УДК 548.4:563.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ РАННЕКЕМБРИЙСКОЙ ХЕМОТРОФНОЙ МИКРОБИОТЫ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУДООБРАЗУЮЩИХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

В. А. Симонов¹, А. А. Терлеев², А. В. Котляров^{1,*}, Д. А. Токарев²,
член-корреспондент РАН А. В. Каныгин²

Поступило 29.01.2019 г.

Комплексные исследования колчеданного раннекембрийского Кызыл-Таштыгского месторождения (Восточная Тува) позволили реконструировать палеогидротермальные системы, выяснить физико-химические условия гидротермальных процессов, а также установить особенности существования древней пригидротермальной биоты в зонах действия растворов, участвовавших на всех стадиях формирования рудоносных структур, начиная с воздействия постмагматических флюидов и заканчивая низкотемпературными гидротермами. Представительные данные по биоте были получены при изучении объектов, находившихся в зоне влияния относительно низкотемпературных гидротермальных систем. В одних случаях находки микроорганизмов приурочены к вмещающим рудные тела базальто-вым комплексам, а в других случаях найденная фауна связана с железисто-кремнистыми отложениями. Выяснено, что микроорганизмы в миндалинах базальтов развивались при температурах около 110–140 °С под воздействием гидротермальных растворов. Гораздо более низкие температуры (до 100 °С) существовали при развитии микрофоссилий в кварц-гематитовых гидротермальных постройках Кызыл-Таштыгского месторождения.

Ключевые слова: кембрийская пригидротермальная биота, колчеданные месторождения, флюидные включения, микрофоссилии, гидротермальные растворы

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863331-335>

В результате детальных исследований Кызыл-Таштыгского колчеданного месторождения в Восточной Тuve [1] были обнаружены микрофоссилии [2–5], близкие по своим свойствам к биогенным образованиям из древних [6, 7] и современных пригидротермальных океанических комплексов. В породах, вмещающих это месторождение, найдены также археоциты и водоросли, которые достаточно надёжно определяют их раннекембрийский возраст.

Сравнительный анализ с гидротермальными системами “чёрных курильщиков” в срединно-океанических хребтах [8–10], а также с хорошо изученными колчеданными комплексами палеозойского возраста

на Урале [11–13] позволил выяснить, что сульфидные руды Кызыл-Таштыгского месторождения формировались на дне древнего (раннекембрийского) задугового бассейна и имеют сходные черты с современными субмаринными гидротермальными полями [14, 15].

В работе приводится реконструкция палеогидротермальной системы Кызыл-Таштыгского месторождения (рис. 1), в зоне влияния которой существовала раннекембрийская микробиота. Детально рассматриваются также физико-химические условия гидротермальных растворов, участвовавших на всех стадиях формирования рудоносных структур, начиная с воздействия магматогенных флюидов и заканчивая низкотемпературными гидротермами.

Для определения физико-химических параметров постмагматических флюидов на месторождении Кызыл-Таштыг были исследованы флюидные включения, располагающиеся рядом с расплавленными включениями в кварцевых вкрапленниках андезитов,

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской
Академии наук, Новосибирск

*E-mail: kotlyarov@igm.nsc.ru

Рис. 1. Схема-реконструкция палеогидротермальных систем месторождения Кызыл-Таштыг: 1 — сульфидные руды, каналы и направления движения гидротермальных растворов; 2 — выходы гидротерм в водную толщу палеобассейна; 3 — кварц-гематитовые постройки на дне палеобассейна; 4 — потоки изменённых базальтовых лав с миндалинами (а) и без миндалин (б); 5 — массивные базальты основания с первичными магматогенными минералами (а) и гидротермально преобразованные (б); 6 — андезиты и их постмагматические флюиды; 7 — температуры гидротермальных систем.

тесно ассоциирующихся с сульфидными рудами. Эксперименты свидетельствуют о преобладании флюидных включений с температурами гомогенизации 145–179 °C и до 230 °C. Криометрический анализ показал, что в растворе включений преобладает NaCl (с примесью $MgCl_2$), а концентрации солей составляют 4,7–7,2 и 8,1–14,4 мас.%, иногда до 17,8 экв. мас.% NaCl.

С целью выяснения физико-химических условий формирования главной залежи собственно месторождения Кызыл-Таштыг были изучены флюидные включения в барите барит-полиметаллических руд. Установлено преобладание в гидротермальных рудообразующих растворах NaCl с примесью KCl, при общей солёности 3–8,5 экв. мас.% NaCl. Температуры гомогенизации составляют 150–270 °C, что согласуется с данными предыдущих исследователей (180–300 °C) [1], показавших также возможность более высоких параметров на глубоких горизонтах месторождения — 300–400 °C [1]. В целом температуры и солёность флюидов, образовавших Кызыл-

Таштыгское месторождение близки характеристикам современных рудообразующих системам Атлантического океана [10] и гидротермам силурийских колчеданных месторождений Южного Урала [13].

