

УДК 550.42 (571.54)

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГЕЙЗЕРИТ И ЭФЕМЕРНЫЕ МИНЕРАЛЫ МОГОЙСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА (СЕВЕРНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ, БАЙКАЛЬСКАЯ РИФТОВАЯ ЗОНА)

© 2023 г. Л. В. Замана<sup>1,\*</sup>, П. А. Солотчин<sup>2,\*\*</sup>, член-корреспондент РАН Е. В. Скляр<sup>3,\*\*\*</sup>

Поступило 28.02.2023 г.

После доработки 22.03.2023 г.

Принято к публикации 28.03.2023 г.

При гидрогеохимическом опробовании Могойского термального источника в Северном Забайкалье отобрано 5 проб современных минеральных осадков, в двух из которых в составе гейзерита главным компонентом является опал, а в трех других преобладают карбонаты, фториды и сульфаты натрия. Расчеты глубинных температур показали, что образование гейзерита связано с низкотемпературными гидротермами и объясняется снижением их температур при разгрузке. Отложение легкорастворимых солевых минералов происходит на испарительном барьере, в дождливый период они могут полностью растворяться и исчезать.

*Ключевые слова:* азотные термы, Могойский источник, глубинные температуры, гейзерит, когаркоит, трона, солевые отложения, испарительное концентрирование

DOI: 10.31857/S2686739723600431, EDN: RYFYFU

Характеристика современного минералообразования азотных терм Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) содержится в ряде монографий [1–3] и отдельных статьях. Могойский (по другим авторам Ципинский) термальный источник входит в число наиболее изученных в этом отношении. Тем не менее исследованиями последнего десятилетия на нем обнаружены ранее не упоминавшиеся минералы, в частности, когаркоит, вилломит и др. [4]. В данном сообщении изложены результаты новых исследований, расширяющие сведения о минеральном составе современных отложений источника, и предложены механизмы формирования развитых на нем основных минералов и минеральных ассоциаций.

Могойский источник является наиболее высокотемпературным (до 83.7°C на выходах) проявлением азотных термальных вод в БРЗ. Он нахо-

дится в долине р. Могой, притока р. Ципа, в левобережном бассейне р. Витим и состоит из многочисленных точечных и линейных выходов (до 40), образующих термальное поле протяженностью до 200 м при ширине до 100–120 м. Географические координаты примерного центра этого поля 55°28.439' с.ш., 113°26.341' в.д. Разгрузка терм локализована в юго-восточных отрогах Южно-Муйского хребта в границах развития позднепалеозойских гранитоидов баргузинского комплекса, перекрытых на участке разгрузки терм четвертичными аллювиальными отложениями.

Химический состав водных проб (табл. 1) определялся в ИПРЭК СО РАН (г. Чита) по нормативным методикам, определение минерального состава осадков выполнено в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) рентгеноструктурным методом на дифрактометре ARL X'TRA (излучение  $\text{Cu K}\alpha$ ).

По химическому составу термы источника фторидно-гидрокарбонатные натриевые. Наряду с достоверно установленным максимальным для терм БРЗ содержанием фтора для источника характерны высокие концентрации кремния. Эти гидрогеохимические особенности определяют состав минеральных ассоциаций, современное образование которых особенно широко проявлено в юго-западной части термального поля. Здесь на участке протяженностью до 50 м отлагаются как плотносцементированные светло-серые, так и туфообразные белые минеральные образова-

<sup>1</sup> *Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук, Чита, Россия*

<sup>2</sup> *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

<sup>3</sup> *Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*

\*E-mail: l.v.zamana@mail.ru

\*\*E-mail: paul@igm.nsk.ru

\*\*\*E-mail: skl@crust.irk.ru

**Таблица 1.** Физико-химические характеристики терм Могойского источника по данным опробования 15 ноября 2012 г. и 18–19 марта 2021 г.

Пробы	Показатели ( $\text{HCO}_3^-$ – Si в мг/л)													$T_{\text{гл.}}$ , °C	
	$T$ , °C	pH	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{F}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	TDS	Si	1*	2*
12-2-1	78.7	8.93	12.0	169.6	19.2	17.8	26.0	1.54	0.03	106.1	2.16	354	45.4	135.7	131.7
12-2-2	73.2	8.95	12.3	162.9	24.7	18.6	26.6	2.06	0.06	110.2	2.18	360	42.8	132.4	128.7
12-2-3	80.7	8.92	11.7	170.2	22.0	18.0	25.9	1.25	0.03	107.2	2.12	358	46.3	136.7	132.3
12-2-4	58.8	9.03	13.2	140.3	30.3	20.0	26.5	1.36	0.02	109.3	2.30	343	44.8	135.4	130.8
12-2-5	62.1	9.00	12.6	155.6	30.0	17.8	26.0	1.36	0.06	101.1	2.15	347	45.6	135.9	131.6
12-2-6	48.1	9.00	10.8	122.0	29.6	15.9	26.3	1.79	0.09	107.8	2.23	310	44.4	134.4	130.4
21-Мг-1	78.9	9.10	25.1	166.8	79.8	13.0	27.6	6.49	0.04	150.2	2.42	471	57.5	149.2	142.6
21-Мг-2	70.6	9.10	26.6	156.5	63.1	13.2	27.4	6.33	0.02	140.0	1.79	435	56.5	148.2	141.9
21-Мг-3	83.4	9.10	24.5	165.2	58.7	12.9	27.8	6.69	0.02	135.8	1.92	436	54.7	146.3	140.3

