256
Грунтовые воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки											
33	Верхний	—	92	8	0	6	86	11	2	1	453
29	Глазной	13	89	8	3	4	78	17	3	2	294

Примечание. СумА — сумма анионов (мг-экв./л), СумК — сумма катионов (мг-экв./л).

Под воздействием свободной углекислоты в водах формируется гидрокарбонатный анионный состав вод с долей гидрокарбонатов от 89 до 99 %-экв., присутствием сульфат-иона до 9 %-экв. в водах окислительной обстановки в южной части и хлорид-иона до 3 %-экв. в водах восстановительной обстановки в центральной и северной частях комплекса Чойган (см. табл. 3). Наличие углекислого газа в трещинно-жильных водах и обогащение грунтовых вод зоны региональной трещиноватости углекислым газом способствуют повышению минерализации этих вод в основном за счет увеличения концентраций натрия, калия и хлора, в десятки и сотни раз превышающие их концентрации в фоновых водах. Увеличение концентрации других породообразующих элементов по сравнению с фоновыми водами наблюдается не более чем в три раза.

Катионный состав преимущественно кальциевый, но в водах зон разрывных нарушений восстановительной обстановки увеличивается процентное соотношение натрия до 50 %-экв., калия до 4 %-экв. и магния до 9 %-экв.

В водах восстановительной обстановки при явном преобладании кальция увеличиваются процентные соотношения натрия. В родниках 1 и 10, расположенных на наиболее низких отметках вблизи долины р. Аржан-Хем, отмечается преобладание натрия над кальцием. Здесь же в роднике 10 встречена наибольшая минерализация вод — 2712 мг/л (см. табл. 3).

Различия в изменении катионного состава вод четко проявляются в их солевом составе, где ясно видна приуроченность гидрокарбонатов натрия и магния к области распространения термальных углекислых вод восстановительной обстановки.

В холодных водах окислительной обстановки отмечается явное преобладание кальция над натрием: процентные соотношения кальция более чем вдвое превышают процентные соотношения натрия как в ионном, так и в солевом составе вод.

На участках поступления в грунтовые воды углекислого газа (вероятно, в зоне влияния разрывных нарушений) в концентрациях от 209 до 788 мг/л наблюдается снижение показателя кислотно-щелочных свойств вод — pH от 6.8 до 5.8 (при средних значениях 6.4) и повышение минерализации вод от 711 до 1908 мг/л. По ионному составу воды остаются гидрокарбонатными натриево-кальциевыми при средних концентрациях кальция — 234 мг/л, а натрия — 117 мг/л. Концентрации кремния в среднем составляют 12 мг/л, калия — 24.7 мг/л и лития — 0.33 мг/л (см. табл. 1).

В теплых и горячих трещинно-жильных водах восстановительной геохимической обстановки концентрации CO₂ составляют от 277 до 496 мг/л, pH изменяется от 6.32 до 6.76, а общая минерализация вод — от 1928 до 2712 мг/л при средних значениях 2314 мг/л. По ионному составу воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые с практически равными долями кальция и натрия, а в родниках 1 и 10 — кальциево-натриевые. Отличительной особенностью этих вод являются повышенные концентрации ряда биологически активных компонентов, в среднем составляющие (мг/л) для кремния — 22, железа — 1.4, фтора — 1.9, лития — 0.8, калия — 44. Концентрации кальция в среднем составляют 260, а натрия — 286 мг/л (см. табл. 2).

Таблица 4. Микрокомпонентный состав трещинно-жильных углекислых вод восстановительной геохимической обстановки природного комплекса Чойган (мг/л)