Исследования флюидных включений в минералах из миндалин (рис. 2) показали, что базальты, тесно ассоциирующиеся с сульфидными рудами месторождения Кызыл-Таштыг, находились под воздействием гидротермальных растворов (с температурами 110–140 °C и возможно до 180 °C), по составу (NaCl с примесью KCl) и солёности (2,5–5,5 мас.%) близких таковой к морской воды (3,7 мас.% NaCl). Эти параметры фактически совпадают с характеристиками низкотемпературной части гидротерм, формировавших сульфидные руды Кызыл-Таштыгского месторождения.

В кварце кварц-гематитовых построек были найдены очень мелкие (около 1 мкм) флюидные включения. Микроскопические размеры включений позволили выяснить только то, что при формировании

20 мкм

Рис. 2. Первичные флюидные включения в карбонате из миндалин.

этих структур действовали низкотемпературные (до 100 °С) гидротермальные растворы.

В целом, учитывая опыт поисков фауны на колчеданных месторождениях Урала силурийского и девонского возрастов [11, 12], были детально изучены все рудоносные структуры месторождения Кызыл-Таштыг, формировавшиеся при участии постмагматических флюидов, высокотемпературных гидротермальных растворов и низкотемпературных гидротерм. Представительные данные по биоте были получены только при изучении объектов, находившихся в зоне влияния относительно низкотемпературных гидротермальных систем месторождения. В одних случаях находки микроорганизмов приурочены к вмещающим рудные тела базальтовым комплексам, а в других случаях найденная фауна связана с железисто-кремнистыми отложениями [5].

В первом случае биота была найдена в миндалинах базальтов, входящих в виде обломков в состав гидротермальной брекчии, сформировавшейся в ак-

тивной зоне дробления и проникновения гидротермальных растворов месторождения Кызыл-Таштыг. Округлые миндалины (до 1 мм) обычно заполнены микрозернистой серой массой, кристаллитами полевого шпата, эпидота, клиноцоизита. Часто в миндалинах присутствует карбонат. Микрофоссилии коричневатого-зелёного цвета располагаются равномерно по объёму миндалины, контактируя одним концом с её границей. Они обладают нитчатыми формами с диаметром микротрубочек от 5 до 25 мкм при длине до 500 мкм. Нити встречаются прямые, изогнутые и ветвящиеся. Видно полое строение трубок и тонкие, более тёмные стенки. В редких случаях наблюдаются пережимы и “сегментированное” строение нитей (рис. 3). Анализ на электронном сканирующем микроскопе показал, что материал, из которого выполнены микроорганизмы по составу наиболее близок к эпидоту. Учитывая микроскопические размеры и простую морфологию трубок микрофоссилий, а также сходство с современными труб-

Рис. 3. Микрофоссилии в миндалинах из базальтов Кызыл-Таштыгского месторождения.

чатыми микроорганизмами, их можно отнести к роду *Girvanella Nicholson et Etheridge (Cyanobacteria)* [3, 5]. Близкие по форме трубчатые организмы, связанные с океаническими комплексами, отмечаются в других публикациях [6, 7].

Исследования железисто-кремнистых пород показало присутствие в кварц-гематитовых гидротермальных постройках Кызыл-Таштыгского месторождения разнообразной нижнекембрийской биоты. Конические кубки микрофоссилий (размером до 500 мкм в продольном сечении) в поперечном сечении имеют округлую, овальную формы, диаметром до 400 мкм. Морфология и размеры изученных фоссилий позволяют отнести их к моноциатам (рис. 4). Цианобактерии представлены тремя родами: *Renalcis* sp. — облаковидные стяжения с чёткой чёрной оболочкой и звёздчатой внутренней структурой, образующие колонии размером до 500 мкм; *Botomaella* sp. — кустистые ветвящиеся формы, высотой до 300 мкм; *Obruchevella* sp. — нитчатые спиралевидные образования длиной до 500 мкм [5].

В целом, учитывая данные по флюидным включениям, приведённые выше микроорганизмы в минералах базальтов развивались при температурах около 110–140 °С под воздействием гидротермальных растворов месторождения Кызыл-Таштыг. Эти параметры вполне реальны для найденных организмов, так как цианобактерии могут существовать при температурах свыше 100 °С.

Гораздо более низкие температуры (до 100 °С) характерны для растворов, в которых происходило развитие микрофоссилий в кварц-гематитовых гидротермальных постройках Кызыл-Таштыгского месторождения.

При сравнении полученных результатов с данными по современным и фанерозойским “чёрным

курильщикам” (в том числе и по флюидным включениям: [10, 13]) видно, что относительно молодая биота развивается в ассоциации с гораздо более высокотемпературными (до 310–350 °С) гидротермальными системами, чем кембрийская пригидротермальная фауна.

В общем, исследования позволили установить разнообразные типы древней биоты, существовавшей в зонах действия подводных раннекембрийских гидротермальных рудообразующих систем Кызыл-Таштыгского месторождения. Было выяснено, что развитие организмов происходило на разных уровнях: в магматогенных базальтовых породах и в кварц-гематитовых постройках на поверхности дна морского бассейна. Во всех случаях источником энергии и химических элементов, необходимых для возникновения и существования биоты, были гидротермальные растворы, формировавшие на дне древнего бассейна сульфидные руды, то есть основой этого биоценоза был хемосинтез.