TDS – минерализация по сумме ионов;  $T_{\text{гл.}}$  – глубинные температуры по кондуктивной (графа 1\*) и адиабатической (2\*) моделям.

ния. Определение фазового состава этих отложений, проведенное методом рентгеновской порошковой дифрактометрии на материале пяти образцов, показало, что плотносцементированные образования в основном сложены опалом и являются гейзеритами (рис. 1), развитие которых на Могойском источнике отмечалось постоянно ([1, 2] и др.), а туфообразные осадки преимущественно представлены солевыми отложениями карбонатов, фторидов и сульфатов.

По [1], в БРЗ гейзериты установлены только на тех термальных источниках (их указано три, включая Могойский), в воде которых содержится  $\text{SiO}_2$  в пределах 93–170 мг/л (43.4–79.3 мг/л по Si), а по [2] гейзериты образуются при температуре на выходах выше 75°C. Иные температуры образования, не менее 400°C, указаны для позднечетвертичных гейзеритов о. Ольхон и Приольхонья [5, 6]. Докладом таких температур авторы считают наличие в составе гейзеритов тремолита, температура образования которого составляет не менее 400°C [7], и графита высокой степени кристалличности, характерного для пород амфиболитовой фации метаморфизма. Расчетные температуры современных гидротерм БРЗ на глубинах их формирования, по оценке [2], не превышают 136°C.

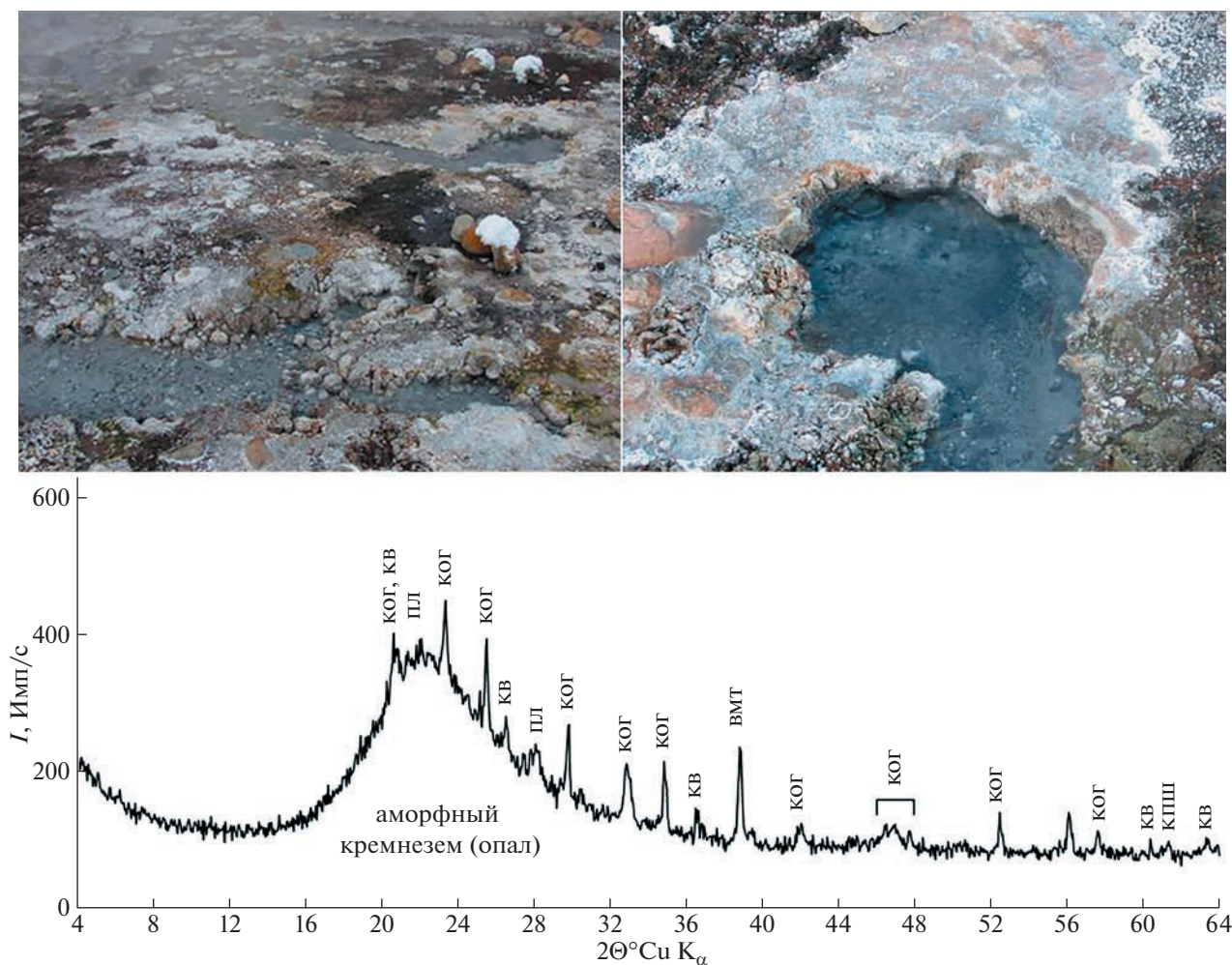
Приведенные в табл. 1 глубинные температуры Могойского источника рассчитаны нами по кварцевому геотермометру по двум моделям [8]:

1) с кондуктивным теплообменом по формуле  $t = (1309/(5.19 - \lg \text{SiO}_2)) - 273.15$ ,

2) с адиабатическим расширением (без теплообмена с вмещающими породами) по формуле  $t = (1522/(5.75 - \lg \text{SiO}_2)) - 273.15$ .

По первой модели глубинные температуры по двум срокам опробования равны 132.4–136.7 и 146.3–149.2°C (табл. 1), по второй соответственно на 3.7–4.6 и 6.0–6.6°C ниже. Следовательно, гейзериты как Могойского источника, так и других проявлений современных гидротерм БРЗ отлагаются из низкотемпературных гидрогеохимических систем, являются низкотемпературными. Причина их отложения – понижение температуры на выходах. По аморфному кремнезему азотные термы не равновесны [9], но при снижении температуры до 20–25°C равновесие наступает. Так, растворимость аморфного кремнезема при 25°C равна 120 мг/л [10] или 56 мг/л по Si. Этим же механизмом можно объяснить и образование флюорита  $\text{CaF}_2$  в составе гейзерита, установленного в другом образце, поскольку насыщение по нему в термах источника при температуре >70°C не достигается, но возникает при более низких температурах при тех же концентрациях входящих в его состав компонентов [11].

В составе солевых отложений в одном из образцов основную долю составляли когаркоит  $\text{Na}_3\text{FSO}_4$ , трона  $\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и термонатрит  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , примеси представлены кварцем  $\text{SiO}_2$ , виллиомитом NaF, калиевым полевым шпатом и плагиоклазом (рис. 2). В двух других образцах преобладали тенардит  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и трона, когаркоит установлен в подчиненном количестве, в числе примесей определены галит NaCl, кварц, флюорит, барит  $\text{BaSO}_4$ , а в следовых количествах – слюда и хлорит. В [12] отложения на гальке гранитов описаны как травертины – известковые туфы. Они в составе отложений по данным нашего опробования не выявлены, но впервые (с учетом [4]) на термальных источниках Забайкалья установлены карбонаты натрия и барит.



**Рис. 1.** Отложения гейзерита и рентенограмма образца Мг-21-2м. Сокращения: ког – когаркоит, кв – кварц, пл – плагиоклаз, вmt – виллиомит, кпш – калиевый полевоый шпат.

Обнаруженный на Могойском источнике когаркоит был второй находкой его в России [4]. В отличие от впервые найденного в нефелиновых сиенитах Ловозерского массива (Кольский полуостров), где его генезис объяснялся выделением на последних стадиях кристаллизации расплава, обогащенного натрием и летучими компонентами [13], в нашем случае когаркоит гипергенный, образуется он в результате эвапоритизации низкотемпературных гидротерм. Минеральная ассоциация, близкая по составу к выявленной в отложениях Могойского источника, описана А. Пабстом и У. Шарпом в 1973 г. для горячих источников Гортензия Хот Спринг (Колорадо, США) [14], которые дали название этому минералу в честь Л.Н. Когарко, обнаружившей его и описавшей как “бесхлористый шайрерит” [13]. Там когаркоит встречается совместно с опалом, галитом, тронной, флюоритом, кальцитом, беркеитом и филлипситом.