Элемент	Среднее содержание	Стандартное отклонение	Максимальное содержание	Элемент	Среднее содержание	Стандартное отклонение	Максимальное содержание
Li	0.83	0.13	1.09	Te*	0.00004	2.23	0.0002
Be	0.0004	5.51	0.005	I	0.02	0.006	0.025
B	0.18	0.02	0.22	Cs	0.03	0.004	0.04
Sc	0.001	0.0006	0.002	Ba	1.28	0.26	1.55
Ti*	0.008	3.05	0.20	La*	0.0004	3.95	0.006
V*	0.0005	4.04	0.01	Ce*	0.0006	5.24	0.01
Cr*	0.0002	3.69	0.008	Pr*	0.0001	5.60	0.001
Mn	0.25	0.10	0.41	Nd*	0.0002	5.83	0.006
Fe	1.46	1.19	4.39	Sm*	0.0001	4.89	0.001
Co	0.002	0.001	0.004	Eu*	0.0001	2.44	0.0003
Ni	0.005	0.005	0.02	Gd*	0.0001	5.75	0.001
Cu*	0.0009	2.79	0.008	Tb*	0.00008	6.22	0.0002
Zn*	0.004	2.43	0.03	Dy*	0.00005	5.48	0.0009
Ga*	0.00003	4.16	0.001	Ho*	0.00001	5.53	0.0002
Ge	0.003	0.002	0.005	Er*	0.00004	4.81	0.0004
As*	0.007	4.11	0.12	Tm*	0.00001	0.00002	0.0001
Se	0.02	0.03	0.08	Yb*	0.00004	3.49	0.0003
Br	0.32	0.31	0.78	Lu*	0.000006	5.90	0.0001
Rb	0.18	0.02	0.24	Hf	0.000001	0.000001	0.000003
Sr	4.66	0.52	5.49	Ta	0.000003	0.000004	0.00001
Y*	0.0007	2.91	0.005	W*	0.000023	5.13	0.0007
Zr	0.0001	0.00009	0.0003	Re*	0.000001	3.25	0.00001
Nb	0.000009	3.30	0.0002	Ir	0.0000003	0.0000006	0.000002
Mo*	0.0006	1.53	0.002	Au	0.0000001	0.0000002	0.000001
Ag	0.00002	0.00003	0.00008	Tl	0.000034	0.00002	0.0001
Cd	0.00002	0.00002	0.00007	Pb*	0.0001	4.20	0.004
In*	0.000001	4.94	0.00001	Bi*	0.000002	7.32	0.0001
Sn*	0.000004	5.30	0.00008	Th*	0.000006	5.35	0.0003
Sb	0.00003	0.00002	0.00006	U*	0.002	2.13	0.01

* Здесь и далее — распределение элемента подчиняется логнормальному закону.

Таблица 5. Микрокомпонентный состав грунтовых вод зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, обогащенных углекислотой, природного комплекса Чойган (мг/л)

Элемент	Среднее содержание	Стандартное отклонение	Максимальное содержание	Элемент	Среднее содержание	Стандартное отклонение	Максимальное содержание
Li	0.32	0.10	0.48	Te	0.000009	0.000007	0.00002
Be	0.0002	0.0002	0.0006	I	0.008	0.003	0.01
B	0.07	0.03	0.11	Cs	0.01	0.004	0.02
Sc	0.0003	2.67	0.003	Ba	0.43	0.18	0.77
Ti	0.002	0.0008	0.004	La*	0.0003	2.70	0.002
V	0.0005	0.0005	0.002	Ce	0.0002	0.0002	0.0006
Cr*	0.0001	1.39	0.0002	Pr*	0.0001	2.74	0.0003
Mn	0.007	0.005	0.02	Nd	0.0003	0.0003	0.001
Fe	0.09	0.03	0.17	Sm*	0.00004	2.35	0.0002
Co	0.0002	0.0001	0.0005	Eu	0.00005	0.00002	0.00007
Ni	0.002	0.001	0.005	Gd	0.00006	0.00004	0.0002
Cu	0.0006	0.0003	0.001	Tb	0.00001	0.000006	0.00002
Zn	0.003	0.001	0.005	Dy	0.00005	0.00003	0.0001
Ga*	0.000004	2.04	0.00002	Ho	0.00001	0.000007	0.00003
Ge	0.001	0.0007	0.002	Er	0.00003	0.00002	0.00009
As	0.0006	0.0003	0.00098	Tm	0.000004	0.000003	0.00001
Se	0.004	0.005	0.0097	Yb	0.00003	0.00002	0.00007
Br*	0.01	1.73	0.05	Lu	0.000005	0.000003	0.00001
Rb	0.07	0.03	0.11	Hf	0.0000004	0.0000006	0.000002
Sr	2.21	0.57	3.16	Ta	0.0000001	0.0000001	0.0000004
Y	0.0006	0.0004	0.002	W*	0.000003	2.54	0.00003
Zr	0.00003	0.00002	0.00009	Re	0.000003	0.000002	0.000006
Nb	0.000002	0.000001	0.000003	Ir	0.00000006	0.0000001	0.0000004
Mo	0.0008	0.0004	0.001	Au	0.00000003	0.00000009	0.0000002
Ag	0.000006	0.000007	0.00002	Tl	0.00002	0.00001	0.00004
Cd	0.00003	0.00002	0.00006	Pb*	0.00002	5.04	0.0004
In	0.0000002	0.0000002	0.0000005	Bi	0.0000005	0.0000006	0.000002
Sn*	0.000002	3.51	0.00002	Th*	0.000002	3.00	0.00003
Sb	0.00002	0.000005	0.00003	U	0.005	0.004	0.01

В газовом составе обнаружены углекислый газ — 61, азот — 35.5 и кислород — 3.5 об. %. Радон обнаружен в концентрациях до 655 Бк/л и чаще всего проявляется по зонам разрывных нарушений вблизи коренного склона долины предпочтительно в водах окислительной обстановки. Воды природного комплекса Чойган могут рассматриваться как аналог минеральной воды Терсинка и использоваться для внутреннего применения в качестве столовых напитков [ГОСТ Р 54316-2011..., 2011]. По критериям отнесения подземных вод к минеральным можно их охарактеризовать следующим образом: холодные, теплые и горячие воды слабокислые, маломинерализованные, слабоуглекислые, кремнистые с потенциально повышенными относительно подземных вод концентрациями лития, калия, фтора, железа.

