ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 2, с. 154–157

ГЕОХИМИЯ

УДК 553.493.6+553.25+550.7

СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ УЧАСТИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ В ФОРМИРОВАНИИ БОГАТЫХ Nb–REE-РУД ТОМТОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (РОССИЯ)

© 2021 г.
Академик РАН Н. Л. Добрецов[1,2], С. М. Жмодик[1,3,*], Е. В. Лазарева[1], А. В. Брянская[4], В. А. Пономарчук[1], Б. Ю. Сарыг-оол[1], И. С. Кириченко[1], А. В. Толстов[1], Н. С. Карманов[1]

Поступило 20.11.2020 г.
После доработки 21.11.2020 г.
Принято к публикации 25.11.2020 г.

Получены данные, свидетельствующие о важной роли микроорганизмов в перераспределении REE в коре выветривания и решающей роли в концентрировании REE при формировании руд верхнего рудного горизонта Томторского месторождения. Поглощение REE осуществлялось сообществом микроорганизмов: фототрофов, метаногенов, метанотрофов и протеобактерий – составляющих основу микробиоценоза данной палеоэкосистемы. Изотопный состав C карбонатов во всех изученных образцах с фоссилизированными микроорганизмами соответствует биогенному, а изотопный состав $\delta^{18}O_{SMOW}$ (от 7 до 20‰) свидетельствует об эндогенной (гидротермальной) и, в меньшей мере, экзогенной природе растворов. Низкие значения $(^{87}Sr/^{86}Sr)_I$ карбонатов (~0.704–0.7045) исключают участие морской воды.

Ключевые слова: Томторское Nb–REE-месторождение, карбонатиты, кора выветривания, микроорганизмы

DOI: 10.31857/S2686739721020055

С Томторским массивом щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов, Республика Саха (Якутия), связаны ультрабогатые руды и уникальное месторождение редкоземельных (REE) и редких (Nb, Sc) элементов ([1–4] и др.). По коренным породам массива развита кора выветривания (КВ). Наиболее мощная КВ фиксируется по редкометалльным карбонатитам с 4 горизонтами [1, 2]. Наиболее богатые Nb–REE-руды образуют пластовые залежи во впадинах (участки Буранный, Северный и Южный) [1], а также зоны в КВ [2]. Источники рудного вещества, механизмы переноса и концентрирования редких и REE-элементов, физико-химические условия формирования ультрабогатых руд активно обсуждаются с момента их обнаружения, поскольку эти данные имеют большое научно-практическое значение. Высказывались различные предположения о природе богатых руд (перечень см. в [4]). Ранее, в верхнем рудном горизонте (ВРГ) Томторского месторождения (ТМ) были обнаружены скопления “литифицированных редкоземельным фосфатом остатков нитчатых и коккоидных микроорганизмов”, подобных современным цианобактериям, развивающихся в прибрежно-морской обстановке в зонах литорали-сублиторали [5]. Выявление ископаемых микроорганизмов в древних породах связано с большими проблемами. Главным способом их изучения является сравнительный структурно-морфологический анализ ископаемых и современных микроорганизмов, а также данные $\delta^{13}C_{PDB}$ и $\delta^{18}O_{SMOW}$. В целом наличие в горных породах биоморфных структур и “биогенных” значений $\delta^{13}C$ позволяет надежно диагностировать ископаемые биоминералы и микрофоссилии.

В результате комплексных исследований Nb–REE-руд ТМ, залегающих ниже (нижний рудный горизонт, НРГ) и выше (ВРГ) сидеритового горизонта, нами выявлено большое количество микрочастиц (от 0.5 до 5–7 микрон), имеющих биоморфную структуру (рис. 1а–1м), концентрирующих

[1] *Институт геологии и минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*
[2] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*
[3] *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[4] *Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*
**E-mail: zhmodik@igm.nsc.ru*