Все основные выявленные соли обладают высокой растворимостью, многократно превышающей содержание их ионов в термах источника, насыщение по ним в термах не достигается. Так, растворимость (в г/л) NaF равна 36.6 при 10°C,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  – 485 при 40°C,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 281 при 20°C [15]. Общая минерализация терм источника не превышает 0.5 г/л, поэтому отложение установленных натриевых солей происходит в результате концентрирования по ним на испарительном барьере на дневной поверхности, подобно формированию их на соленых озерах (Натрон и др.) в рифтовых системах Африки [16]. Ввиду высокой растворимости минералы солевых отложений Могойского источника являются эфемерными, в период дождей в основной массе они должны растворяться, а их химические компоненты выноситься в речную сеть и частично поступать в зону аэрации.





3. *Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д., Данилова Э.В. и др.* Геохимическая деятельность микроорганизмов гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Академич. изд-во "Гео", 2011. 302 с.
4. *Солотчин П.А., Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Замана Л.В., Склярова О.А.* Новая находка когаркоита  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{F}$  в Забайкалье // ДАН. 2015. Т. 462. № 6. С. 701–705.  
<https://doi.org/10.7868/S086956521518022X>
5. *Скляров Е.В., Сквитина Т.М., Склярова О.А., Котов А.Б., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д.* Позднечетвертичные высокотемпературные гейзериты Приольхонья (Байкальская рифтовая зона): петрографические и минералогические особенности, состав и условия формирования // Петрология. 2014. Т. 22. № 6. С. 580–591.  
<https://doi.org/10.7868/S0869590314060041>
6. *Великославинский С.Д., Котов А.Б., Скляров Е.В., Сквитина Т.М., Толмачева Е.В., Склярова О.А., Прокопов Н.С.* Геохимические особенности и флюидный режим формирования позднечетвертичных гейзеритов Приольхонья и о. Ольхон (Байкальская рифтовая зона) // ДАН. 2017. Т. 474. № 4. С. 465–470.  
<https://doi.org/10.7868/S0869565217040156>
7. Amphiboles: Crystal Chemistry, Occurrence and Health Issues. *Hawthorne F.C., Oberti R., Ventura G.D., Mottana A.* (eds.). // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2007. V. 67. 545 p.
8. *Fournier R.O.* Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems // *Geothermics*. 1977. V. 5. P. 41–50.
9. *Замана Л.В.* Кальциевые минеральные равновесия азотных терм Байкальской рифтовой зоны // *Геохимия*. 2000. № 11. С. 1159–1164.
10. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода в 5 томах. Т. 2. Система вода – порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.
11. *Замана Л.В., Аскаров Ш.А.* Фтор в азотных термах Баунтовской группы (Северное Забайкалье) // *Вестник Бурятского государственного университета*. 2010. № 3. С. 8–12.
12. *Албагачиева В.А.* Условия формирования источников типа акратотерм в Северном Забайкалье. М.: Недра, 1965. 80 с.
13. *Когарко Л.Н.* Бесхлористый шайрерит из нефелиновых сиенитов Ловозерского массива (Кольский полуостров) // ДАН СССР. 1961. Т. 139. № 2. С. 435–437.
14. *Pabst A., Sharp W.N.* Kogarkoite, a new natural phase in the system  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaF-NaCl}$  // *Amer. Mineralogist*. 1973. V. 58. P. 116–127.
15. *Лурье Ю.Ю.* Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989. 448 с.
16. *Philip J., Mosha D.* Salt Lakes of the African Rift System: a Valuable Research Opportunity for Insight into Nature's Concentrated Multi-electrolyte Science // *Tanz. J. Sci.* 2012. V. 38. № 3. P. 1–13.

## LOW-TEMPERATURE GEYSERITE AND EPHEMERAL MINERALS OF THE MOGOYSKY THERMAL SPRING (NORTHERN TRANSBAIKALIA, BAIKAL RIFT ZONE)

**L. V. Zamana<sup>a,#</sup>, P. A. Solotchin<sup>b,##</sup>, and Corresponding member of the RAS E. V. Sklyarov<sup>c,###</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: l.v.zamana@mail.ru*

<sup>##</sup> *E-mail: paul@igm.nsk.ru*

<sup>###</sup> *E-mail: skl@crusr.irk.ru*

During hydrogeochemical testing of the Mogoisky thermal spring in Northern Transbaikalia, 5 samples of modern mineral sediments were taken, in two of which opal is the main component of geyserrite, and in the other three carbonates, fluorides and sodium sulfates predominated. Calculations of deep temperatures showed that the formation of geyserrite is associated with low-temperature hydrotherms and is explained by a decrease in their temperatures during discharge. Deposits of easily soluble salt minerals occur on the evaporation barrier, during rainy periods they can completely dissolve and disappear.

**Keywords:** nitrogen therms, Mogoisky spring, deep temperatures, geyserrite, kogarkoite, trona, salt deposits, evaporative concentration