

На правах рукописи



Шестакова Анастасия Викторовна

**ГЕОХИМИЯ УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД
СЕВЕРО-ВОСТОКА ТУВЫ**

Специальность 25.00.07 – Гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ г. Томск).

Научный руководитель: **Гусева Наталья Владимировна**, кандидат геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты: **Копылова Галина Николаевна**, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук", заведующая лабораторией геофизических исследований, г. Петропавловск-Камчатский

Новиков Дмитрий Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири, г. Новосибирск

Ведущая организация: **ФГБУН Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук**, г. Владивосток

Защита состоится «24» декабря 2018 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.170.03 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2а строение 5, 20 корпус, 504 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, ул. Белинского, 55) и на сайте: <http://portal.tpu.council/2799/worklist>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
К.Г.-М. Н.



Лепокурова Олеся Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Углекислые воды относятся к категории наиболее ценных минеральных вод, на базе которых создаются лечебные курорты и санатории. Такие воды широко распространены в активных вулканических областях по всему миру (Турция, Иран, Индонезия и др.). Известны проявления месторождений углекислых минеральных вод и на территории России, и в странах СНГ – на Кавказе, Памире, Тянь-Шане, Дальнем Востоке, Забайкалье, Восточном Саяне, Монголии.

В настоящее время углекислые воды представляют собой уникальные объекты не только с точки зрения изучения их бальнеологических свойств, сохранения и рационального использования, как полезного ископаемого, но и с точки зрения установления генезиса этих вод, выяснения источников углекислоты и понимания процессов, способствующих накоплению в водах многих химических элементов (Si, Sr, Li, U, Th, Rb, Cs, B, As, Ge и др.).

Изучением процессов формирования углекислых вод, их распространения в различных геолого-гидрогеологических обстановках занимались в разное время такие ученые как В.В. Иванов, Г.А. Невраев, А.М. Овчинников, Е.В. Посохов, Н.И. Толстихин, С.В. Обручев, Г.С. Варганян, Л.А. Яроцкий, В.А. Кирюхин, О.В. Чудаев, Г.А. Челноков, Н.А. Харитонов, Л.В. Замана, В.Ю. Лаврушин и др. Однако, до сих пор спорными остаются вопросы, связанные с установлением источников некоторых компонентов в углекислых водах (микрокомпонентов, газов, углекислоты) и геохимических процессов, происходящих в них.

По разнообразию минеральных вод Республика Тыва не уступает другим регионам России, в том числе здесь широко распространены углекислые воды, исследованию которых посвящены работы С.В. Обручева, В.Г. Ткачук, И.С. Ломоноса, Е.В. Пиннекера, Н.И. Толстихина, Г.М. Шпейзера, Ю.И. Кустова, К.М. Рычковой, Д. Ганчимэг, К.Д. Аракчаа, Ю.Г. Копыловой, А.М. Плюснина, А.И. Оргильянова, П.С. Бадминова, И.Г. Крюковой и др., касающиеся в основном гидрогеологических и гидрогеохимических аспектов. Однако до настоящего времени остаются нерешенными вопросы происхождения компонентов ионно-солевого и газового состава воды, органического вещества, не рассмотрена роль взаимодействия в системе вода-порода-газ при формировании химического состава. Работы по изучению распространенности в углекислых водах широкого комплекса химических элементов, в том числе редких, редкоземельных и радиоактивных не многочисленны. Практически не рассмотрен характер геохимической обстановки и не предложено единой комплексной схемы формирования холодных и термальных углекислых минеральных вод северо-востока Тувы.

Цель работы – изучение геохимических особенностей и условий формирования химического состава углекислых минеральных вод северо-востока Тувы. **Объектом исследования** являются углекислые воды северо-востока Тувы.

Основные задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели:

- рассмотреть особенности химического и газового состава исследуемых углекислых вод и определить физико-химические процессы, контролирующие состав вод;

- провести изотопные исследования кислорода, водорода и углерода углекислых вод для установления генезиса воды и углекислого газа;
- определить состояние термодинамического равновесия подземных вод с минералами горных пород;
- установить глубинную температуру формирования углекислых вод;
- разработать схему формирования химического состава углекислых вод северо-востока Тувы.

Исходные материалы и методы исследования. Основой для работы послужили материалы, полученные в результате комплексного гидрогеохимического опробования с участием автора летом 2013 г. и 2016 г. в составе научной экспедиции, организованной Лабораторией аржаанологии и туризма (ООО «АржаанЛаб», г. Кызыл, Россия) совместно с сотрудниками проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии ТПУ и коллегами из Института земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия), а также фондовые материалы. Всего автором было отобрано 40 проб подземных вод и 26 проб газовой фазы.

Быстроменяющиеся параметры (pH, Eh, T°C), а также содержание углекислоты, измерялись непосредственно на месте опробования. Газовая проба для определения водорастворённых газов отобрана в стеклянную посуду объёмом 0,2 л вакуумным способом с использованием полевого шприца-дегазатора В.А. Зуева. Пробы свободного газа отбирались в стеклянные бутылки объёмом 0,2 л методом вытеснения. Комплексный анализ химического состава подземных вод выполнялся в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета методами титриметрии, потенциометрии, ионной и газовой хроматографии, спектрофотометрии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и др. Аналитические исследования изотопов кислорода и водорода выполнены в ресурсном центре Санкт-Петербургского государственного университета «Геомодель» (г. Санкт-Петербург, Россия), углерода – в лаборатории изотопно-аналитических методов ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, Россия). Результаты определения содержаний $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ приведены относительно международного стандарта SMOW (среднего значения в морской воде)

Для оценки степени насыщенности вод основными минералами рассчитывался индекс насыщения (SI) в программном комплексе PHREEQC. Физико-химические расчёты выполнялись для условий нормального атмосферного давления при температуре разгрузки вод. Для визуализации результатов расчёта равновесия вод с минералами представлены широко используемые в гидрогеохимии диаграммы полей устойчивости алюмосиликатных, карбонатных и сульфатных минералов, построенные в ПК Geochemist's Workbench (GWB).

Для установления глубинных температур формирования углекислых вод северо-востока Тувы использовались кварцевый (Fournier and Potter, 1982) и Na–K–Ca геотермометры (Fournier and Truesdell, 1973). Также для подтверждения этих расчётов применялся метод, описанный в работах [Reed et. al., 1984], и широко используемый в зарубежной литературе [Wishart, 2015; Baioumy, 2015]. Метод основан на расчёте индексов насыщения вод различными минералами при температурах от 0 до 200°C. Если значения индексов насыщения вод (SI) несколькими минералами свидетельствуют о близости насыщения (равновесия), т.е. SI=0, при одинаковой температуре, эта температура

соответствует наиболее вероятной глубинной температуре формирования состава вод [Reed et. al., 1984].

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в полевых экспедициях в Туве, проводил сбор, анализ и интерпретацию фактического материала. Полученные данные самостоятельно обработаны с помощью программных комплексов Corel Draw, ArcGis, PhreeqC, OriginLab, GWB, а также средств Microsoft Office. В частности, автором изучены основные особенности химического, в том числе микрокомпонентного, и газового составов углекислых вод, рассчитаны равновесия рассматриваемых вод с основными минералами вмещающих горных пород, установлен генезис углекислого газа и воды, произведена оценка глубинных температур подземных вод с помощью геохимических геотермометров и разработана схема формирования химического состава углекислых вод северо-востока Тувы.

Научная новизна: 1) На новом аналитическом уровне проведено комплексное исследование вещественного состава минеральных углекислых вод северо-востока Тувы, впервые получены данные по микрокомпонентному составу вод и содержанию РЗЭ. 2) Для всех углекислых вод впервые определён состав свободного и растворённого газа, сделаны выводы об условиях его формирования. 3) Впервые изучен изотопный состав кислорода и водорода в родниках северо-востока Тувы и сделаны выводы о происхождении воды. 4) Впервые определены глубинные температуры циркуляции углекислых вод северо-востока Тувы. 5) Разработана схема формирования химического состава углекислых вод северо-востока Тувы с обоснованием источников химических элементов и газов на основе полученных результатов анализа химического и газового состава подземных вод, расчётов глубинных температур и равновесия подземных вод с минералами горных пород.

Научно-практическая значимость работы. Установленные основные закономерности формирования углекислых вод могут быть применены для их комплексного и рационального использования, а также сохранения ресурсов минеральных вод Тувы.

Результаты представленных исследований использовались при выполнении работ по грантам 16-35-00324 мол_а «Геохимия углекислых минеральных вод юго-западных склонов Восточного Саяна» (2016–2017 гг.), в котором автор являлся руководителем, Госзадание «Наука» № 5.1931.2014/к «Геохимия элементов-гидролизатов в гумидных областях как основа совершенствования технологии водоподготовки» (2014–2015 гг., руководитель С.Л. Шварцев) и гранта РФ 17-17-01158 «Механизмы взаимодействия, состояние равновесия и направленность эволюции системы соленые воды и рассолы – основные и ультраосновные породы (на примере регионов Сибирской платформы)» (2017–2017 гг., руководитель С.Л. Шварцев).