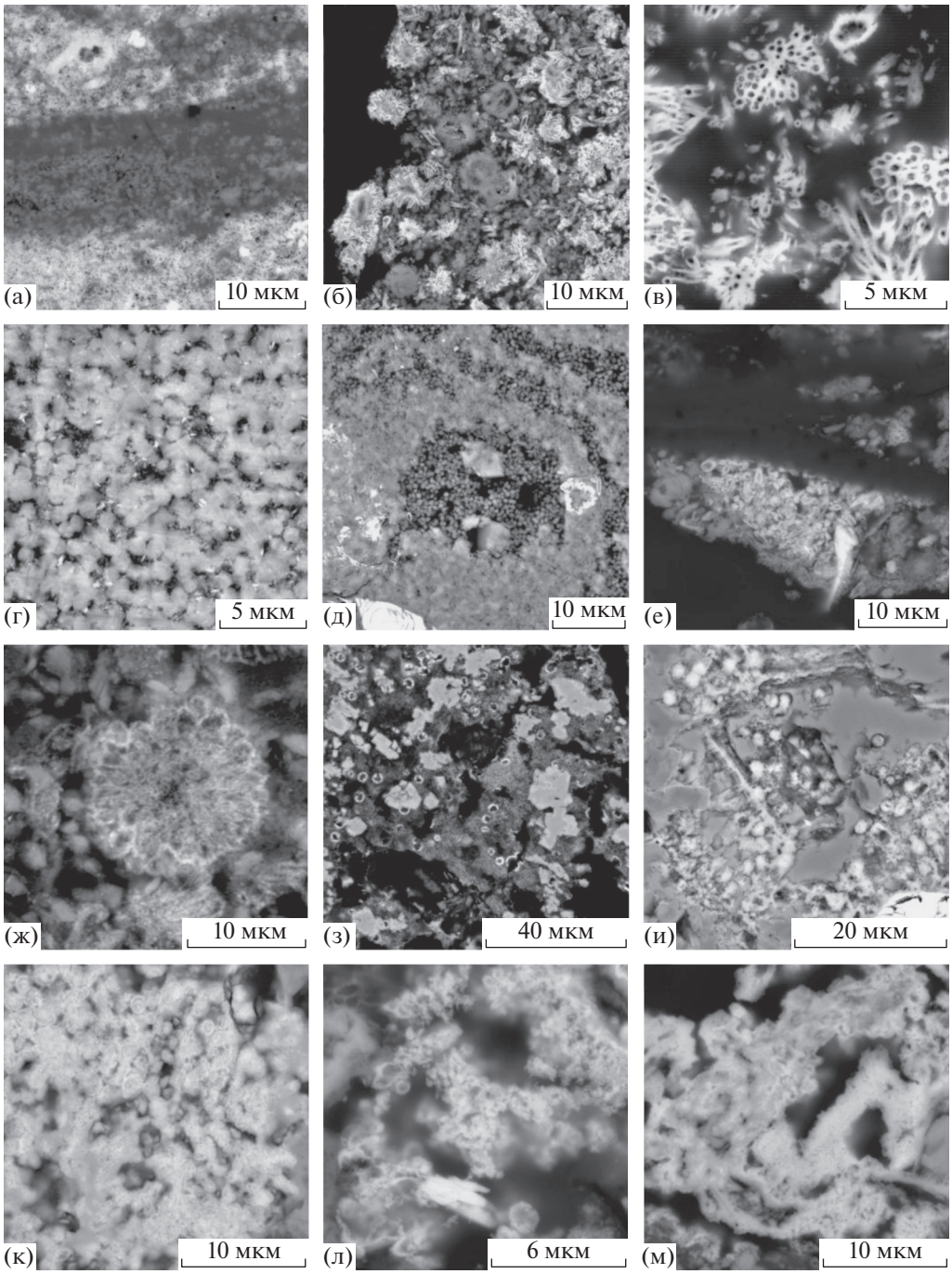

Рис. 1. Биоморфные структуры (данные СЭМ) в богатых Nb–REE-рудах участка Буранный (ВРГ) (а–ж) и рудоносной КВ (НРГ) (з–м) ТМ. а – слоистый литифицированный микробный мат, состоящий из палочковидных трубчатых микрофоссилий (ПТМ) (в нижней части рис. 1), сложенных галлуазит-монацитовым агрегатом (ГМА) и коккоидными микрофоссилиями (КМ) в фоссилизированном гликокаликсе (средняя часть), состоящими из алюмофосфатов; б – фрагмент микробного мата, состоящего из ПТМ (ГМА), округлых одиночных и палочковидных клеток, формирующих агрегаты (алюмофосфаты); в – колонии ПТМ; г – фоссилизированные коккоидные бактерии (алюмофосфаты); д – концентрически-зональный агрегат, состоящий из шаровидных биоморфных частиц пиритового (центр) и алюмофосфатного (серое) состава. ПТМ (справа) концентрируют REE (монацит); е – ПТМ в полостях растительных остатков; Ж – колония (агрегат) ПТФ; з – фоссилии округлых бактерий среди гидроксидов Fe и Mn, концентрирующих REE поверхностью; и – КМ, концентрирующие фосфат REE; к – круглые и овальные фоссилизированные (монацит) клетки; л–м – фоссилизированные биопленки – бактериальные вытянутые агрегаты с дискообразными зональными бактериоморфными структурами, состоящие из монацита.

REE, P, Fe, которые в полной мере сопоставляются с современными и древними микроорганизмами [6–8].

