ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НАСЫЩЕННОСТИ УГЛЕКИСЛЫХ ВОД ВОСТОЧНОГО САЯНА ВТОРИЧНЫМИ МИНЕРАЛАМИ

Шестакова А.В.¹, Гусева Н.В.¹, Копылова Ю.Г.¹, Хвашевская А.А.¹, Polya D.A.²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, E-mail: ashest91@mail.ru

²School of Earth and Environmental Science and Williamson Research Centre for Molecular Environmental Science, University of Manchester, United Kingdom, E-mail: david.polya@manchester.ac.uk

АННОТАЦИЯ: В работе рассмотрены особенности химического состава 6 углекислых родников Восточного Саяна, расположенных на север-востоке республики Тува. Представлены особенности основного химического состава углекислых вод. Проведены значения индексов насыщения вод вторичными минералами: гиббситом, каолинитом, иллитом, монтмориллонитом, мусковитом, КПШ, кальцитом, доломитом, сидеритом, магнезитом, гетитом, ангидритом, гипсом, кварцем и альбитом. Установлено, что углекислые воды всех рассматриваемых родников насыщены монтмориллонитом, каолинитом, иллитом, мусковитом, КПШ и кварцем. Воды с высокой минерализацией достигают равновесия с карбонатными минералами и альбитом.

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование месторождений углекислых минеральных вод – весьма сложный процесс, определяющийся многими факторами, часто накладывающимися друг на друга. На территории республики Тува, в хребтах Восточного Саяна сосредоточены многочисленные проявления холодных углекислых вод, контролируемые крупными разломами и связанные с продолжением Байкальской рифтовой зоны [6].

Первые сведения о химическом составе минеральных вод, в том числе и углекислых, Тувы были представлены в 50-е годы прошлого века в отчетах экспедиции «Союзгеокаптажминвод», партий Министерства геологии СССР и Академии наук СССР, а также в документах различных организаций здравоохранения. Подробное описание углекислых источников севера Тувы последний раз приведено в 60-х годах XX века в книге «Минеральные воды Тувы» Е.В. Пиннекера [5]. После продолжительного перерыва в конце 80-х годов XX века изучение углекислых вод возобновилось, основные результаты опубликованы в работах [1-4, 6], в которых описан химический и газовый состав углекислых вод, установлено их метеорное происхождение, отмечена особая роль CO₂ и температуры в формировании химического состава углекислых вод.

Современных исследований холодных углекислых вод на севере Тувы не проводилось. До настоящего времени не решены вопросы генезиса и формирования химического состава углекислых вод этого района, не рассмотрен характер геохимической обстановки, процессы взаимодействия в системе вода-порода. Целью данной работы является исследование геохимических особенностей углекислых вод северо-

востока Тувы и состояния равновесия вод с вторичными минералами.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В ходе полевых исследований летом 2016 г. были опробованы углекислые источники, расположенные на севере Тувы в хребтах Восточного Саяна (рис. 1) и приуроченные к зоне сочленения глубинного регионального Канданского разлома.

Рис. 1. Карта расположения объектов исследования.

Родники Верхний и Нижний Кадыр-Ос (53°23,99' с.ш., 96°51.865' в.д. и 53°21,037' с.ш., 96°50,062' в.д. соответственно) располагаются в 4 км друг от друга на левом берегу р. Улуг-Кадыр-Ос на абсолютной отметке 1665 м и 1795 м, представляют собой сосредоточенные струи углекислой воды из песчано-глинистого аллювия, под которым скрываются глыбы гранита и гранодиорита [4, 5].

Источник Соруг (Шандал-Ой) располагается на высоте 1599 м (53°28,266" с.ш., 96°52,319" в.д.) в истоке р. Соруг (правый приток р. Кижихема). Выход источника приурочен к пересечению широтного разлома, протягивающегося вдоль долины р. Соруг, с тектонической зоной меридионального направления, на контакте эффузивно-осадочных пород хамсаринской свиты нижнего кембрия с интрузивными породами нижнего палеозоя [4]. Вверх по течению реки Улуг-Уран-Сай в 1,5 км от родника Соруг, располагается еще один выход углекислых вод на отметке 1621 м. Этот родник также был опробован и условно был назван Соруг 1 (53°28,307" с.ш., 96°51,936" в.д.). Удаленные от населенных мест родник Даштыг-Хем (Арыскан) располагается у северного склона горы Арыскан – одной из вершин хребта Даштыг на высоте 1806 м (53°30,668" с.ш., 96°45,102" в.д.).