Результаты исследования микрокомпонентного состава трещинно-жилльных вод восстановительной геохимической обстановки и грунтовых вод зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, обогащенных углекислотой, природного комплекса Чойган представлены в табл. 4, 5. Анализ степени обогащения рассматриваемых вод микрокомпонентами относительно фоновых вод показал, что концентрация ряда микрокомпонентов (Cr, Sn, In, Ir, Sb, Pb, Au, Th, U) находятся на уровне их содержания в фоновых водах (рис. 2). Наиболее благоприятные условия для накопления в углекислых, особенно в теплых, водах восстановительной обстановки отмечаются для Br, Be, Ge, Cs (с увеличением концентраций до 400 раз относительно фоновых значений), Se, Rb, Ho (более 200 раз), Li, Mn, I (около 100 раз) и Tm, As, B, Cd, Y, Sm, Y, Zr, Dy, Lu, Fe, Nd, Ba, La, Ce, Tl, Eu, Ta, Sc, Ag, Ga, Ni, V (в порядке уменьшения от 90- до 10-кратного превышения). Иллюстрация уровней накопления элементов в углекислых водах окислительной и восстановительной геохимических обстановок показана на рис. 2.

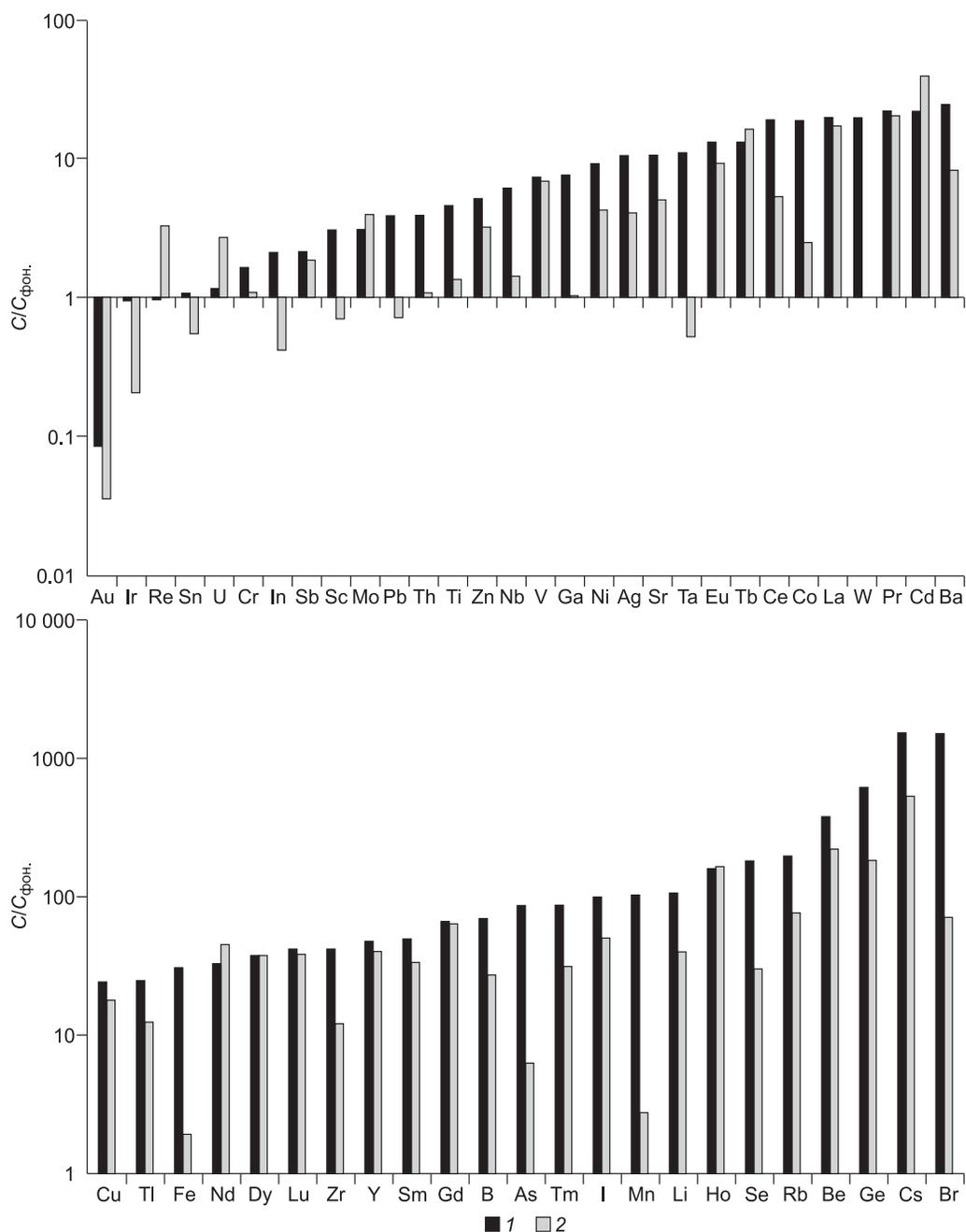


Рис. 2. Коэффициент концентрации химических элементов в углекислых водах природного комплекса Чойган.

1 — трещинно-жильные углекислые воды восстановительной геохимической обстановки; 2 — грунтовые воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, обогащенные углекислотой.

Как и в углекислых водах Терсинского месторождения (Кузбасс), которые являются аналогом углекислых вод Чойгана, но характеризуются более высокими значениями минерализации (5250 мг/л), содержаниями CO_2 (2120 мг/л) и концентрациями большинства микрокомпонентов, в водах комплекса Чойган также можно проследить тенденцию повышения содержаний микрокомпонентов с ростом минерализации. Вместе с тем в углекислых водах Терсинского месторождения отмечаются меньшие по сравнению с углекислыми водами природного комплекса Чойган содержания U, Rb, Cs, Se [Копылова и др., 2009а, 2011], что определяется металлогенической специализацией исследуемых районов.