НРГ связан с КВ ([2] и др.) по редкометалльным карбонатитам с франколитовым и гетитовым горизонтами и формировался в окислительной обстановке. В рудах фиксируются типичные изменения, характерные для элювиального процесса (зональное изменение пород и минералов), но также распространены инфильтрационные явления, образующие колломорфно-слоистые структуры, сложенные гидроксидами Fe и Mn (до 40 мас. % MnO) и обогащенные Nb, REE, Th (до *n* мас. %). Об участии низкотемпературных гидротермальных процессов (НГП) свидетельствует присутствие в породах КВ флюорита, сульфидов Pb, Cu, Fe и Zn, а также изотопный состав O и Sr. В специфической КВ по карбонатитам (скв. 5625), с горизонтами богатых руд (до 10–15 мас. % Nb_2O_5+REE_2O_3), формирование которой, по многим признакам, происходило в результате сочетания экзогенных и НГП, выявлены агрегаты вытянутой формы, состоящие из округлых клеток и коккоидные микрофоссилии с фоссилизированным гликокаликсом (рис. 1з–1м). Состав образований биоморфной структуры разнообразен – в большинстве случаев встречаются псевдоморфозы фосфата REE (монацита) по клеткам округлой формы (рис. 1л, 1м), а также коккоиды, замещенные гидроксидами Fe и обогащенные по периферии REE. $\delta^{13}C_{PDB}$ карбонатов в таких образцах из НРГ соответствует биогенному – от –16 до –75‰.

Формирование ультрабогатых Nb–REE-руд ВРГ происходило в условиях мелководного термального водоема в результате гидротермально-осадочного процесса [4]. Об этом также свидетельствуют одинаковые составы $\delta^{13}C_{PDB}$ (от –30 до –32‰) и $\delta^{18}O_{SMOW}$ (от 7 до 9‰) кальцита в сидеритовом горизонте ТМ и в гидротермально-осадочных (с биотой) отложениях термального котла оз. Фумарольное (Камчатка). Богатые руды ВРГ имеют ряд особенностей: 1. Руды сложены аутигенными, без следов механических воздействий, ультрадисперсными частицами и агрегатами (около 90% частиц <10 мкм) фосфатов REE и редких элементов (монацит, минералы группы крандаллита). В меньшей мере распространены минералы карбонатитов (пирохлор, оксиды Ti и др.) без следов окатывания или деструкции; 2. Руды имеют слоистую текстуру и микрослоистую структуру, обусловленную тонким переслаиванием минералов группы крандаллита, фосфатов редких земель, оксидов Ti–Fe–Nb (с V до 5 мас. %), каолинита, смектита и гидроксидов Fe, Mn; 3. В рудах распространены сульфиды: пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, что свидетельствует о восстановительной обстановке; 4. В рудах сохранились бактериоморфные нано- и микроструктуры, остатки микробных сообществ и растительности, которые находятся в тесной взаимосвязи с минералами REE (рис. 1а–1ж). В гётит-сидеритовых рудах обнаружены микрослои, сложенные фрамбоидальным пиритом, который формируется при участии микроорганизмов. В ВРГ широко распространены трубчатые, палочковидные и коккоидные биоморфные структуры (рис. 1б, 1в), которые хорошо сопоставляются с микроорганизмами различной морфологии. Особенно часто встречаются трубчатые палочковидные и коккоидные формы, сложенные микротрубками галлуазита, покрытые плотным слоем наночастиц (20–50 нм) монацита колломорфной структуры [4], а также коккоидные формы, состоящие из алюмофосфатов (крандаллит, гойяцит, флоренсит). Изотопы C и O карбонатов из руд ВРГ варьируют в широких пределах и сопоставляются с гидротермальным трендом и трендом взаимодействия щелочных пород с метеорными флюидами [9].

Морфология биоморфных структур в ВРГ и НРГ существенно различается. В первом случае в концентрировании REE участвуют трубчатые, палочковидные и шаровидные фосфатного и алюмофосфатного состава фоссилизированные микроорганизмы, а в НРГ – агрегаты вытянутой формы и коккоидные формы.

Ранее выявлена решающая роль бактерий при концентрировании P, Fe, Mn в процессах седиментогенеза [6–8]. Экспериментально показана возможность извлечения REE бактериями из растворов [10, 11]. Причем установлено, что REE адсорбируются на поверхности бактериальных клеток совместно с P и в течение короткого времени (~30 дней) преобразуются в наноразмерный монацит [12, 13]. Также определено, что различные микроорганизмы могут преимущественно накапливать легкие или тяжелые REE ([14] и др.).