Апробация работы. По материалам диссертационного исследования опубликовано 15 работ, в том числе 4 работы в журналах, индексируемых международными базами данных (Web of Science, Scopus) и журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Отдельные разделы диссертации представлены на Международных и Всероссийских конференциях: Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (г. Москва, 2017 г.), Международном симпозиуме имени

академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2015 – 2017 гг.), Всероссийском научном форуме «Наука будущего, наука молодых» (г. Казань, 2016 г.), научно-практической конференции аспирантов (Postgraduate Research Conference) (г. Манчестер, Великобритания, 2016–2017 гг.), Всероссийской научной конференции с международным участием "Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами" (г. Чита, 2018 г.).

Структура и объём работы. Настоящее диссертационное исследование состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературных источников, состоящего из 121 наименования. Работа изложена на 148 страницах, включая 39 рисунков и 20 таблиц.

Благодарности. Автор признателен своему научному руководителю, идейному вдохновителю к.г.-м.н., Наталье Владимировне Гусевой за помощь, поддержку и внимание на всех этапах подготовки диссертационного исследования. За ценный вклад, наставления и комментарии автор благодарит своего первого научного руководителя, д.г.-м.н., профессора Степана Львовича Шварцева. Слова признания автор выражает к.г.- м.н., Ю.Г. Копыловой за содействие в проведении исследований и подготовки базы данных состава минеральных вод Тувы. Автор выражает огромную благодарность заведующему лабораторией ПНИЛ гидрогеохимии, к.г.-м.н., А.А. Хвощевской и сотрудникам лаборатории за проведение лабораторных исследований и обсуждение результатов. Огромную признательность автор выражает директору НИИ медико-социальных проблем и управления Республики Тыва (г. Кызыл) к. х. н. К.Д. Араакча за организацию полевых исследований и предоставленную возможность принять в них участие, а также сотрудникам Института земной коры СО РАН (г. Иркутск) А.И. Оргильянову, И.Г. Крюковой и П.С. Бадминову за полученный опыт и знания во время совместных полевых работ. Автор выражает признательность профессору Манчестерского университета, доктору Дэвиду Полия за содействие и проработку некоторых глав диссертационной работы, а также полученные знания при освоении программных комплексов.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение. *Углекислые воды северо-востока Тувы приурочены к активным зонам разрывных нарушений, по которым в водоносные системы поступает природный газ в свободной форме, представленный преимущественно CO_2 (87–97 об.%), и содержащий Rn в количестве от 4 до 948 Бк/л. В составе растворенного газа кроме CO_2 (12–65 об.%) присутствуют газы атмосферного генезиса N_2 (2,5–70 об.%) и O_2 (0,6–18 об.%).*

Углекислые воды располагаются на северо-востоке Тувы, в пределах хребтов Восточного Саяна на границе с Иркутской областью и Бурятией, и приурочены к тектонически омоложенной территории альпийской складчатости. Выделяются два района распространения углекислых вод: восток республики, где расположен природный комплекс «Чойганские минеральные воды» (далее Чойган), и север республики, где расположены родники Исвен (два выхода), Даштыг-Хем, Верхний и Нижний Кадыр-Ос, Соруг (два выхода), объединённые в данной работе под название «северные родники» (рис.1).

Выходы родников природного комплекса Чойган расположены в Восточном Саяне на абсолютных отметках 1500–1600 м. На небольшой территории (около 0,3 км²) разгружаются 33 родника.

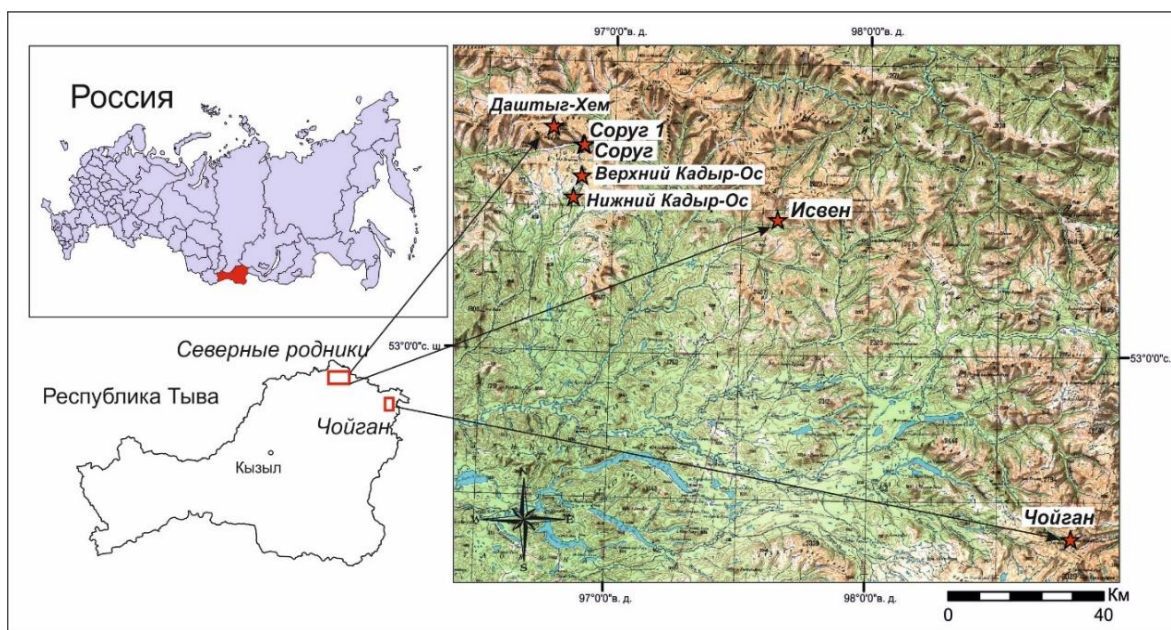


Рис. 1. Карта расположения исследуемых углекислых вод северо-востока Тувы

Образование родников Чойгана приурочено к зоне глубинного Азасско-Жомболойского разлома на контакте девонских гранитов бреньского комплекса с кембрийскими гранодиоритами таннуольского комплекса. Вблизи располагаются небольшие поля нижне-среднечетвертичных кайнозойских базальтов. В пределах рассматриваемой территории распространены как холодные, так и термальные углекислые воды (табл. 1). В пойме правого и левого берегов р. Аржан-Хем расположены выходы **холодных углекислых вод**. По химическому составу воды являются гидрокарбонатными кальциево-натриевыми, с температурой 11–18 °С и минерализацией от 0,6 до 1,5 г/л, воды слабокислые (рН 5,9–6,7), характеризуются окислительной геохимической обстановкой (Еh 169–236 мВ) (табл.1). В катионном составе преобладают Ca^{2+} (82–260 мг/л) и Na^{+} (41–136 мг/л), а среди анионов – HCO_3^{-} (450–1110 мг/л). Содержание Mg^{2+} составляет 12–24 мг/л, K^{+} – 7–20 мг/л и Cl^{-} – 5–18 мг/л.

Отмечается несколько повышенное содержание SO_4^{2-} (5–59 мг/л) характерное для вод окислительной обстановки. Холодные углекислые воды также обогащены растворённой углекислотой 188–972 мг/л, максимальное ее содержание отмечается в роднике №4 – 1488 мг/л. В повышенных концентрациях отмечается SiO_2 , что является типичным для углекислых вод, и составляет от 20 до 33 мг/л. Концентрации железа и фтора – невысокие и изменяются в пределах 0,1–4,4 мг/л и 0,1–1,1 мг/л, соответственно.

В центральной части долины р. Аржан-Хем вдоль коренного склона и на левом берегу разгружаются **термальные углекислые воды** с температурой от 23 до 39 °С, гидрокарбонатные натриево-кальциевые, отличающиеся от холодных вод преобладанием натрия в катионном составе и имеющие более высокую минерализацию – от 1,7 до 2,6 г/л. Воды преимущественно слабокислые (рН 6,1–6,9), значения Еh изменяются от -170 до 140 мВ.