Обогащение вод химическими элементами происходит в процессе взаимодействия вод с горными породами. Механизм формирования углекислых вод комплекса Чойган может быть объяснен с позиций

теории геологической эволюции системы вода—порода [Шварцев, 1998; Геологическая эволюция..., 2005, 2007]. Интегральной характеристикой состава вод как следствия одной из стадий геологической эволюции системы вода—порода является геохимический тип вод, выделяемый по составу формирующихся вторичных продуктов выветривания и являющийся стабильной компонентой геологической среды на определенном этапе взаимодействия этой системы [Гусева и др., 2013].

Рассматриваемые воды по мере движения в гидрогеологической системе, взаимодействуя с первичными алюмосиликатными минералами и растворяя их, обогащаются химическими элементами и приходят в состояние насыщения каолинитом, монтмориллонитом и иллитом (рис. 3). В то же время все подземные воды далеки от равновесия с такими минералами, как альбит, анортит, мусковит, анальцим, Mg-хлорит. Следовательно, рассматриваемая система вода—порода оказывается равновесно-неравновесной: вода неравновесна с одними минералами, которые она непрерывно растворяет, но одновременно она равновесна с другими, которые она постоянно формирует. Определяющим фактором в этом процессе является время взаимодействия подземных вод с горными породами. Так, пресные нейтральные воды в роднике 29, отражающие начальную стадию взаимодействия системы вода—алюмосиликаты, располагаются на приведенных диаграммах в поле устойчивости гиббсита и находятся с ним в

