Геохимические особенности азотных термальных вод источников Уру и Абаканский Горячий ключ (Западный Саян)

Оргильянов А.И.¹, Копылова Ю.Г.², Аракчаа К.Д.³, Рычкова К.М.⁴, Хвашевская А.А.², Гусева Н.В.², Крюкова И.Г.¹, Сметанина И.В.²

¹ФГБУН «Институт земной коры СО РАН», Иркутск, Россия, E-mail: irig@crust.irk.ru

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия, E-mail: unpc_yoda@mail.ru

³ГБУ «Научно-исследовательский институт медико-социальных проблем и управления Республики Тыва», Кызыл, Россия, E-mail: chodura@yandex.ru

⁴ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН», Кызыл, Россия, E-mail: klara6@inbox.ru

АННОТАЦИЯ: В статье рассмотрены условия формирования и физико-химические характеристики термальных вод двух источников в Западном Саяне и характерные отличительные особенности их геохимических сред. Отмечена зависимость состава термальных вод от энергетического режима земной коры, выражающегося в величине теплового потока. Показано, что температура и химический состав воды изученных источников свидетельствуют о более охлажденном состоянии земной коры Западного Саяна по сравнению со смежными регионами.

The geochemical features of nitric thermal waters of springs Uru and Abakan hot (Western Sayan)

Orgilianov A.I.¹, Kopylova Yu.G.², Arakchaa K.D.³, Rychkova K.M.⁴, Khvashevskaya A.A.², Guseva N.V.², Kryukova I.G.¹, Smetanina I.V.²

¹Federal State Budget Institution of the Science Institute of Earth's Crust the SB of the RAS, Irkutsk, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, Russia

³Scientific Research Institute of Medical Social Problems and Management of the Republic of Tuva, Kyzyl, Russia.

⁴Federal State Budgetary Institution of Science Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources the SB of the RAS, Kyzyl, Russia

ABSTRACT: The conditions of formation and physical-chemical parameters of thermal waters and specific features of their geochemical environments from mineral springs at the Western Sayan are considered at this paper. It is noted, that the composition of thermal waters is depend on the energetic regime of the earth crust, which reflected in the value of heat flow. It is shown, that the temperature and chemical composition of water from studied springs indicate, that the earth crust at the Western Sayan is more cooled comparatively with neighbouring regions.

ВВЕДЕНИЕ

Состав подземных, а особенно минеральных вод, находится в тесной взаимосвязи с процессами, происходящими в земной коре. В данном сообщении показано наличие такой зависимости на примере двух термальных источников, расположенных в пределах горной системы Западного Саяна, которая представляет собой центральную часть Алтае-Саянской складчатой области. Она состоит из серии горных хребтов, вытянутых в северо-восточном направлении и резко расчлененных многочисленными водотоками. Вкрест простираения Западного Саяна протягивается долина р. Енисей (Саяно-Шушенское водохранилище). Климат района характеризуется наличием вертикальной зональности, которая выражается в увеличении с высотой суммы выпадающих атмосферных осадков. Рассматриваемая территория относит-

ся к области каледонской складчатости [7]. В геологическом строении Западного Саяна принимают участие метаморфические породы палеозойского возраста, прорванные многочисленными интрузиями гранитоидов. С востока Западный Саян граничит с герцинскими структурами Восточного Саяна, которые далее смыкаются с Байкальской рифтовой зоной – областью кайнозойской тектоно-магматической активизации с многочисленными проявлениями молодого магматизма.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с принципами районирования минеральных вод Западный Саян относится к провинции распространения азотных термальных вод, проявления которых представлены здесь двумя источниками (рис. 1).

но-карбонатный натриевый состав с присутствием фтора до 1 %-экв (0,79 мг/л).