Таблица 1. Химический и газовый состав углекислых вод северо-востока Тувы, мг/л

Параметры	Северные родники							Восточные родники, природный комплекс Чойган	
	Даштыг-Хем (Арыскан)	Верхний Кадыр-Ос	Нижний Кадыр-Ос	Соруг (Шандал-Ой)	Соруг 1	Исвен, основной выход	Исвен	холодные углекислые воды (n=20)*	термальные углекислые воды (n=10)*
T, °C	3,3	9,6	11,3	2,7	5,9	5,2	5,9	14,6	27,3
Eh, мВ	24	-20	44	28	66	–	–	200	89
pH	6,2	6,3	5,9	5,8	6,1	5,9	6,2	6,3	6,35
CO ₂ , мг/л	1373	1584	246	1780	720	1280	860	732	729
HCO ₃ ⁻ , мг/л	1708	1927	403	1159	830	851	1037	842	1590
SO ₄ ²⁻ , мг/л	25	62	89	17	16	19	29	29	16
Cl ⁻ , мг/л	5	106	16	4	1	14	17	9	23
Ca ²⁺ , мг/л	280	394	80	240	185	202	257	174	224
Mg ²⁺ , мг/л	24	122	33	59	37	24	18	19	32
Na ⁺ , мг/л	293	141	54	58	38	58	85	93	279
K ⁺ , мг/л	8	1	1	4	4	5	6	15	43
Минерализация, мг/л	2343	2753	676	1540	1110	1234	1413	1181	2207
F ⁻ , мг/л	2,1	0,4	0,4	1,2	0,5	0,2	0,3	0,2	0,5
SiO ₂ , мг/л	62	41	21	49	36	38	38	24,4	43,7
Fe, мг/л	7	8	2	13	3	–	6	0,1	1,2
Rn, Бк/л	880	–	–	–	–	–	–	208	206
Тип вод	HCO ₃ -Ca-Na	HCO ₃ -Ca-Mg	HCO ₃ -Ca-Mg	HCO ₃ -Ca-Mg	HCO ₃ -Ca-Mg	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca-Na	HCO ₃ -Na-Ca
O ₂ , об.%	$\frac{—}{0,7}$	$\frac{11,2}{0,6}$	$\frac{—}{1,5}$	$\frac{6,7}{—}$	–	–	$\frac{—}{2,4}$	$\frac{13,3}{—}$	$\frac{12,7}{—}$
N ₂ , об.%	$\frac{—}{3}$	$\frac{48,1}{2,5}$	$\frac{—}{6,5}$	$\frac{32,9}{—}$	–	–	$\frac{—}{10,1}$	$\frac{52,1}{—}$	$\frac{53,1}{—}$
CO ₂ , об.%	$\frac{—}{96,2}$	$\frac{40,8}{97}$	$\frac{—}{92}$	$\frac{60,4}{—}$	–	–	$\frac{—}{87,2}$	$\frac{34,6}{—}$	$\frac{34,3}{—}$
CH ₄ , об.%	$\frac{—}{0,01}$	$\frac{0,002}{0,001}$	$\frac{—}{0,0005}$	$\frac{0,001}{—}$	–	–	$\frac{—}{0,2}$	–	–

Примечание. «–» – нет данных. *n – количество точек опробования. В числителе – растворённый газ (об.%), в знаменателе – свободный газ (об.%).

Среди анионов преобладает HCO_3^- (1085–1870 мг/л), содержание SO_4^{2-} составляет от 5 до 45 мг/л. Повышенные концентрации Cl^- наблюдаются в водах восстановительной обстановки (13–33 мг/л). В катионном составе в высоких концентрациях содержатся Na^+ (163–358 мг/л), Ca^{2+} (190–270 мг/л), Mg^{2+} (29–45 мг/л) и K^+ (24–56 мг/л). Концентрация растворённой CO_2 изменяется от 277 до 1133 мг/л.

Разгрузка термальных углекислых вод сопровождается отложением травертинов. В термальных углекислых водах стоит отметить высокие концентрации SiO_2 (26–55 мг/л), Fe (0,1–4,4 мг/л), Li (0,36–1,1 мг/л), Sr (2,4–5,5 мг/л), Al (0,002–3,25 мг/л), Br (0,02–0,78 мг/л), Ba (0,31–1,55 мг/л), Rb (0,08–0,24 мг/л), Ti (2,30–204 мкг/л), Ni (0,1–17,3), V (0,13–11,7 мкг/л), Pb (0,009–3,8 мкг/л), Ge (0,15–5,3 мкг/л), U (0,66–11,9 мкг/л), Th (0,001–0,33 мкг/л).

Состав растворённых газов холодных и термальных углекислых вод Чойгана существенно не отличается и представлен азотом – при средних значениях 52,5 об. %, углекислым газом – 34,5 об. %, и кислородом – 13 об. % (рис. 2). Содержание азота и кислорода в газовом составе источников связано с поступлением их из атмосферы, где их объёмные доли составляют 78,09 об.% и 20,95 об.%, соответственно [Краткий справочник..., 1977]. В источниках наблюдается относительно постоянное отношение $\text{N}_2:\text{O}_2$, которое составляет $4,1 \pm 1,0$ моль/моль, и является чуть более высоким, чем это отношение в воздухе (3,7 моль/моль).

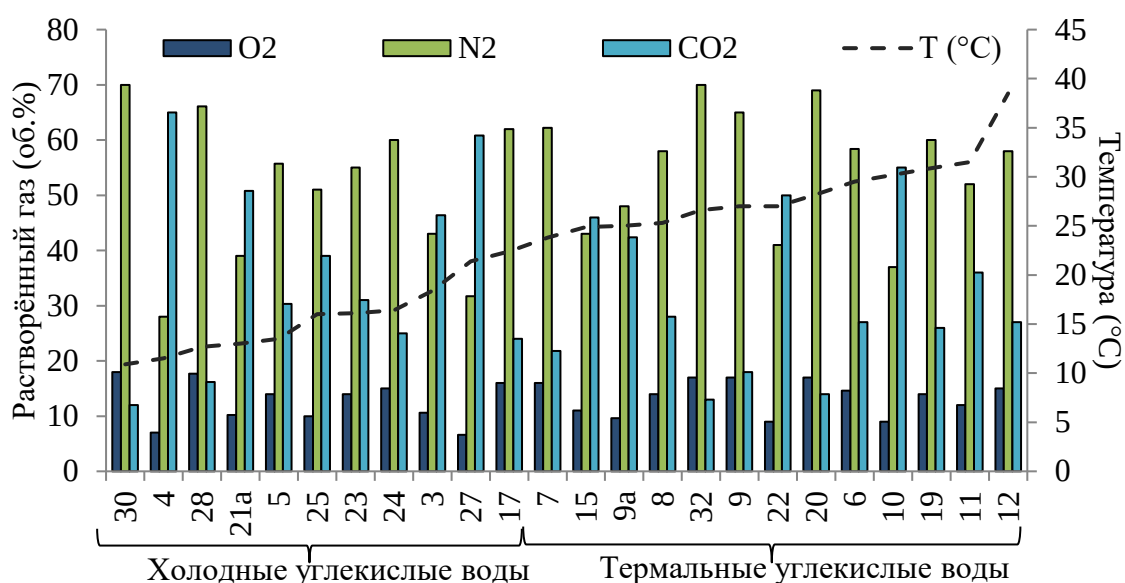


Рис. 2. Состав растворённых газов подземных вод природного комплекса Чойган

Доля углекислого газа в составе растворённого газа сильно варьируется и находится на порядки выше, чем в атмосферном воздухе. Величина CO_2 в газовом составе изменяется от 12 до 65 об.% с максимальным значением в источнике № 4 при минимальных значениях N_2 и O_2 – 28 и 7 об.%, соответственно, при этом стоит отметить, что в этом роднике зафиксировано самое высокое содержание растворённой углекислоты – 1488 мг/л.

Состав газа углекислых вод отличается от газового состава атмосферы или поверхностных вод, большей долей CO_2 за счет интенсивного проявления на этой территории вод зон разрывных нарушений, выводящие CO_2 . Это говорит о том, что отбираемые газы представляют собой смесь воздуха и CO_2 , поступающего по глубинным

разломам. Весьма изменчивое содержание углекислого газа в газовом составе вод может

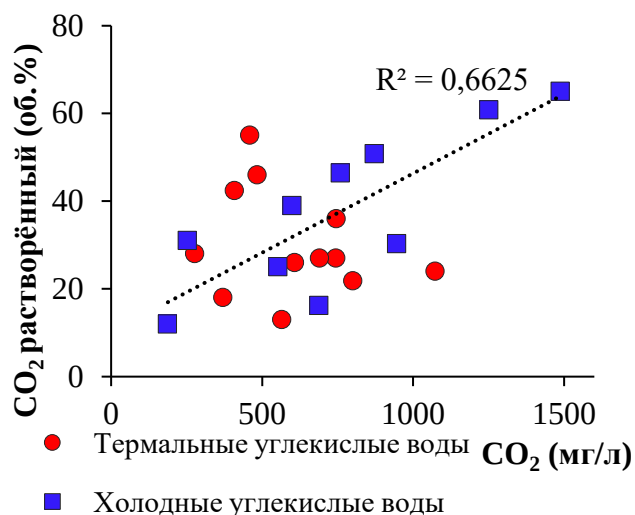


Рис. 3. Зависимость содержания растворённого CO_2 от углекислоты в подземных водах Чойгана

незначительные примеси метана и этана.