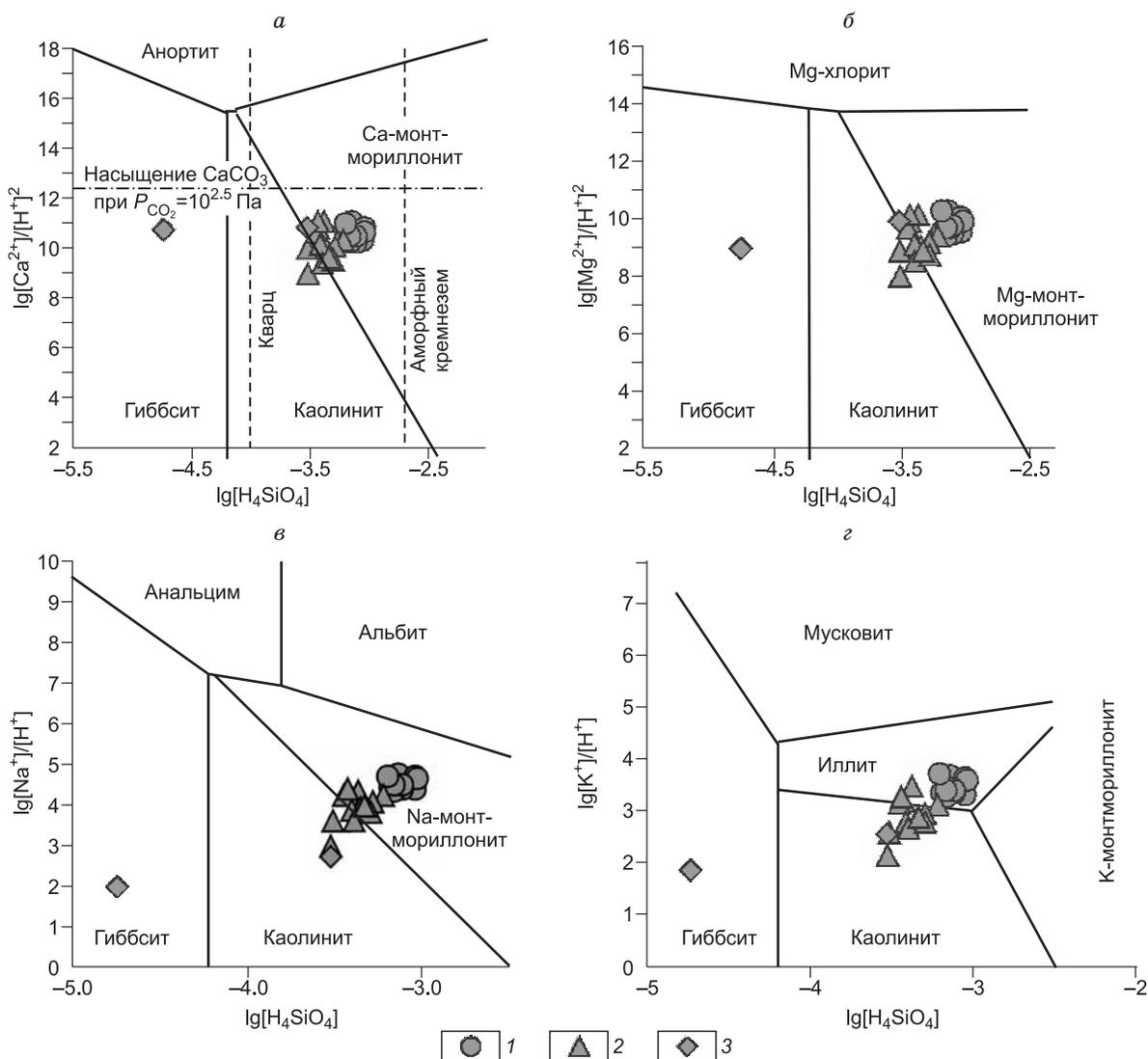


Рис. 3. Диаграммы равновесия основных минералов при 25 °С с нанесением данных по составу углекислых вод природного комплекса Чойган.

a — гиббсит—каолинит—Са-монтмориллонит—анортит, *б* — гиббсит—каолинит—Mg-монтмориллонит—Mg-хлорит, *в* — гиббсит—каолинит—Na-монтмориллонит—альбит—анальцим, *з* — гиббсит—каолинит—K-монтмориллонит—иллит—мусковит. 1 — трещинно-жильные углекислые воды восстановительной геохимической обстановки; 2 — грунтовые воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, обогащенные углекислотой; 3 — грунтовые воды зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки.