Таблица 1. Химический состав воды источника Абаканский горячий ключ

Компоненты	Абаканский Горячий ключ		
	1950	Август 1960	08.10.2010
T, °C	37	37,5	38
pH	7,18	6,9	7,38
Eh	-	-	-
Содержание, мг/л			
Ca ²⁺	43,4	38,3	40,0
Mg ²⁺	12,2	8,3	12,2
Na ⁺	30,6	16,1	35,0
K ⁺	2,1	0	2,7
HCO ₃ ⁻	214,5	140,3	213,5
CO ₃ ²⁻	0	0	0
SO ₄ ²⁻	21,4	9,9	22,3
Cl ⁻	21,0	7,1	24,1
F ⁻	-	-	0,69
Si	26,89	26,92	24,4
Мин.	372	247	375,0
формула Курлова	$\frac{HCO_3 77 Cl 13 SO_4 10}{Ca 48 (Na + K) 30 Mg 22}$	$\frac{(HCO_3 + CO_3) 88 Cl 16 SO_4 6}{Ca 58 (Na + K) 21 Mg 21}$	$\frac{HCO_3 75 Cl 14 SO_4 10 F 1}{Ca 43 (Na + K) 35 Mg 22}$
Источник сведений	[1]	[8]	[ПНИЛ ГТХ ТПУ, Томск]

Формирование химического состава вод родников Уру определяется процессами смешения грунтовых вод зоны региональной трещиноватости с трещинно-жильными водами гранитоидов. Наибольшая доля грунтовых вод поступает в левой части бассейна водосбора, что прослеживается при исследованиях 2019 г. и проявляется в уменьшении pH, снижении содержаний кремния и минерализации вод. В правом и центральном выходах подземных вод наблюдается увеличение доли трещинно-жильных вод в смешивающихся водах и формируются щелочные воды с pH 9,5-9,6 и Eh= -230 мВ, высокими концентрациями кремния и натрия. Замеченное сезонное изменение интенсивности водообмена из-за снижения доли грунтовых вод в осенний период 2013 г. сопровождается повышением pH до 9,8, увеличением концентраций кремния и натрия и, соответственно, минерализации вод.

При увеличении интенсивности процессов взаимодействия вод с породообразующими минералами, что отражается повышением pH, увеличением содержаний кремния, значений общей минерализации и содержаний в водах ряда

микрокомпонентов – Sc, Cr, Zn, Ag, Sn, Ba, W, Mo.

Так, при изучении состава вод родника Уру в 2013 г. в подземных водах центрального (основного) выхода выявлен весьма широкий комплекс элементов в повышенных концентрациях, способных к миграции в щелочных условиях, в том числе (в мг/л): литий (0,02), скандий (0,002), хром (0,010), цинк (0,06), галлий (0,0007), германий (0,002), селен (0,002), молибден (0,009), вольфрам (0,005), а кроме того – серебро (0,0003), золото (0,00001), барий (0,912), ртуть (0,00012), висмут (0,000015).

При этом наблюдается также повышение отношения Th/U, что свойственно водам восстановительной геохимической обстановки.

Повышение торий-уранового отношения Th/U=0,5-1 наблюдается при низких концентрациях радиоактивных элементов, прежде всего, из-за снижения концентраций урана в водах ниже природного фонового уровня.

При увеличении доли грунтовых вод в 2019 г. отмечено резкое снижение этого коэффициента в окислительных условиях геохимической среды и накопления в водах урана.

Уменьшение доли грунтовых вод в процессе взаимодействия в системе «вода-порода» сопровождается повышением насыщенности вод вторичными минералами – каолинитом, монтмориллонитами, карбонатом кальция, что потенциально приводит к удалению их из раствора вместе с соосаждающимися и сорбирующимися с ними элементами, особенно, халькофильными (Cu, Zn, Pb, Cd и др.). Вместе с тем, при снижении зеркала подземных вод и увеличении доли трещинно-жильных вод, отмечено появление в водах повышенных концентраций ряда химических элементов, в том числе Ba, Ag, W, Y, Mo, PЗЭ, что может расцениваться как остаточные концентрации элементов после осаждения вторичных минералов и возможном их накоплении в водах в виде комплексных соединений с фтором, гидросульфидами и сульфидами (HS⁻, S²⁻) в щелочных восстановительных условиях водной среды.

Восстановительный характер геохимической среды характеризуется увеличением этого значения из-за уменьшения концентраций урана и благоприятных условий для миграции тория.

Увеличение доли грунтовых вод в зоне их смешения с трещинно-жильными водами в роднике Уру характеризуется также понижением температуры вод от 18,5 °C в центральном струйном выходе до 8,4 °C в левом выходе. В целом невысокие температуры вод природного комплекса Уру по сравнению с термальными азотными водами на востоке Тувы могут быть связаны с более глубоким залеганием термической литосферы и низкими величинами теплового потока в пределах Западного Саяна [3].