Проведённые радонометрические исследования установили наличие инертного газа радона в большинстве родников Чойгана (рис. 4) в концентрациях, имеющих лечебное значение. В холодных углекислых водах уровень радона составляет от 53 до

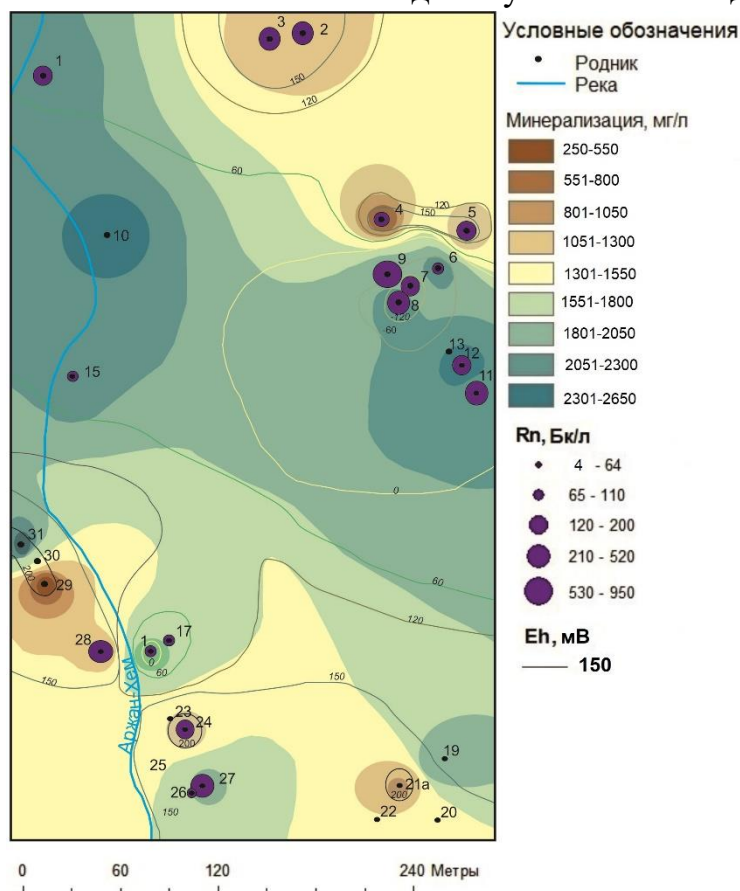


Рис. 4. Карта распределение радона на территории природного комплекса Чойган

отражать неравномерное поступление и растворение углекислоты (рис. 3).

В холодных углекислых водах Чойгана наблюдается прямая зависимость между содержанием растворённого газа CO_2 и растворённой углекислоты. В термальных водах такой зависимости не наблюдается, поскольку при повышении температуры степень растворимости CO_2 уменьшается.

По данным ранее проведённых исследований, свободный газ представлен углекислым газом (94–96 об.%), азотом (3–5 об.%), кислородом (около 1 об.%) и аргоном атмосферного происхождения, а также имеются

520 Бк/л, с максимальным значением в источнике № 3, расположенном на севере рассматриваемого участка. В термальных водах величина радона изменяется от 4 до 948 Бк/л, максимальное значение зафиксировано в центре участка в роднике № 9. Образование радоновых вод связано с радиоактивным распадом и эманированием пород, обогащенных радиоактивными элементами. Исходя из бальнеологической значимости, подземные воды Чойгана с концентрацией углекислоты 500–1500 мг/л и содержанием радона 185–948 Бк/л можно отнести к слабоуглекислым слаборадоновым водам.

В северной части рассматриваемой территории, примерно в 100–150 км от Чойгана, располагается группа холодных «северных родников». В бассейне

р. Кизи-Хем на абсолютных отметках 1600–1800 м на площади около 1400 км² имеются многочисленные выходы углекислых вод, наиболее представительными являются родники Верхний и Нижний Кадыр-Ос, Соруг (Шандал-Ой) – два выхода, Даштыг-Хем (Арыскан), Исвен (два выхода).

Родники Верхний и Нижний Кадыр-Ос располагаются в 4 км друг от друга на левом берегу р. Улуг-Кадыр-Ос. В пойме р. Соруг располагаются два выхода Соруг и Соруг 1. У северного склона горы Арыскан на берегу р. Аржан-Хем находится родник Даштыг-Хем. В основании Удинского хребта находится родник Исвен (основной выход) на правом берегу р. Соруг-Хем. В 200 м от основного выхода ниже по течению р. Соруг-Хем на левом берегу находится еще один выход углекислых вод.

Образование северных родников приурочено к зоне сочленения Кандатского разлома в месте его пересечения с оперяющими зонами разрывных нарушений. Водовмещающие отложения представлены сложным сочетанием нижнепротерозойских, преимущественно алюмосиликатных образований, эффузивно-осадочных, карбонатно-терригенных отложений среднего кембрия и девона, прорванных интрузиями различного возраста (нижне- и средне кембрийскими плагиогранитами, габбро-диоритами и гранитоидами, нижнеордовикским гранитами и гранодиоритами, нижнедевонскими щелочными гранитоидами). В непосредственной близости от мест разгрузки подземных вод отмечаются проявления неоген-четвертичных излияний базальтов. Родники приурочены к области развития вулканогенных формационных комплексов среднего и позднего палеозоя и мезозоя.

Исследуемая территория характеризуется широкими проявлениями зон рудной минерализации, в частности, здесь известны Аксугское медно-порфировое месторождение и Кадыр-Ойское рудопоявление, Арысканское проявление редкоземельной минерализации, группа рудопоявлений к югу от Арысканского – Монгойское, Анныяк-Тооргу-Ос-Хем, образующие Монгойский рудный узел.

По химическому составу углекислые воды северных родников являются гидрокарбонатными кальциево-магниевыми/натриевыми, как пресные, так и слабосоленоватые, с минерализацией 0,7–2,7 г/л. Температура вод лежит в пределах 3–11°C, pH изменяется от 5,8–6,3, величина Eh составляет -20 – 66 мВ. Из основных анионов здесь преобладают HCO₃⁻ (403–1927 мг/л), SO₄²⁻ (16–89 мг/л) и Cl⁻ (1–106 мг/л); из катионов – Ca²⁺ (80–394 мг/л), Na⁺ (38–293 мг/л) и Mg²⁺ (18–122 мг/л). Концентрация растворённой CO₂ в родниках изменяется от 246 до 1780 мг/л. Наличие зон рудной минерализации проявляется в водах в виде высоких содержаний SO₄²⁻, Mg²⁺, Na⁺, SiO₂ (21–62 мг/л), Fe (0,1–13,5 мг/л) и многих микрокомпонентов: Sr (0,7–1,8 мг/л), Mn (0,1–1,2 мг/л), Li (0,03–0,99 мг/л), Rb (0,1–74 мкг/л), Be (0,03–121 мкг/л), U (0,5–953 мкг/л), Zr (0,04–181 мкг/л), As (0,1–514 мкг/л), Zn (1,9–18,9 мкг/л) и др. Максимальная концентрация урана (953 мкг/л) и радона (880 Бк/л) отмечена в роднике Даштыг-Хем, приуроченного к проявлению рудного месторождения Арысканское.

Состав растворённых в воде газов в родниках Верхний Кадыр-Ос и Соруг представлен преимущественно CO₂ (40,8–60,4 об.%), на долю азота приходится 32,9–48,1 об.%, а кислорода 11,2–6,7 об.%. Также в газовом составе обнаружен метан в незначительном количестве (0,001–0,002 об.%). Значения отношения N₂:O₂ во всех родниках близкие и составляют 4,3±0,5 моль/моль, что выше, чем в воздухе (3,7 моль/моль) и отражают низкие содержания азота и кислорода в газовом составе углекислых вод. Данные по составу растворённых газов других родников отсутствуют.

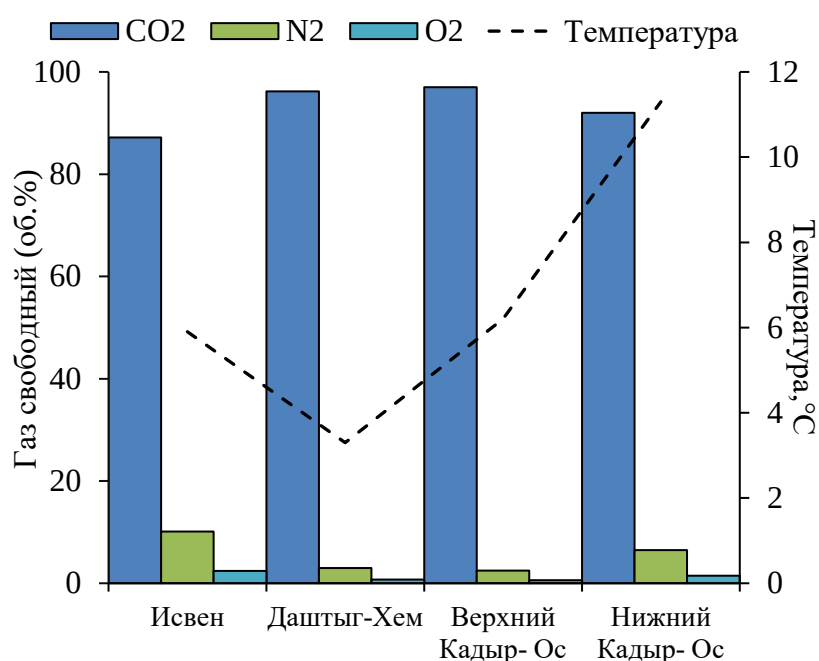


Рис. 5. Состав свободного газа подземных вод северных родников

В составе свободного газа углекислых вод северных родников доминирует углекислый газ, на его долю приходится от 87,2 об.% до 97 об.%. В значительно меньшем количестве присутствует азот (2,5–10,1 об.%), в углекислых водах обычно его содержание не превышает 10 об.% в свободной газовой фазе [Лаврушин, 2008], и кислород (0,6–2,4 об.%), который захватывается потоком инфильтрационных вод [Лаврушин, 2008]. Также в газовом составе родников обнаружен метан 0,0005–0,2 об.% с наибольшим его содержанием в роднике Исвен.