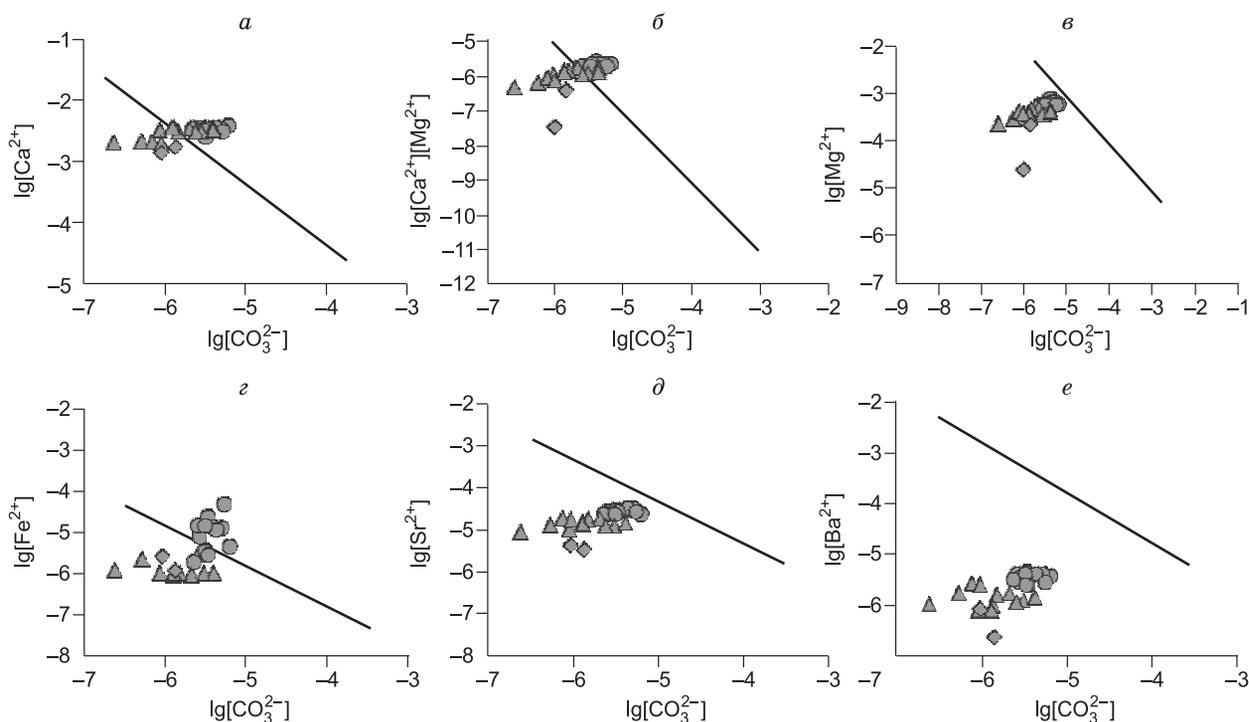


Рис. 4. Диаграммы равновесия углекислых вод природного комплекса Чойган при 25 °С с карбонатными минералами:

а — кальцитом, *б* — доломитом, *в* — магнезитом, *г* — сидеритом, *д* — стронцианитом, *е* — витеритом. Усл. обозн. см. на рис. 3.

равновесии (см. рис. 3), что свидетельствует о малом времени взаимодействия этих вод с горными породами.

Нейтральные пресные воды зоны региональной трещиноватости в роднике 33 являются равновесными с каолинитом. Точки, соответствующие на диаграмме грунтовым водам зоны региональной трещиноватости окислительной геохимической обстановки, обогащенным углекислотой, располагаются в поле устойчивости каолинита и являются равновесными с ним в условиях слабокислой реакции среды при минерализации от 711 до 1520 мг/л и содержаниях кремния от 8.3 до 10.8 мг/л (родники 4, 5, 21, 24, 28, 30). При увеличении времени взаимодействия подземных вод с горными породами свободная углекислота способствует более интенсивному течению реакции гидролиза алюмосиликатов, и в водах окислительной обстановки при минерализации более 1100 мг/л и концентрации кремния от 11 до 16 мг/л достигается равновесие с Ca-, Mg- и Na-монтмориллонитами.

Теплые трещинно-жильные углекислые воды с температурой 22—39 °С восстановительной геохимической обстановки в источниках Чойган являются равновесными с вторичными минералами группы монтмориллонитов, прежде всего с Ca-, Mg- и Na-монтмориллонитами, при минерализации от 1928 до 2712 мг/л и содержании кремния от 17 до 25 мг/л. Наличие свободной углекислоты в водах способствует повышению минерализации вод и препятствует осаждению вторичных карбонатов, благодаря чему воды находятся в равновесии с монтмориллонитами. При взаимодействии вод с калиевыми алюмосиликатами достигается их равновесие с иллитом.

Анализ процессов взаимодействия вод с карбонатными и сульфатными минералами показывает, что при увеличении времени взаимодействия системы вода—порода повышается степень насыщенности вод с карбонатными и сульфатными минералами (рис. 4, 5). Грунтовые воды зоны региональной трещиноватости и особенно трещинно-жильные углекислые воды приходят к состоянию равновесия с кальцитом, доломитом и сидеритом, о чем свидетельствует положение точек на диаграммах (см. рис. 4) выше линии равновесия. Положение точек (см. рис. 4) ниже линии равновесия вод с карбонатами магния, стронция и бария говорит о недостижении подземными водами природного комплекса Чойган насыщения указанными минералами. В то же время в углекислых водах окислительной и восстановительной обстановок достигается равновесие с баритом, прежде всего благодаря высоким концентрациям в