Таблица 2. Химический состав подземных вод природного комплекса Уру (по данным ПНИЛ ГГХ ТПУ, г. Томск)

Компоненты	Выход центральный	Выход центральный	Выход правый	Выход левый	Выход левый
Год обследования					
	2019	2013	2019	2019	2013
pH	9,6	9,8	9,5	8,79	9,75
Eh, мВ	-230	-216	-157	+156	-185
Содержание, мг/л					
CO ₃ ²⁻	23,00	36	15,30	9,00	31,2
HCO ₃ ⁻	60,00	60	96,00	54,00	36,6
SO ₄ ²⁻	45,00	43	43,00	25,50	40,3
Cl ⁻	19,70	26,6	25,70	9,60	31,9
F ⁻	0,72	0,79	0,70	0,39	0,66
Ca ²⁺	1,96	2,2	1,86	4,16	2,1
Mg ²⁺	0,01	0,01	0,03	0,65	0,01
Na ⁺	73,00	86	83,00	39,80	74
K ⁺	1,00	1,2	0,98	0,68	1,12
Si	20,59	27,09	21,24	13,20	27,99
Минерализ.	224	255	267	144	217
Li	0,0097	0,0151	0,0053	0,0076	0,0075
Be	< 0,000003	0	0,0000048	0,0000048	0
B	0,080	0,1209	0,085	0,043	0,1085
Al	0,0077	0,0171	0,013	0,0073	0,0190
Sc	0,0014	0,0015	0,0010	0,00083	0,0014
Ti	0,00097	0,00138	0,00083	0,00069	0,00121
V	0,000097	0,00020	0,000091	0,00074	0,00018
Cr	0,00013	0,01352	0,00015	0,00022	0,01406
Mn	0,00032	0,00531	0,00094	0,00085	0,00057
Fe	0,0022	0,20281	0,000073	0,00025	0,02766
Co	< 0,000001	0,00010	0,000012	< 0,000001	0,00002
Ni	0,000070	0,00255	0,00011	0,000067	0,00271
Cu	0,000027	0,00226	0,00015	0,00014	0,00033
Zn	< 0,0001	0,06046	< 0,0001	< 0,0001	0,00161
Ga	0,0010	0,00072	0,00067	0,00015	0,00090
Ge	0,0011	0,00151	0,0010	0,00051	0,00121
Se	0,00055	0,002	0,00067	0,00053	0,002
Br	0,24	0,286	0,23	0,12	0,284
Sr	0,012	0,543	0,0098	0,019	0,013
Y	0,0000010	0,00002	0,00012	0,000036	0,00001
Zr	0,0000020	0,00004	0,000012	0,0000032	0,00004
Mo	0,0070	0,0095	0,0070	0,0038	0,0094
Pd	< 0,000005	0,000030	0,0000001	0,0000017	0,000020
Ag	< 0,000005	0,00031	0,0000011	0,0000022	0,00093
Ba	0,0026	0,911895	0,0042	0,0036	0,007518
W	0,0039	0,00517	0,0040	0,0019	0,00477

Отличительной особенностью термальных вод Абаканского горячего ключа являются слабощелочные условия геохимической среды и смешанный ионный состав, тогда как обычно азотные термальные воды – щелочные и пре-

имущественно натриевые. По результатам анализа 2010 г. вода Абаканского ключа термальная, умеренно пресная с минерализацией 375 мг/л, мягкая с общей жесткостью 3 мг-экв/л. По химическому составу вода гидрокарбонатная с

10 %-экв сульфатов и 15 %-экв хлоридов, магниево-натриево-кальциевая с присутствием железа (0,9мг/л). Селен, висмут, фтор (0,69мг/л) и марганец содержатся в выше фоновых концентрациях.