Таким образом, все углекислые воды северо-востока Тувы являются преимущественно слабосолоноватыми, слабокислыми, по температуре выделяются как холодные, так и термальные родники с окислительной и восстановительной средой. Основным анионом в воде является гидрокарбонат-ион, катионный состав холодных углекислых вод преимущественно кальциевый, термальные воды отличаются преобладанием натрия. В газовом составе доминирует углекислый газ в свободной фазе. В составе растворённого газа, кроме CO_2 , присутствуют газы атмосферного генезиса N_2 и O_2 . Наличие горных пород с повышенным содержанием радиоактивных элементов – гранитов, сланцев и сиенитов, способствует формированию углекислых радоновых вод.

Второе защищаемое положение. В областях проявления новейшего вулканизма на северо-востоке Тувы выделяются две группы углекислых родников. Первая группа включает термальные и холодные воды, разгружающиеся на абсолютных отметках 1500–1600 м, а вторая группа – холодные родники, расположенные на отметках 1600–1800 м. На основе результатов расчета геотермометров и равновесия вод с вторичными минералами установлено, что глубинная температура формирования вод первой группы составляет в среднем 100°C для термальных и 72°C для холодных, а для вод второй группы – 91°C.

Температура является одним из ведущих параметров, контролирующих равновесие в системе вода–порода, влияющих на растворяющую способность подземных вод и скорость химических реакций. Любые ее изменения как на глубине, так и на поверхности, влияют на формирование химического состава воды. Растворение минералов и поступление из них химических элементов в воду происходит на протяжении всего пути движения вод. На глубине под воздействием высоких температур этот процесс усиливается.

Методика расчёта глубинных температур в резервуаре, при которых происходит формирование химического состава подземных вод, с помощью геотермометров и индексов насыщения вод минералами основана на установлении температуры, при

которой вода на глубине находится в равновесии с минералами ($SI=0$), и в воде прекращается рост таких химических элементов как Ca, Mg, Na, K, Si, и наступившее равновесие сохраняется при движении вод к месту разгрузки. Результаты расчётов глубинных температур углекислых вод северо-востока Тувы представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчётные температуры формирования углекислых вод северо-востока Тувы

Название/номер родника	Т, °С воды при разгрузке	Глубинная Т, °С, рассчитанная по геотермометрам	
		SiO ₂	Na–K–Ca
Родники, разгружающиеся на абс. отметках 1500–1600 м			
Термальные воды Чойгана			
1	23	103	117
6	30	103	114
7	24	96	115
8	25	101	100
9	27	97	112
10	30	107	118
11	32	100	119
12	39	102	116
13	37	103	118
15	25	94	99
16	27	93	108
17	22	74	84
19	31	98	91
31	27	95	104
Среднее	29	98	108
Холодные воды Чойгана			
2	18	83	79
3	18	84	79
4	12	66	51
5	14	77	82
21а	13	61	42
23	16	68	62
24	16	67	62
26	20	84	84
27	21	79	82
28	13	69	58
30	11	63	48
Среднее	16	73	66
Родники, разгружающиеся на абс.отметках 1600–1800 м			
Исвен основной выход	5,2	90	140
Исвен	5,9	89	133
Соруг	5,7	101	123
Соруг 1	14,1	89	134
Верхний Кадыр-Ос	11,8	92	52
Нижний Кадыр-Ос	14,4	64	86
Даштыг-Хем	6,1	113	107

В таблице родники сгруппированы в зависимости от их высотного положения. Можно выделить несколько групп вод в зависимости от высоты разгрузки родников.

Первая группа родников, расположенных на абсолютных отметках 1500–1600 м, включает холодные и термальные углекислые воды Чойгана. Вторую группу составляют родники Исвен, Соруг, Верхний и Нижний Кадыр–Ос, Даштыг–Хем, расположенные на отметках 1600–1800 м.

В первой группе для термальных углекислых вод Чойгана глубинные температуры, рассчитанные по кремниевому и Na-K-Ca геотермометрам в среднем составляют около 100°C. Для холодных углекислых вод Чойгана глубинные температуры формирования оказались более низкими, на уровне 70°C.

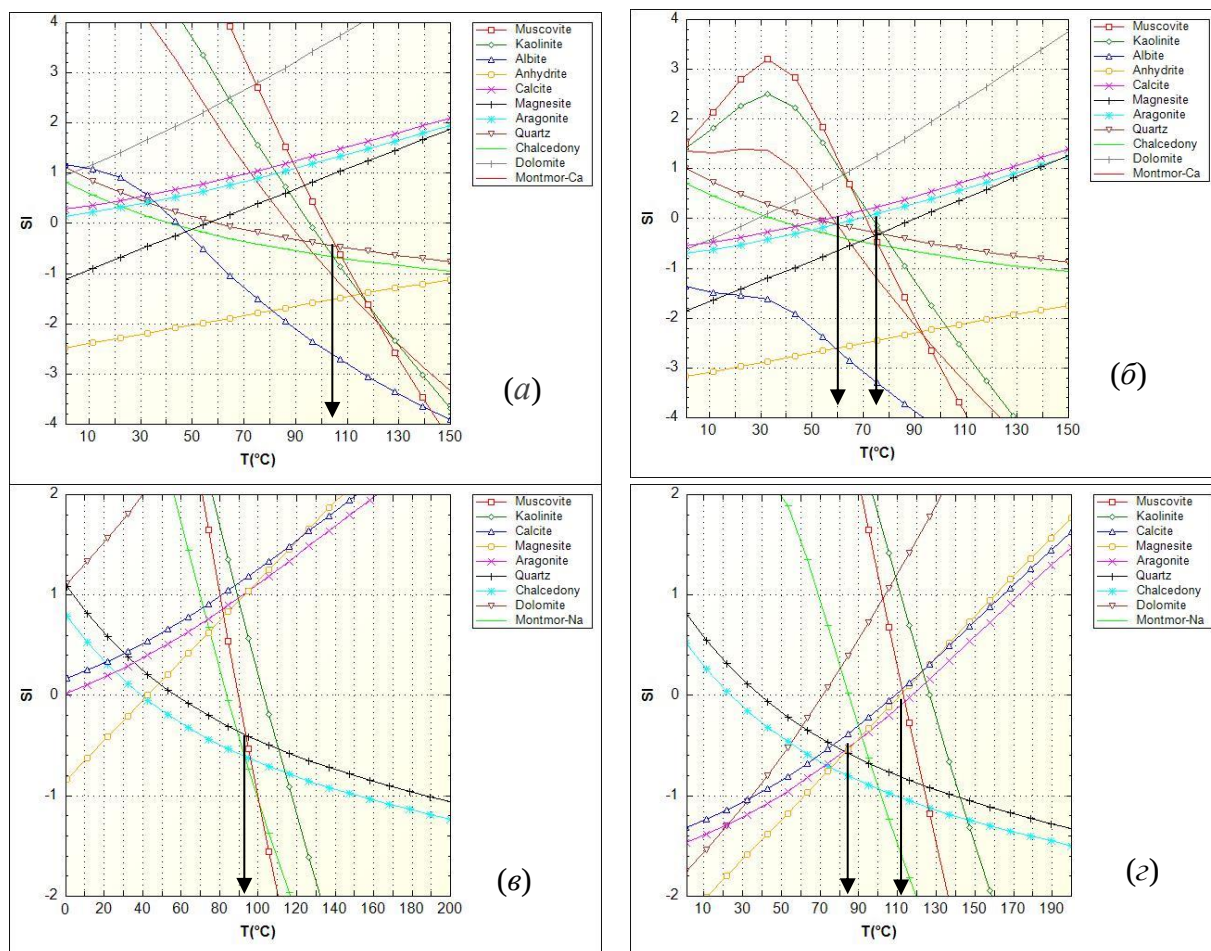
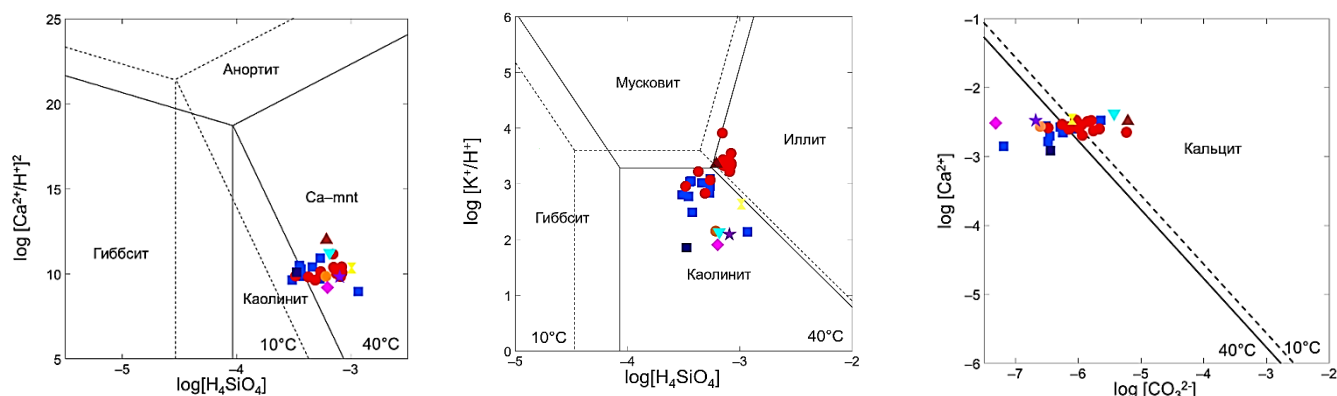