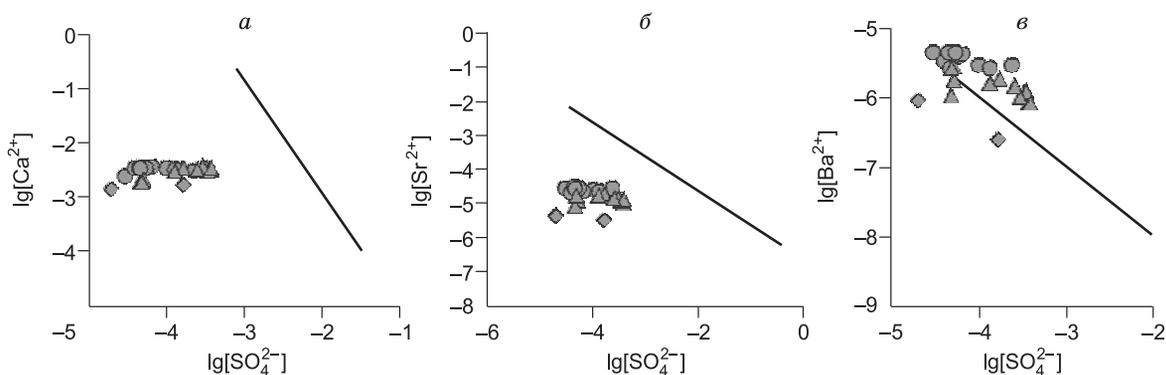


Рис. 5. Диаграммы равновесия углекислых вод природного комплекса Чойган при 25 °С с сульфатными минералами:

a — ангидритом, *б* — целестином, *в* — баритом. Усл. обозн. см. на рис. 3.

водах бария и сульфат-иона, но при этом воды остаются неравновесными с сульфатами кальция и стронция, что отражено на рис. 5.

В соответствии с принципами выделения геохимических типов вод [Шварцев, 1998; Геологическая эволюция..., 2005, 2007] установлено, что среди рассматриваемых вод распространены кислый железисто-алюминиевый, алюминиево-кремнистый и кремнистый Ca-Na-Mg геохимические типы вод. Выделенные геохимические типы характеризуются различными условиями формирования, что отражается на особенностях накопления, миграции и удаления химических элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Сибири одним из районов распространения холодных и термальных углекислых вод являются Восточные Саяны. По результатам исследований углекислых подземных вод природного комплекса Чойган получены новые данные о макро- и микрокомпонентном составе вод. При их характеристике выделены холодные грунтовые воды окислительной обстановки зоны региональной трещиноватости; грунтовые воды окислительной обстановки зоны региональной трещиноватости, обогащенные углекислотой, и термальные трещинно-жильные углекислые воды восстановительной обстановки.

Исследование процессов взаимодействия углекислых вод Чойгана с алюмосиликатными минералами показало, что грунтовые воды зоны региональной трещиноватости равновесны с каолинитом, а углекислые воды окислительной и восстановительной геохимической обстановки — с минералами группы монтмориллонита. Углекислые воды достигают насыщения некоторыми карбонатными минералами (кальцитом, доломитом, сидеритом) и равновесны с баритом за счет повышенных концентраций бария (более 1 мг/л) и сульфат-иона. Это свидетельствует об особой роли углекислоты в процессах взаимодействия вод с горными породами. Согласно полученным результатам, обогащение вод углекислотой наряду с повышением температуры способствует активизации процессов взаимодействия вод с горными породами, и система вода—порода развивается до более высоких стадий. По состоянию равновесия вод с вторичными минералами выделены кислый железисто-алюминиевый, алюминиево-кремнистый и кремнистый Ca-Na-Mg геохимические типы вод.

По критериям отнесения подземных вод к минеральным можно их охарактеризовать как холодные и теплые воды слабокислые, маломинерализованные, слабоуглекислые, кремнистые с потенциально повышенными относительно подземных вод этого региона концентрациями лития, калия, фтора, железа. Углекислые воды природного комплекса Чойган могут рассматриваться как аналог минеральной воды Терсинка и использоваться для внутреннего применения в качестве столовых напитков.

Работа выполнена при поддержке Госзадания «Наука» № 2014/226.

ЛИТЕРАТУРА

Аракчаа К.Д., Букаты М.Б., Карабибер С.В. Формирование химического состава Чойганских углекислых вод (Восточные Саяны) // Проблемы геологии Сибири. Ч. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1996, с. 288—289.

Аракчаа К.Д., Копылова Ю.Г., Чупикова С.А. Природный аржаанский комплекс «Чойганские минеральные воды»: гидрогеохимия, геофизика, микроклимат // Подземная гидросфера. Материалы

XX Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск, ООО «Географ», 2012а, с. 423—427.

Аракчаа К.Д., Смирнова И.Н., Копылова Ю.Г. Аржаан Чойган — целительная жемчужина Тувы. Кызыл, Типография КЦО «Аныяк», 2012б, 164 с.

Аракчаа К.Д., Копылова Ю.Г., Гусева Н.В., Камбалина М.Г., Хвощевская А.А., Янкович А.С. Химический состав подземных углекислых вод природного аржаанного комплекса «Чойганские минеральные воды» (Тува) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов: опыт и перспективы использования в целях профилактики заболеваний, лечения и реабилитации больных. Материалы I Международной научно-практической конференции. Кызыл, Изд-во КЦО «Аныяк», 2013, с. 145—153.