Воды Абаканского горячего ключа формируются в результате гидролиза алюмосиликатов с пропорциональным переходом в воду натрия, кальция и кремния, поскольку $Na/Si=1,5$; $Ca/Si=1,64$ ($Na/Ca=0,88$) и $Mg/Si=0,5$; $Na/Mg=1,99$; $Ca/Mg=3,2$ и подвержены процессам континентального засоления, поскольку $SO_4/Cl=0,93$. Воды насыщены каолинитом, Са и Mg – монтмориллонитами, сидеритом и находятся в стадии равновесия с кальцитом и доломитом. Состав вод формируется в условиях восстановительной геохимической среды с Th/U отношением=1,23 и наличием органического углерода. В водах Абаканского горячего ключа выявлена кондиционная для отнесения к минеральным водам концентрация органического углерода, составляющая=9,69 мг/л (методом высокотемпературного каталитического окисления) и кремния=25мг/л, а также благоприятное биохимическое отношение $Ca/Si=200$. Слабощелочные условия геохимической среды из-за наличия органического вещества благоприятны для накопления сероводорода в водах Абаканского ключа. Результаты расчетов процессов вторичного минералообразования в системе «вода-порода» для изучаемых источников показаны в таблицах 3-5.

В микрокомпонентном составе вод обоих источников отмечаются более низкие, чем в азот-

ных термах, содержания таких типоморфных элементов, как фтор, кремний, вольфрам, германий и галлий [6]. Это может быть связано с более низкими, по сравнению со смежными территориями, величинами теплового потока в пределах Западного Саяна.

Содержание водорастворенного гелия в пробе воды из аржаана Уру от 14.07.2019 г. составило $2,32 \times 10^{-3}$ мл/л, что в 44,6 раза превышает атмосферный фон и свидетельствует о приуроченности источника к зоне глубинного разлома. Изотопный анализ водорода и кислорода источника Уру, по данным К.М. Рычковой: $\delta D = -121,1 \text{ ‰}$; $\delta^{18}O = -15,4 \text{ ‰}$ показал наличие кислородного сдвига от линии метеорных вод Крейга, описываемой уравнением $\delta D = 8\delta^{18}O + 10 \text{ ‰}$, который составил 1 ‰.

Это объясняется процессом кислородного обмена в системе «вода-порода», при котором происходит обогащение воды тяжелым изотопом кислорода.

В газовом составе воды изученных источников преобладает азот (таблица 6).

Основной характеристикой, отражающей энергетический режим геологических структур, является величина теплового потока. Известно, что в западной части Алтае-Саянской складчатой области отмечаются более низкие значения этого параметра, чем в восточной части, которая примыкает к Байкальской рифтовой зоне. Так, по данным [3], средняя величина теплового потока для Восточной Тувы составляет 73 мВт/м², а для западной – 47 мВт/м².

Таблица 3. Состояние насыщенности вод родников природного комплекса Уру вторичными минералами

Год опробования	Источник, выход	Значение параметра насыщенности вод							
		Каолинитом	Са-монтмориллонитом	Mg-монтмориллонитом	K-монтмориллонитом	Na-монтмориллонитом	Кальцитом	Стронцитом	Баритом
2013	Уру, основной	1,34	5,18	4,20	-0,04	1,55	2,88	0,38	1,20
2013	Уру, левый, питьевой	1,37	5,18	3,76	-0,06	1,49	2,76	-1,50	-0,89
2019	Уру, основной	1,10	3,78	1,46	-0,79	0,80	2,43	-1,47	-1,31
2019	Уру, левый, питьевой	0,72	0,97	0,33	-2,54	-1,04	1,16	-2,10	-1,37
2019	Уру, правый	1,13	3,66	1,97	-0,85	0,81	2,20	-1,46	-1,14

Таблица 4. Состояние насыщенности вод родника Абаканский горячий ключ вторичными минералами

Год опробования	Источник	Значение параметра насыщенности вод							
		Каолинитом	Са-монтмориллонитом	Mg-монтмориллонитом	K-монтмориллонитом	Na-монтмориллонитом	Кальцитом	Сидеритом	Доломитом
2010	Абаканский горячий ключ	1,25	1,21	0,87	-2,30	-1,45	-0,24	0,52	-0,37

Таблица 5. Диаграмма полей устойчивости вторичных минералов в водах источников Уру и Абаканский горячий ключ

Год опробования	Источник, выход	$\lg [\text{Ca}^{2+}] / [\text{H}^+]^2$	$\lg [\text{Mg}^{2+}] / [\text{H}^+]^2$	$\lg [\text{K}^+] / [\text{H}^+]$	$\lg [\text{Na}^+] / [\text{H}^+]$	$\lg [\text{mH}_4\text{SiO}_4]$
2013	Уру, основной	15,23	14,29	5,26	7,34	-3,55
2013	Уру, левый, питьевой	15,11	13,75	5,18	7,23	-3,54
2019	Уру, основной	14,78	12,51	4,98	7,07	-3,67
2019	Уру, левый, питьевой	13,51	12,92	4,01	6,01	-3,86
2019	Уру, правый	14,55	12,91	4,87	7,03	-3,66
2010	Абаканский горячий ключ	11,62	11,33	3,18	4,53	-3,60