Рис. 6. Изменение величины индексов насыщения вод минералами с ростом температуры. Природный комплекс Чойган: а) родник № 31, б) родник № 2; северные родники: в) Исвен основной выход, г) Нижний Кадыр–Ос

Расчёты глубинных температур по геотермометрам согласуются с результатами, полученными вторым методом оценки температуры по индексам насыщения вод минералами (рис. 6). Равновесие термальных (рис. 6а) и холодных углекислых вод Чойгана (рис. 6б) с мусковитом, каолинитом, халцедоном и кварцем устанавливается при температурах около 90–110°C и 60–75°C, соответственно.

Несмотря на то, что холодные углекислые воды второй группы с температурой разгрузки <15°C не являются термальными, на глубине воды будут нагреваться под воздействием геотермического градиента, следовательно, глубинные температуры должны быть намного выше. По расчётам геотермометров глубинные температуры в среднем оцениваются 91–110°C, что также согласуется с результатами оценки равновесия вод с минералами, показавшие температуру 90–110°C.

Равновесия вод с рассматриваемыми минералами, рассчитанные для глубинных температур, сохраняются и при разгрузки углекислых вод на поверхности. Все воды при температуре разгрузки равновесны с такимм алюмосиликатными минералами как каолинит, мусковит, Са, Na, К, Mg-монтмориллониты, а также с кварцем, в термальных водах и некоторых холодных достигается равновесие с карбонатными минералами (кальцитом, доломитом) (рис.7).



Условные Обозначения: ■ – Нижний Кадыр-Ос; ● – Соруг 1; ▲ – Исвен; ▼ – Верхний Кадыр-Ос; ◆ – Исвен основной; ▼ – Даштыг-Хем; ☆ – Соруг; ■ - углекислые холодные воды Чойгана; ● - углекислые термальные воды Чойгана.

Рис. 7. Диаграмма полей устойчивости основных минералов с нанесением данных по химическому составу исследуемых углекислых вод, $T=10^0C$ (пунктирная линия) и 40^0C (сплошная линия)

Третье защищаемое положение. Углекислые воды северо-востока Тувы имеют инфильтрационное происхождение. Атмосферные осадки поступают в гидрогеологическую систему в области питания, проникают по разломам до глубины 3–4 км, нагреваются, обогащаются химическими элементами за счет растворения горных пород и поступления CO_2 преимущественно метаморфогенного, реже мантийного генезиса.

С учётом всех полученных результатов по химическому составу родников северо-востока Тувы разработана схема формирования углекислых вод района исследования (рис. 8). В рассматриваемом районе формирование химического состава подземных вод начинается в области питания, где атмосферные осадки с температурой в летний сезон около 13^0C проникают в гидрогеологическую систему по многочисленным трещинам и разломам тектонического происхождения. О метеорном происхождении вод свидетельствует изотопный состав кислорода и водорода, значения изотопа кислорода в углекислых водах Чойгана изменяются от -13,7 до -18,8 ‰, водорода – от -127 до -142 ‰.

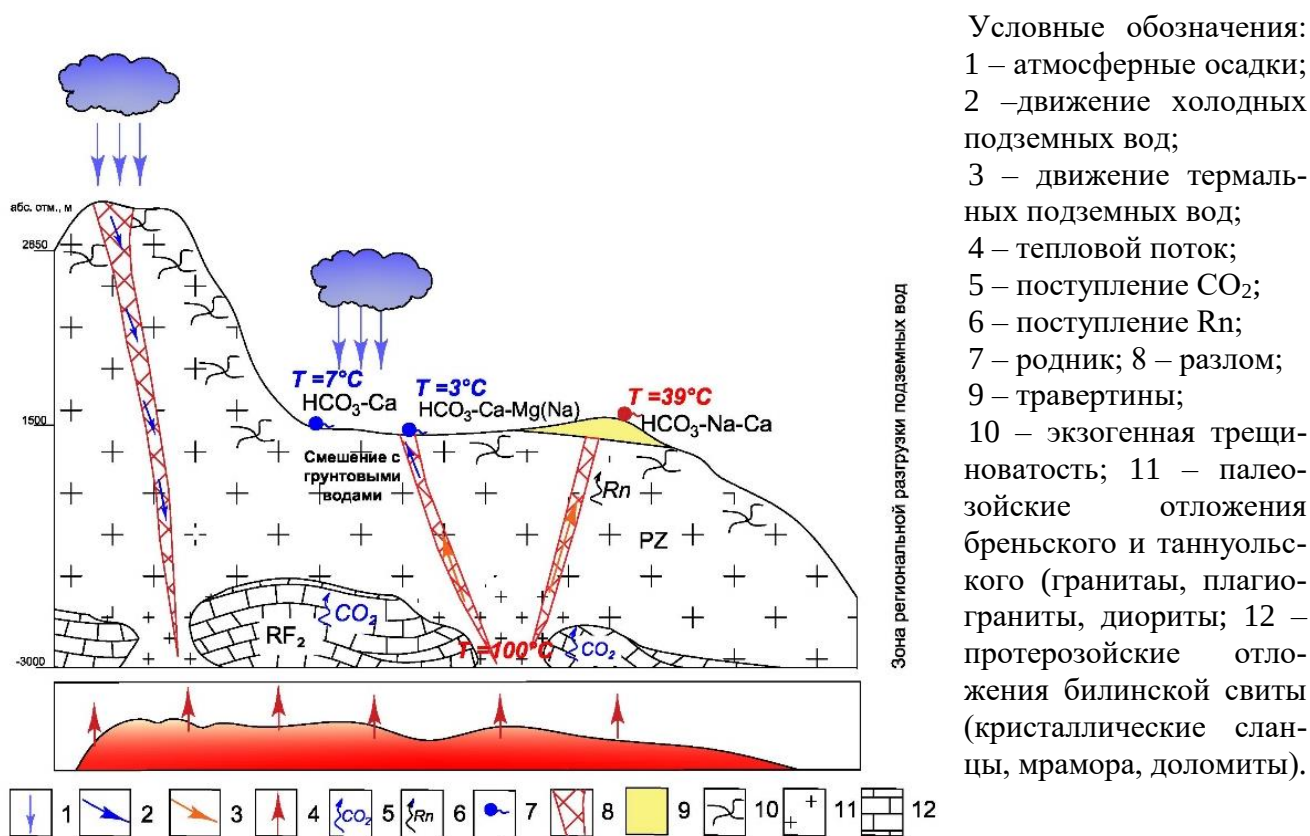


Рис. 8. Схема формирования химического состава углекислых вод северо-востока Тувы

На рис. 9 значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ располагаются вблизи линии Г. Крейга (GMWL), характеризующей средний изотопный состав метеорных и поверхностных вод земного шара. Однако наблюдается отклонение положения точек $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, что указывает на неравновесное изотопное фракционирование.

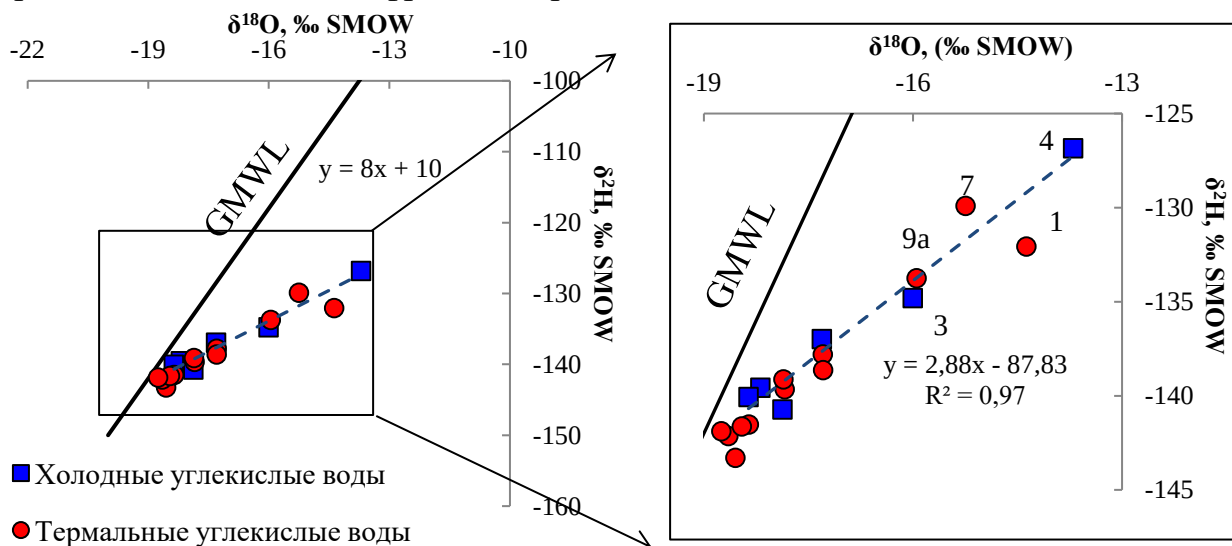


Рис. 9. Изотопный состав подземных вод Чойгана

Несколько точек холодных и термальных углекислых вод значительно отделяются от основной группы, наклон линии тренда более пологий, отражающий утяжеление состава по кислороду. «Кислородный сдвиг» часто возникает в геотермальных системах в результате изотопного обмена при высоких температурах между водой и минералами

вмещающих пород, которые обогащены $\delta^{18}\text{O}$, при этом чем больше время взаимодействия, тем больше сдвиг [Arnorsson, 2000; Belhai, 2016].