Аржанникова А.В., Жоливе М., Аржанников С.Г., Вассалло Р., Шове А. Возраст формирования и деструкции мезозойско-кайнозойской поверхности выравнивания в Восточном Саяне // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (7), с. 894—905.

Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М., Мир, 1968, 368 с.

Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода—порода. Система вода—порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / Ред. С.Л. Шварцев. Т. 1. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005, 243 с.

Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода—порода. Система вода—порода в условиях зоны гипергенеза / Ред. Б.Н. Рыженко. Т. 2. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2007, 389 с.

ГОСТ Р 54316-2011. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. М., Изд-во «Стандартинформ», 2011, 41 с.

Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Хвощевская А.А. Геохимические типы природных вод междуречья Ензорьяхи и Юньяхи (восточный склон Полярного Урала) // Водные ресурсы, 2013, т. 40, № 4, с. 386—395.

Дучков А.Д., Рычкова К.М., Лебедев В.И., Каменский И.Л., Соколова Л.С. Оценки теплового потока Тувы по данным об изотопах гелия в термоминеральных источниках // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (2), с. 264—276.

Зверев В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. М., Недра, 1982, 182 с.

Копылова Ю.Г., Лепокурова О.Е., Токаренко О.Г. Условия формирования химического состава Терсинских углекислых минеральных вод // Водные ресурсы, 2009а, т. 36, № 5, с. 606—614.

Копылова Ю.Г., Пашагин А.В., Гусева Н.В., Хвощевская А.А. Новые сведения о составе радоновых и углекислых вод родников Республики Тува // Подземные воды востока России. Материалы XIX Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Тюмень, Тюменский дом печати, 2009б, с. 248—250.

Копылова Ю.Г., Лепокурова О.Е., Токаренко О.Г., Шварцев С.Л. Химический состав и генезис углекислых минеральных вод месторождения Терсинское (Кузбасс) // ДАН, 2011, т. 436, № 6, с. 804—808.

Копылова Ю.Г., Гусева Н.В., Рычкова К.М., Аракчаа К.Д. Химический состав родников Тувы как стадия развития системы вода—порода // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Материалы Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. Томск, Изд-во НТЛ, 2012, с. 325—327.

Кустов Ю.И., Лысак С.В. Термальные воды юга Восточной Сибири (распространение, условия формирования, использование) // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (6), с. 880—895.

Пашагин А.В. Геохимия родниковых вод в долине реки Хемчик и группы источников Чойган // Современные технологии и результаты геологических исследований в изучении и освоении недр Земли: научные труды лауреатов Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области наук о Земле и Всероссийского фестиваля науки. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 2011, с. 165—168.

Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. Кызыл, Тув. кн. изд-во, 1968, с. 39—43.

Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (5), с. 647—664.

Рычкова К.М. Тепловой поток Тувы по изотопно-гелиевым и геотермическим данным: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2009, 25 с.

Рычкова К.М., Оюн Л.А. Флюидный и тектонический режим Тувы и прилегающих территорий // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. Томск, Изд-во НТЛ, 2012, с. 337—340.

Рычкова К.М., Дучков А.Д., Лебедев В.И., Каменский И.Л. Изотопы гелия в подземных источниках Восточной Тувы // ДАН, 2007, т. 417, № 6, с. 814—817.

Рычкова К.М., Копылова Ю.Г., Оюн Л.А. Химический и газовый состав, изотопы гелия в подземных водах Тувы // Подземная гидросфера. Материалы XX Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск, ООО «Географ», 2012, с. 236—240.

Соколова Л.С., Дучков А.Д. Новые данные о тепловом потоке Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (12), с. 1248—1261.

Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Лунев Б.В. Поля смещений блоков Алтае-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (3), с. 481—497.

Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1998, 366 с.

Arakchaa K.D., Bukaty M.B., Rychkova K.M., Choksum J.E., Pashagin A. Hydrochemical and geophysics characteristics natural arjaan's complex «Choigan's mineral waters» // 11th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference & EXPO SGEM 2011. Albena, Bulgaria. 19.06.2011—25.06.2011. Conference Proceedings, 2011, v. II, p. 847—852.

Копылова Y.G., Guseva N.V., Shestakova A.V., Khvashchevskaya A.A., Arakchaa K.D. Dissolved gas composition of groundwater in the natural spa complex «Choigan mineral waters» (East Tuva) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, v. 21, p. 12022.

*Рекомендована к печати 21 апреля 2014 г.
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию 4 июля 2013 г.,
после доработки — 5 февраля 2014 г.*