Таблица 6. Газовый состав воды [8]

Содержание газов, объемных %	Источники	Абаканский	Уру
	Вид газа	свободный	растворенный
	N ₂	97,7	78,7
	O ₂	0	15,0
	CO ₂	2,3	6,3
	Ar + Kr + Xe	1,352	0,922
	H ₂	0	0
	He + Ne	0,32	< 0,002
	CH ₄ + т.у.	0	0
Газонасыщенность, мл/л		—	34

Принято считать [4], что региональные вариации теплового потока определяются временем, прошедшим после завершения последнего крупного геологического события, связанного с выделением огромного количества тепловой энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере описанных источников Западного Саяна показано, что химический состав воды гидротерм прямо связан с тепловым потоком соответствующих геологических структур, который в свою очередь зависит от возраста последней тектоно-магматической активизации. Видно, что каледонские горные сооружения Западного Саяна, как и Горного Алтая характеризуются меньшим тепловым потоком, чем более молодые структуры Восточного Саяна и Байкальской рифтовой зоны. Об этом свидетельствуют относительно низкая температура воды термальных источников Западного Саяна и пониженные, в сравнении с обычно отмечаемыми в гидротермах, содержания фтора и кремния. Учитывая высокую популярность данных источников как лечебных, необходимо предусмотреть все возможные меры для их охраны как уникальных гидрогеологических природных памятников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов Л.Н., Дислер В.Н. Азотные термы СССР. – М.: «Геоминвод» ЦНИИКиФ, 1968. – 120 с.
2. Дергунов А.Б., Шульгина В.С., Вайнтроп Н.Л. Геологическая карта СССР, масштаб 1:200000. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45-V. Объяснительная записка. – М.: Недра, 1965. – 80 с.
3. 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 термини-

Поэтому области каледонской складчатости (Западный Саян и Горный Алтай) являются более охлажденными, чем герциниды Восточного Саяна. Это отражается и в значениях изотопных отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$, которые прямо пропорциональны величине теплового потока. Снижение этого отношения в подземных водах в западном направлении фиксирует постепенное стирание аномальной мантийной «метки» по мере удаления от Байкальской рифтовой зоны – области активного кайнозойского магматизма [3]. Так, по данным К.М. Рычковой, значение изотопного отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ в источнике Уру близко к атмосферному. Низкая величина теплового потока отражается и в относительно невысокой температуре воды описываемых термальных источников Западного Саяна.

неральных источниках // Геология и геофизика, 2010. Т.51, №2. – С. 264-276.

4. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Геотермические исследования в Сибири. Тр. Института геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 279. – Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1974. – 280 с.
5. Зайцев И.К., Толстихин Н.И. Закономерности распространения и формирования минеральных (промышленных и лечебных) подземных вод на территории СССР. – М.: Недра, 1972. – 280 с.
6. Замана Л.В. Типоморфные элементы и глубинные температуры азотных терм Баргузинской и Бунтовской групп (БРЗ) // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы. Мат-лы IV симпозиума с участием иностр. ученых, посвященного 90-летию Н.А. Логачева, Иркутск, 14-15.10.2019 г. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019. – С. 68-70.
7. Зуев А.В. Некоторые вопросы гидрогеологии Западного Саяна. Тр. Второго совещ. по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. Вып. IV. Иркутское книжное изд-во, 1957. – С. 17-23.
8. Пиннекер Е.В. Термальные воды Саяно-Тувинского нагорья. Вопросы гидрогеологии и гидрогеохимии // Мат-лы Комиссии по изучению подземных вод Сибири и Дальнего Востока. Вып. IV. Иркутск, 1969. – С. 93-123.
9. Филиппова И.Б., Бродский С.А., Горощенко Г.А., Ильичев А.А. Геологическая карта СССР, масштаб 1:200000. Серия Западно-Саянская. Лист N-46-XXXII. Объяснительная записка. – М.: Недра, 1966. – 84 с.