Также влияние оказывает и присутствие в водах значительного количества CO_2 . В некоторых родниках была установлена зависимость значений $\delta^{18}\text{O}$ от количества растворённой CO_2 в воде (рис. 10). Максимальный «отрицательный сдвиг» по кислороду наблюдается в холодных углекислых водах родника №4 с высоким содержанием растворённой углекислоты (1488 мг/л) и преобладанием CO_2 в газовом составе (65 об.%). Сдвиг является результатом изотопного обмена кислорода воды с кислородом CO_2 , происходит фракционирование изотопов кислорода во время барботирования свободного восходящего CO_2 на дегазационных пузырьках [Karolytė, 2017].

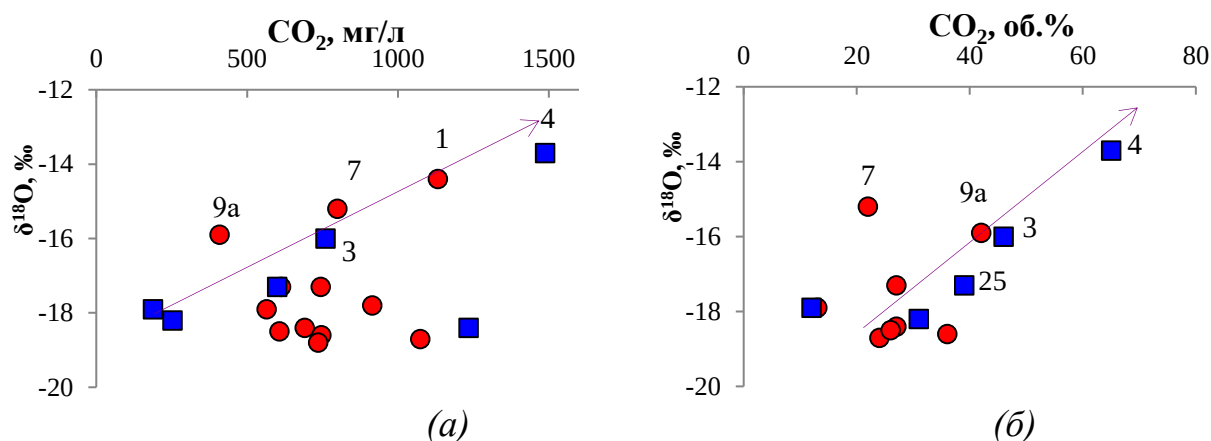
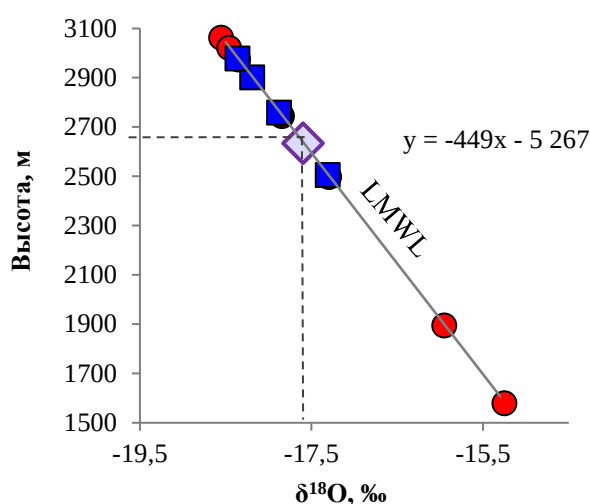


Рис. 10. Зависимость (а) – концентрации свободной углекислоты, мг/л; (б) – растворённого в воде газа CO_2 , об.% от изотопа кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) подземных вод природного комплекса Чойган [Shestakova et al., 2018]

Высотное положение области питания рассматриваемых подземных вод ориентировочно соответствует 1600–3100 м (рис. 11), которая оценивалась по методике изложенной в работах [Gibrilla, 2017, Peters, 2018] и заключалась в построении местной линии атмосферных осадков (LMWL) с нанесением данных по изотопному составу подземных вод. Данные по изотопному составу осадков получены с помощью онлайн калькулятора изотопов атмосферных осадков, с использованием географических координат и высот [The online isotopes...]. Значения изотопов водорода (-117,0 – -139,0 ‰) и кислорода (-15,3 – -18,5 ‰) атмосферных осадков были взяты на ближайших к родникам высотах – 1600–3044 м.

График показывает (рис. 11), что исследуемый изотопный состав подземных углекислых вод ложится на смоделированную линию местных метеорных вод. Наблюдается корреляция между высотой и $\delta^{18}\text{O}$, подтверждающая, что питание подземных вод осуществляется преимущественно за счет современных атмосферных вод.



Условные обозначения:
 ● – термальные углекислые воды,
 ■ – холодные углекислые воды,
 ◆ – средний состав термальных и холодных углекислых вод Чойгана.

Рис. 11. Оценка высоты области питания подземных вод природного комплекса Чойган. Линия регрессии показывает соотношение между высотой и смоделированным значением $\delta^{18}\text{O}$ локальных атмосферных осадков

На начальных этапах формирования газовый состав подземных вод соответствует атмосферному газу с преобладанием азота и кислорода. В процессе погружения по

Таблица 3. Значение изотопа $\delta^{13}\text{C}$ (‰) в углекислых водах северо-востока Тувы

Номер/название родника	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, ‰ (VPDB)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, ‰ (VPDB)
Природный комплекс Чойган		
5	-2,1*	0,3*
10	-	1,0*
11	-1,1*	-
15	-	1,0*
18	-	-0,1*
19	-1,6*	-
27	-	-0,3*
Северные родники		
Верхний Кадыр-Ос	-4,4*	1,4
Нижний Кадыр-Ос	-	-0,3
Даштыг-Хем	-4,3*	0,9
Исвен	-4,1*	-1,9
Соруг	-3,9*	-

Примечание. * по данным [Оргильянов и др., 2018]. «-» – данные отсутствуют.

системам разрывных нарушений газовый состав вод теряет растворённый кислород, происходит увеличение содержания углекислого газа, поступающего по разломам с больших глубин, и уменьшение доли азота.

Особенностью рассматриваемых вод является наличие в водах в значительных количествах CO_2 , поступающего по зонам разрывных нарушений. О глубинном происхождении CO_2 свидетельствует изотопный состав углерода в рассматриваемых водах. Результаты исследования изотопа углерода показали, что углекислые воды Чойгана характеризуются относительно «тяжёлым» углеродом, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ составляет -0,3– +1,0‰ (табл. 3), что указывает на происхождение

углекислоты за счет термометаморфизма карбонатных пород, мощные прослои которых широко распространены в геологическом строении исследуемого района.

Вывод о генезисе CO_2 на Чойгане согласуется с данными многих авторов об образовании углекислого газа в углекислых водах северо-востока Тувы за счет разложения карбонатных пород под воздействием температуры [Оргильянов и др., 2015; Плюсин, 2007]. В исследуемых углекислых водах северных родников величины $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ заметно меняются от -1,9 до +1,4 ‰ и от -3,9 до +4,4‰, соответственно, что примерно соответствует промежуточному положению между мантийным и термометаморфическим происхождением углекислоты.

Однако, согласно [Лаврушин, 2018], различные процессы, происходящие в системе вода–порода–газ, могут повлиять на исходные значения $\delta^{13}\text{C}$]. При растворении/дегазации CO_2 , осаждении/растворении карбонатов происходит значительное фракционирование изотопов углерода в углекислотной системе [Лаврушин, 2018]. Следовательно, вывод о генезисе CO_2 , особенно о мантийном, на основе изотопных характеристиках следует делать осторожно.

Поступление в воду значительных количеств CO_2 вызывает рост минерализации вод, в том числе и за счет образования HCO_3^- по реакции: $\text{OH}^- + \text{CO}_2 = \text{HCO}_3^-$. В результате этой реакции нейтрализуется щелочность раствора, образующаяся в результате гидролиза алюмосиликатных минералов и величина pH поддерживается на уровне 5,8–6,3. Агрессивное воздействию углекислоты, кислая среда способствуют более активному выщелачиванию элементов из вмещающих пород и их накоплению в растворе (Si, Li, Sr, Rb, Be, U, Zr, As, Zn и др.). Растворяя первичные минералы, вода приходит в состояние насыщения такими минералами как каолинит, мусковит, монтмориллонит, кальцит, кварц.