Полученные данные свидетельствуют о важнейшей роли микроорганизмов в перераспределении REE в КВ (НРГ) и решающей роли в концентрировании REE при формировании руд ВРГ. Поглощение REE осуществлялось сообществом микроорганизмов: фототрофов, метаногенов, метанотрофов и протеобактерий – составляющих основу микробиоценоза данной палеоэкосистемы. $\delta^{13}C_{PDB}$ карбонатов во всех изученных образцах соответствует биогенному [15], а изотопный состав $\delta^{18}O_{SMOW}$ (от 7 до 20‰) свидетельствует об эндогенной (гидротермальной) и, в меньшей мере, экзогенной природе растворов. Этот фактор, а также и низкие значения $(^{87}Sr/^{86}Sr)_I$ карбонатов, составляющие ~0.704–0.7045, исключают участие морской воды.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 18-17-00120 и, частично, МНиВО РФ № 0324-2019-0040-С-01 (диагностика микроорганизмов). Аналитические работы проведены в “ЦКП МиИИ СО РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Толстов А.В., Тян О.А.* Геология и рудоносность массива Томтор. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1999. 164 с.
2. *Лапин А.В., Толстов А.В.* Минерагения кор выветривания карбонатитов. М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2011. 308 с.
3. *Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G.* // Econ. Geol. 1995. V. 90. № 3. P. 676–689. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.3.676
4. *Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., et al.* // Russian Geology and Geophysics. 2015. V. 56. № 6. P. 844–873. https://doi.org/10.15372/GiG20150603
5. *Жмур С.И., Кравченко С.М., Розанов А.Ю., Жегалло Е.А.* // ДАН. 1994. Т. 336. № 3. С. 372–375.
6. *Абызов С.С., Велш М., Вестал Ф. и др.* Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2002. 188 с.
7. *Астафьева М.М., Герасименко Л.М., Гептнер А.Р. и др.* Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. Москва: ПИН РАН, 2011. 172 с.
8. *Авдонин В.В., Жегалло Е.А., Сергеева Н.Е.* Бактериальная природа оксидных железомарганцевых руд Мирового океана. М.: ГЕОС, 2019. 284 с.
9. *Moore M., Chakhmouradian A.R., Mariano A.N., Sidhu R.* // Ore Geol. Rev. 2015. V. 64. P. 499–521. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.015
10. *Mullen M.D., Wolf D.C., Ferris F.G., et al.* // Appl. Environ. Microbiol. 1989. V. 55. № 12. P. 3143–3149. DOI: 0099-2240/89/123143-07$02.00/0
11. *Jiang M., Ohnuki T., Kozai N., et al.* // Chem. Geol. 2010. V. 277. № 1. P. 61–69. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.07.010
12. *Ohnuki T., Jiang M., Sakamoto F., et al.* // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 163. P. 1–13. https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.04.043
13. *Cheng Y., Zhang L., Bian X., et al.* // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9691-0
14. *Tsuruta T.* // Colloids Surfaces B: Biointerfaces. 2006. V. 52. P. 117–122. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2006.04.014
15. *Ponomarchuk V.A., Dobretsov N.L., Lazareva E.V., et al.* // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 490. Part 2. P. 76–80. https://doi.org/10.7868/S2686739720020115

STRUCTURE-MORPHOLOGY FEATURES OF THE PARTICIPATION OF MICROORGANISMS IN THE FORMATION OF Nb-REE RICH ORES OF THE TOMTOR DEPOSIT (RUSSIA)

Academician of the RAS N. L. Dobretsov[a,b], S. M. Zhmodik[a,c,#], E. V. Lazareva[a], A. V. Bryanskaya[d], V. A. Ponomarchuk[a], B. Yu. Saryg-ool[a], I. S. Kirichenko[a], A. V. Tolstov[a], and N. S. Karmanov[a]

[a] *Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[b] *Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[c] *Novosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russian Federation*

[d] *Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

[#] *e-mail: zhmodik@igm.nsc.ru*

Data have been obtained indicating the important role of microorganisms in the redistribution of REE in the weathering crust and a decisive role in the concentration of REE during the formation of ores of the upper ore horizon of the Tomtor deposit. The uptake of REE was carried out by the community of microorganisms: phototrophs, methanogens, methanotrophs, and proteobacteria, which form the basis of the microbiocenosis of this paleoecosystem. The isotopic composition of carbonates C, in all studied samples with fossilized microorganisms, corresponds to the biogenic one, and the isotopic composition δ^{18}OSMOW (from 7 to 20‰) indicates the endogenous (hydrothermal) and, to a lesser extent, exogenous nature of the solutions. Low values of $(87Sr/86Sr)_I$ carbonates (~0.704–0.7045) exclude the participation of sea water.

Keywords: Tomtor Nb-REE field, carbonatite weathering crust, microorganisms