Родник Исвен располагается на границе с Иркутской областью в осевой части хребта Восточного Саяна на высоте 1549 м (53°18,487" с.ш., 97°37,483" в.д.) в основании склона ущелья на правом берегу р. Соруг-Хем (впадающего в Кижихем). В 200 м от основного выхода ниже по течению на левом берегу р. Соруг-Хем находится еще один выход углекислых вод. Образование источника связано с протяженной зоной разлома на контакте пород среднего кембрия и нижнего протерозоя, идущей в широтном направлении вдоль северного склона долины р. Улуг-Бырчатыг. Вмещающими породами выступают трещиноватые амфиболитовые сланцы билинской свиты позднего рифея [4].

Пробы воды для анализа химического состава отбирались в чистые полиэтиленовые бутылки объемом 1,5 л. Удельная электрическая проводимость, температура, Eh и pH были измерены на месте пробоотбора. Химический состав подземных вод определялся в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Научно-образовательного центра «Вода» Томского политехнического университета. Концентрации SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ были определены методом ионной хроматографии (ICS 1000), концентрации HCO_3^- определялись методом титрования раствором (0,1 моль) HCl , концентрации кремния атомно-абсорбционной спектрометрией. Концентрация свободной углекислоты определялась из отобранной пробы воды в 50 мл пластиковые пробирки с добавлением консерванта NaOH .

В программном комплексе PhreeqC были рассчитаны индексы насыщения вод (SI) раз-

личными минералами. Физико-химическое моделирование выполнялось для условий нормального атмосферного давления при температуре разгрузки вод. Если SI равен нулю, раствор находится в равновесии с данным минералом, при $\text{SI} < 0$, раствор недонасыщен к минералу (происходит его растворение), если значение $\text{SI} > 0$, раствор пересыщен к минералу и происходит его формирование.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты химического анализа углекислых вод по составу, температуре, pH и минерализации приведены в таблице 1.

Исследуемые углекислые воды являются холодными с температурой 2,7-11,3°C, кислыми (pH 5,8-6,3), среда – слабо восстановительная. Воды преимущественно гидрокарбонатные магниевые-кальциевые и натриево-кальциевые.

В роднике Даштыг-Хем катионный состав отличается высокими относительно других углекислых источников сопоставимыми между собой концентрациями натрия и кальция 293 и 280 мг/л, соответственно, присутствием калия – 8 мг/л, низкой концентрацией магния – 24 мг/л. Отличительной чертой родника Нижний Кадыр-Ос является высокое содержание сульфат-иона – 89 мг/л и низкое содержание гидрокарбонат-иона 403 мг/л. Минерализация вод изменяется от 676 до 2753 мг/л. Разница в минерализации углекислых вод обусловлена главным образом большим количеством гидрокарбонат-иона увеличивающимся с ростом в подземных водах CO_2 , концентрация которого колеблется от 246 до 1780 мг/л. В роднике Верхний Кадыр-Ос высокая минерализация вод (2753 мг/л) поддерживается также высокими концентрациями не только за счет иона HCO_3^- (1927 мг/л), но и Cl^- (106 мг/л), Ca^{2+} (394 мг/л), Mg^{2+} (122 мг/л), Na^+ (141 мг/л). За счет углекислотного выщелачивания увеличиваются также концентрации кремнезема в воде (21-62 мг/л), фтора – 0,4-2,1 мг/л и железа – 2-13 мг/л. Главными источниками кремния в подземных водах являются алюмосиликатные горные породы, растворение которых приводит к накоплению этого элемента в растворе и с ростом минерализации наблюдается тенденция к увеличению его накопления в воде.