Устанавливаются характерные особенности рассмотренной хемотрофной биоты, существовавшей в различных ситуациях. В частности, ограниченное пространство минералов в базальтах и повышенные температуры позволили выжить только весьма специфической группе микроорганизмов, наиболее приспособившихся к этим экстремальным условиям. Железисто-кремнистые породы из кварц-гематитовых построек, формировавшиеся в местах непосредственных выходов низкотемпературных гидротермальных источников на поверхность дна палеобассейна, представляли собой (так же как и в случае современных “чёрных курильщиков”) наиболее благоприятную обстановку для развития биоты.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН

Рис. 4. Биота в железисто-кремнистых породах Кызыл-Таштыгского месторождения.

(проект № 0330—2016—0014), при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 14.Y26.31.0029) и РФФИ (проект № 16—05—00196).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузубный В.С., Макаров В.А., Камеев В.А. Кызыл-Таштыгский колчеданно-полиметаллический рудный узел Восточной Тувы. Красноярск: Краснояр. отд-ние ВМО. 2001. 292 с.
2. Каныгин А.В., Токарев Д.А., Терлеев А.А., Симонов В.А. // Металлогения древних и современных океанов. Гидротермальные и гипергенные рудоносные системы. Миасс: Имин УрО РАН, 2007. С. 101—107.
3. Каныгин А.В., Терлеев А.А., Симонов В.А., Токарев Д.А., Ступаков С.И. // Вестн. ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 5. (197). С. 7—12.
4. Каныгин А.В. В кн.: Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. Иркутск: Изд-во ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2014. С. 98—102.
5. Терлеев А.А., Симонов В.А., Каныгин А.В., Токарев Д.А., Ступаков С.И., Котляров А.В. // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 1. С. 66—74.
6. Furnes H., Banerjee N.R., Staudigel H., Muehlenbachs K., McLoughlin N., Maarten de Wit, Van Kranendonk M. // Precamb. Res. 2007. V. 158. P. 156—176.
7. McLoughlin N., Brasier M.D., Wacey D., Green O.R., Perry R.S. // Astrobiology. 2007. V. 7. № 1. P. 11—26.
8. Francheteau J., Needham H.D., Choukroune P., Juteau T., Séguret M., Ballard R. D., Fox P. J., Normark W., Carranza A., Cordoba D., Guerrero J., Rangin C., Bougault H., Cambon P., Hekinian R. // Nature. 1979. V. 277. P. 523—528.
9. Гидротермальные системы и осадочные формации срединно-океанических хребтов Атлантики. М.: Наука, 1993. 256 с.
10. Бортников Н.С., Симонов В.А., Амплиева Е.Е., Ставрова О.О., Фуке И. // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1790—1801.
11. Зайков В.В., Шадлун Т.Н., Масленников В.В., Бортников Н.С. // Геология руд. месторождений. 1995. Т. 37. № 6. С. 511—529.
12. Масленников В.В. Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УРО РАН, 2006. 384 с.
13. Симонов В.А., Ковязин С.В., Тереня Е.О., Масленников В.В., Зайков В.В., Масленникова С.П. // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 5. С. 423—438.
14. Симонов В.А., Зайков В.В., Ковязин С.В. В кн.: Металлогения древних и современных океанов. Рудоносность гидротермальных систем. Миасс: Имин УрО РАН, 1999. С. 16—23.
15. Зайков В.В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданоносных зон Урала и Сибири. М.: Наука, 2006. 429 с.

PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS OF EXISTENCE OF EARLY CAMBRIAN CHEMOTROPHIC MICROBIOTA IN ZONE OF INFLUENCE OF ORE-FORMING HYDROTHERMAL SOLUTIONS

V. A. Simonov¹, A. A. Terleev², A. V. Kotlyarov¹, D. A. Tokarev²,
Corresponding Member of the RAS A. V. Kanygin²

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

²A.A. Trofimuk Institute of Oil & Gas Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

Received January 25, 2019

Complex researches of the pyrite Early Cambrian Kyzyl-Tashtyg deposit (East Tuva) have allowed to reconstruct paleohydrothermal systems, to find out physical and chemical conditions of hydrothermal processes, and also to establish features of existence of ancient hydrothermal biota in the operating zone of the solutions, participating at all stages of formation of ore-bearing structures, since influence of postmagmatic fluids and finishing low temperature hydrotherms. The representative data on biota has been received at studying of the objects, which were in a zone of influence of rather low temperature hydrothermal systems. In one cases findings of microorganisms are dated for basalt complexes, containing ore body, and in other cases the found fauna is connected with ferruginous-siliceous sediments. It has been found out that microorganisms in the tonsil cavities of basalts evolved at the temperatures nearby 110—140°C under the influence of hydrothermal solutions. Much lower temperatures (to 100 °C) existed at development of micro-fossils in the quartz-hematite hydrothermal constructions of Kyzyl-Tashtyg deposit.

Keywords: Cambrian hydrothermal biota, pyrite deposits, fluid inclusions, micro-fossils, hydrothermal solutions.