При этом воды проникают на глубину до 3–4 км и нагреваются до температур около 100°C. Глубина, на которую воды могут погружаться во время циркуляции, была установлена исходя из вычисленного значения геотермического градиента для исследуемого района (33 °C/км) по величине плотности теплового потока (80–84 мВт/м²) [Дучков, 2010; Рычкова 2009] и средней теплопроводности гранитов (2,5 Вт/(м·°C)).

Далее вода стремится к земной поверхности из области высоких давлений в область низких по зонам разрывных нарушений (трещинам, разломам), при этом температура воды понижается, отдавая аккумулированное тепло вмещающим породам.

По мере движения вод к месту разгрузки в растворённом газовом составе вод увеличиваются концентрации атмосферных N_2 и O_2 . Наличие горных пород с повышенным содержанием радиоактивных элементов – гранитов, сланцев и сиенитов, способствуют формированию углекислых, радоновых вод.

На определённых участках на высоте 1500–1600 м создаются благоприятные условия для выхода на поверхность термальных углекислых вод с температурой до 39°C, имеющих гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав, минерализацию до 2,6 г/л и восстановительную обстановку.

Холодные углекислые родники, характеризующиеся близкой к термальным водам глубинной температурой, имеют температуру на выходе 2–11 °C и разгружаются на более высоких абсолютных отметках 1600–1800 м, что определяется более длинным путем их миграции, приводящим к остыванию при медленном и продолжительном их движении по разломам к зоне разгрузки.

Заключение

На северо-востоке Тувы проявления углекислых минеральных вод приурочены к зонам кайнозойской тектоно-магматической активизации и к зоне глубинного Азасско-Жомболойского и Кандатского разломов, подводящих углекислый газ. В районе исследования развиты холодные и термальные слабосолоноватые углекислые воды, по химическому составу преимущественно гидрокарбонатные с разным катионным составом, среда которых слабокислая. Термальные углекислые воды имеют температуру до 39 °C, отличаются гидрокарбонатным натриево-кальциевым составом и характеризуются восстановительной обстановкой. Агрессивное воздействие

углекислоты, кислая среда, а также повышенная температура способствуют более активному выщелачиванию элементов из вмещающих пород и их накоплению в растворе. Полученные новые данные по распространенности микрокомпонентов в исследуемых водах установили высокие содержания многих микрокомпонентов (Si, Sr, Li, U, Th, Rb, Cs, B, As, Ge и др.), в зоне рудной минерализации отмечается накопление редкоземельных элементов в высоких количествах.

Состав свободных газов представлен преимущественно CO₂, в меньшей степени азотом и кислородом. Наличие гранитов с повышенным содержанием радиоактивных элементов способствует проявлению углекислых радоновых вод.

По происхождению воды являются инфильтрационными. Углекислота в подземных водах имеет глубинное происхождение. По изотопному анализу $\delta^{13}\text{C}$ в термальных водах установлено, что CO₂ образуется в процессе метаморфизма карбонатных пород при высоких температурах, при этом в отдельных родниках возможно подмешивание мантийного CO₂.

Все рассматриваемые углекислые воды северо-востока Тувы пересыщены по отношению к каолиниту, мусковиту, монтмориллонитам, кварцу, в термальных водах и некоторых холодных достигается равновесие с кальцитом и доломитом.

Согласно расчётам глубинных температур формирования вод, подземные воды нагреваются до 100°C и проникают на глубину порядка 3–4 км, а затем, при движении вод по разломам к дневной поверхности, часть вод значительно остывает и разгружается в виде холодных источников на высотных отметках 1600–1800 м, а часть вод не успевает остыть при выходе на поверхность на более низких высотных отметках –1500–1600 м.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК или международные реферативные базы данных

1. **Shestakova, A.**, Geothermometry and Isotope Geochemistry of CO₂-Rich Thermal Waters in Choygan, East Tuva, Russia / N. Guseva, Y. Kopylova, A. Khvashevskaya, D. Polyu, I Tokarev // Water. – 2018. – 10(6). – p. 729.

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

3. Kopylova, Y.G. Uranium and thorium behavior in groundwater of the natural spa area "Choygan mineral water" (East Tuva) / N.V. Guseva, **A.V. Shestakova**, A.A. Khvashchevskaya, K.D. Arakchaa // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015 – Vol. 27. – p. 1–6.

4. Kopylova, Y.G. Dissolved gas composition of groundwater in the natural spa complex "Choygan mineral waters" (East Tuva)/ N.V. Guseva, **A.V. Shestakova**, A.A. Khvashchevskaya, K.D. Arakchaa // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014 – Vol. 21. – p. 12022.

Прочие издания

5. **Шестакова, А.В.** Оценка степени насыщенности углекислых вод Восточного Саяна вторичными минералами / Н.В. Гусева, Ю.Г. Копылова, А.А. Хващевская, Д.А. Polyu // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы

Третьей Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Чита, 20–25 августа 2018 г. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2018. – С. 430–434.

6. **Шестакова, А.В.** Оценка пластовых температур термальных вод природного комплекса Чойган (Восточная Тува) / Ю.Г. Копылова, А.А. Хващевская, Н.В. Гусева, Е.А. Солдатова, Е.Ю. Каричева, И.С. Щёголева // Курортная база и природные лечебно–оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов: опыт и перспективы использования в целях профилактики заболеваний, лечения и реабилитации больных. Материалы третьей 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. 163 – 166.

7. Оргильянов, А.И. Минеральные воды Тоджинского района Республики Тыва)/ К.Д. Аракчаа, И.Г. Крюкова, П.С. Бадминов, Е.А. Солдатова, **Шестакова А.В.**, К.М. Рычкова // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности, Тувы и сопредельных регионов. Материалы III Международной научно-практической конференции. Республика Тыва, г. Кызыл, ГК «БуянБадыргы», 28 июня – 1 июля 2017 г. Том 3. /Гл. ред. К.Д. Аракчаа. – Кызыл, ООО «Кооператив «журналист», 2017. – С. 147-156.

8. **Шестакова, А.В.** Гидрогеохимические условия формирования минеральных вод Восточной Тывы // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего — наука молодых», г. Казань, 20–23 сентября 2016 г. Москва: Изд-во Инконсалт К, 2016. — Т. 1. – С. 177–179.

9. **Shestakova, A.V.** Assessment of reservoir temperatures of Tarys and Choygan geothermal systems (Eastern Tuva) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова, Томск, 4–8 апреля 2016 г. в 2 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Томск, Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 2. – С. 1175–1177.

10. **Шестакова А.В.** Обоснование нового гидрогеохимического типа минеральных вод на примере природного комплекса Чойган (Восточная Тыва) // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии: материалы Всероссийской конференции с международным участием, г. Томск, 23–27 ноября 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 805–808.

11. **Шестакова, А.В.** Оценка глубинных температур формирования подземных вод природного комплекса Чойган (Восточная Тува) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова, Томск, 6–10 апреля 2015 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Томск, Изд-во ТПУ, 2015 – Т. 1 – С. 460–462.

12. Копылова, Ю.Г. Особенности состава углекислых минеральных вод природного комплекса Чойган/ К.Д. Аракчаа, Н.В. Гусева, К.М. Рычкова, А.А. Хващевская, **Шестакова, А.В.**, А.И. Оргильянов, И.Г. Крюкова, П.С. Бадминов, М.А. Данилова // Курортная база и природные лечебно–оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. Материалы Второй Международной научно–практической конференции, Кызыл, 1–4 Июля 2015. – Абакан: Кооператив "Журналист", 2015 – Т. 2–1 – С. 81–88.

13. Копылова Ю.Г. Состав микрофлоры геохимического цикла углерода в углекислых водах природного комплекса Чойган (Тыва) / Н.Г. Наливайко, К.Д. Аракчаа,

Н.В. Гусева, А.А. Хващевская, **А.В. Шестакова** // Курортная база и природные лечебно–оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. Материалы II Международной научно–практической конференции, Кызыл, 1–4 июля 2015. – Абакан: Кооператив "Журналист", 2015 – Т. 2–1 – С. 66–80.

14. **Shestakova A.V.** Investigation of natural mineral waters of Choigan complex (Eastern Tyva) Geochemical conditions of natural water on the left bank of the river Tom within Tomsk area // Problems of Geology and Subsurface Development: Proceedings of the 18th International Scientific Symposium, Tomsk, April 7–11, 2014. – Tomsk: TPU Publishing House, 2014 – Vol. 2 – p. 797–798.

15. **Шестакова, А.В.** Геохимические условия формирования углекислых холодных и термальных вод природного комплекса Чойган/ М.Г. Камбалина // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова, Томск, 7–11 Апреля 2014. – Томск: Изд–во ТПУ, 2014 – Т. 1 – С. 568–570.