Для понимания механизмов формирования химического состава углекислых вод были рассчитаны индексы насыщения вод относительно ведущих минералов вмещающих пород с ис-

пользованием программного комплекса PHREEQC. Результаты термодинамического моделирования представлены в таблице 2.

Данные показывают, что все углекислые воды в большей степени насыщены алюмосили-

катами (монтмориллонит, каолинит, иллит, мусковит, КППШ), SI от 0,7 до 8,72, и кварцем (SI 0,45-1,14). В меньшей степени воды насыщены гидроокислами железа и алюминия (гетит и гиббсит), SI -0,05 - 2,01.

Таблица 1. Химический состав углекислых вод севера Восточного Саяна, мг/л

Параметры	Название родника					
	Даштыг-Хем	Верхний Кадыр-Ос	Нижний Кадыр-Ос	Соруг	Соруг 1	Исвен
T, °C	3.3	9.6	11.3	2.7	5.9	5.9
Eh, мВ	24	-20	44	28	66	-
pH	6.2	6.3	6.1	5.8	6.1	6.2
CO ₂	1373	1584	246	1780	720	860
HCO ₃ ⁻	1708	1927	403	1159	830	1037
SO ₄ ²⁻	25	62	89	17	16	29
Cl ⁻	5	106	16	4	1	17
Ca ²⁺	280	394	80	240	185	257
Mg ²⁺	24	122	33	59	37	18
Na ⁺	293	141	54	58	38	85
K ⁺	8	1	1	4	4	6
Минерализация	2343	2753	676	1540	1110	1413
F ⁻	2.1	0.4	0.4	1.2	0.5	0.3
SiO ₂	62	41	21	49	36	38
Fe	7	8	2	13	3	6
Тип вод	HCO ₃ -Na-Ca	HCO ₃ -Mg-Ca	HCO ₃ -Mg-Ca	HCO ₃ -Mg-Ca	HCO ₃ -Mg-Ca	HCO ₃ -Na-Ca

Таблица 2. Индексы насыщения (SI) углекислых вод севера Восточного Саяна

Минерал	Название родника					
	Даштыг-Хем	Верхний Кадыр-Ос	Нижний Кадыр-Ос	Соруг	Соруг 1	Исвен
Альбит	0.51	1.37	-0.13	-1.19	-1.26	1.69
КППШ	2.08	2.22	1.17	0.78	0.70	3.71
Иллит	2.73	5.49	4.32	0.97	1.85	6.30
Каолинит	3.35	5.94	5.55	2.23	3.16	5.92
Мусковит	4.09	7.50	6.75	1.85	3.36	8.72
Ca-mnt	3.56	5.76	4.18	2.28	2.55	6.02
Кальцит	0.12	0.76	-0.66	-0.33	-0.35	0.78
Доломит	0.49	2.36	-0.36	0.03	-0.05	1.71
Сидерит	-0.54	0.04	-0.94	-0.51	-0.94	0.08
Магнезит	-1.38	-0.11	-1.39	-1.39	-1.40	-0.81
Гиббсит	0.27	1.87	2.01	-0.20	0.55	1.77
Гетит	-0.05	0.72	0.97	-0.28	0.46	6.03
Ангидрит	-2.34	-1.87	-2.00	-2.52	-2.49	-2.22
Гипс	-1.97	-1.56	-1.72	-2.15	-2.20	-1.85
Кварц	1.14	0.80	0.45	1.04	0.72	0.92

Насыщение вод гетитом связано с высоким содержанием железа в воде и подтверждается многочисленными железистыми образованиями вокруг родников. Равновесие вод с кварцем

указывает на осаждение излишков кремнезема из раствора в виде новообразованного кварца (халцедона). В то же время все воды далеки от равновесия с магнезитом, ангидритом и гипсом.

В родниках Исвен, Верхний Кадыр-Ос и Даштыг-Хем с высокой минерализацией (более 1400 мг/л) вода достигает насыщения альбитом (SI 0,51-1,69), а также карбонатными минералами, в большей степени доломитом (SI 0,49-2,36) и в меньшей степени кальцитом (SI 0,12-0,78) и сидеритом (SI 0,04-0,08), что может достигаться в течение длительного времени взаимодействия воды с горными породами [7]. Следовательно, исследуемые углекислые воды растворяют минералы, с которыми они неравновесны и формируют те, с которыми они равновесны.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На севере Восточного Саяна в пределах республики Тыва развиты холодные углекислые воды, приуроченные к зоне сочленения глубинного Канданского разлома. По составу воды кислые, со слабо восстановительной средой, преимущественно гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией 676-2753 мг/л и концентрацией CO₂ от 246 до 1780 мг/л. Агрессивная среда воды ускоряет процесс углекислотного выщелачивания, минерализация вод увеличивается, переводя в воду большое количество макро- и микрокомпонентов, таких как кальций, кремний, железо, и другие. Рассчитанные индексы насыщения показывают, что исследуемые углекислые воды пересыщены монтмориллонитом, каолинитом, иллитом, мусковитом, КПШ и кварцем. Воды с высокой минерализацией достигают равновесия с карбонатными минералами и альбитом.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект №17-17-01158).

ASSESSMENT OF THE SATURATION STATE OF CO₂-RICH WATER IN EASTERN SAYAN) WITH RESPECT TO THE SECONDARY MINERAL

Shestakova A.V.¹, Guseva N.V.¹, Kopulova Y.G.¹, Khvashevskaya, A.A.¹, Polyak D.A.²

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, E-mail: ashest91@mail.ru

²School of Earth and Environmental Science and Williamson Research Centre for Molecular Environmental Science, University of Manchester, United Kingdom, E-mail: david.polyak@manchester.ac.uk

ABSTRACT: The paper discusses the characteristics of the chemical composition of the 6 springs of CO₂ waters of the Eastern Sayan, located to the north-east of the Republic of Tyva. The features of the basic chemical composition of CO₂ waters are presented. The values of water saturation indices with respect to the secondary minerals are shown: gibbsite, kaolinite, illite, montmorillonite, muscovite, k-feldspar, calcite, dolomite, siderite, magnesite, goethite, anhydrite, gypsum, quartz and albite. It is established that the CO₂ waters of all the springs are saturated with respect to montmorillonite, kaolinite, illite, muscovite, k-feldspar and quartz. Waters with high TDS reach equilibrium with carbonate minerals and albite.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадминов П.С., Иванов А.В., Писарский Б.И., Оргильянов А.И. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян) // Вулканология и сейсмология. 2013. № 4. – С. 27-39.
2. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В., Аракчаа К.Д., Хвасцевская А.А. Геохимия углекислых вод природного комплекса Чойган (западный склон Восточных Саян, северо-восток Тувы) // Геология и геофизика, 2014, № 11. – С. 1635-1648.
3. Копылова Ю.Г., Пашагин А.В., Гусева Н.В., Хвасцевская А.А. Новые сведения о составе радоновых и углекислых вод родников республики Тува // Подземные воды востока России: Материалы XIX Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (22–25.06.2009). – Тюмень: Тюменск. дом печати, 2009. – С. 248-250.
4. Оргильянов А.И., Аракчаа К.Д., Крюкова И.Г., Бадминов П.С., Солдатов Е.А., Шестакова А.В., Рычкова К.М. Минеральные воды Тоджинского района Республики Тыва) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности, Тувы и сопредельных регионов: опыт и перспективы использования в целях профилактики заболеваний, лечения и реабилитации больных. Материалы III Международной научно-практической конференции. Республика Тыва, г. Кызыл, ГК «Буян-Бадыргы», 28 июня – 1 июля 2017 г. Том 3. /Гл. ред. К.Д. Аракчаа. – Кызыл, ООО «Кооператив «журналист», 2017. – С. 147-156.
5. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. – Кызыл: Тувинское книжное издательство, 1968. – 105 с.
6. Плюснин А.М. Минеральные и термальные воды Байкальской рифтовой зоны: геологические условия формирования, химический и изотопный состав // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием, 2015. – С. 83-89.
7. Шварцев С.Л., Рыженко Б.Н., Алексеев В.А. и др. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. – Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.