

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВАХ

Е.В. Лазарева

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т акад. Коптюга, 3,
Россия*

Обсуждаются особенности, по которым можно идентифицировать или предположить микробиологическую деятельность в геологических отложениях. Эти особенности установлены на основании изучения минералов, образовавшихся в современных микробных сообществах. К таким признакам относятся остатки скелета, отпечатки клеток и нитей микроорганизмов в минералах, псевдоморфозы облекания (чехлы) по нитям и клеткам микроорганизмов, отложение минералов в результате изменения степени окисления элементов и создания специфических Eh-pH условий, не свойственных окружающей обстановке, отложение минералов в результате концентрирования элементов микроорганизмами.

минералы, цианобактериальные маты, термальные источники

PECULARITIES OF MINEROGENESIS IN THE MICROBIAL COMMUNITIES

E.V. Lazareva

This paper discusses peculiarities, which can help to identify or assume a microbial activity in geological deposits. The features are determined on the ground of minerals study. These minerals were formed in modern microbial communities. Such characteristics include skeletal remains; prints of microorganism cells and filaments inside minerals, pseudomorphs of enveloping (covers) on cells and filaments; mineral deposition due to changes in the oxidation degree of elements and formation of specific Eh-pH conditions that are not common for an environment; mineral deposition as a result of elements concentration by microorganisms.

minerals, cyanobacterial mats, thermal springs

Помимо основных конституционных элементов (H, C, N, O, P, S) микроорганизмы используют щелочные и щелочноземельные металлы (Na, K, Mg, Ca), элементы с переменной валентностью, получая энергию в процессе окисления/восстановления [18, 16, 13, 17]. Известно селективное использование B, F, Si, Cd, Sr, Ba некоторыми организмами [11]. Микроорганизмы играют важную роль в геохимическом круговороте элементов и приводят в движение биогеохимические циклы, которые намного превосходят по скорости неорганические реакции. Различаются механизмы пассивного (биосорбция) и активного (биоаккумуляция) взаимодействия с неорганическими молекулами и ионами [12]. Для подавляющего большинства элементов известны случаи осаждения, мобилизации, восстановления или метилирования микроорганизмами. Многие элементы переотлагаются в микробном мате в минеральной форме. Морфологические особенности минералов далеко не всегда служат бесспорным доказательством участия микроорганизмов в их образовании, но, безусловно, являются первой ступенью к дальнейшим исследованиям. Большой интерес

представляет концентрирование элементов микроорганизмами с возможностью образования рудных концентраций.

Объектами данного исследования были термофильные сообщества горячих источников Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [8], Долины Гейзеров (ДГ) и кальдеры Узон (КУ) (Курило-Камчатский вулканический пояс) [1]. Микроморфология и состав минеральных фаз изучались с применением сканирующих электронных микроскопов LEO VP 1430 с системой энергодисперсионного рентгеновского микроанализа Oxford Instruments INCA Energy SEM 350 и TESCAN INCA (операторы А. Т. Титов, М. В. Хлестов). На основании исследований были выделены морфологические признаки, по которым можно идентифицировать присутствие и деятельность микроорганизмов в геологических объектах.

ОСТАТКИ СКЕЛЕТА

Остатки створок диатомовых водорослей весьма хорошо сохраняются в травертиновых, гейзеритовых постройках и донных отложениях озер (рис. 1). Диатомовые водоросли обнаружены в микробных сообществах всех исследованных объектов, даже в донном осадке источника «Аркашин шурф» (КУ), характеризующихся высокими содержаниями мышьяка в растворе (7,7 мг/л) и донном осадке (1,9 %).

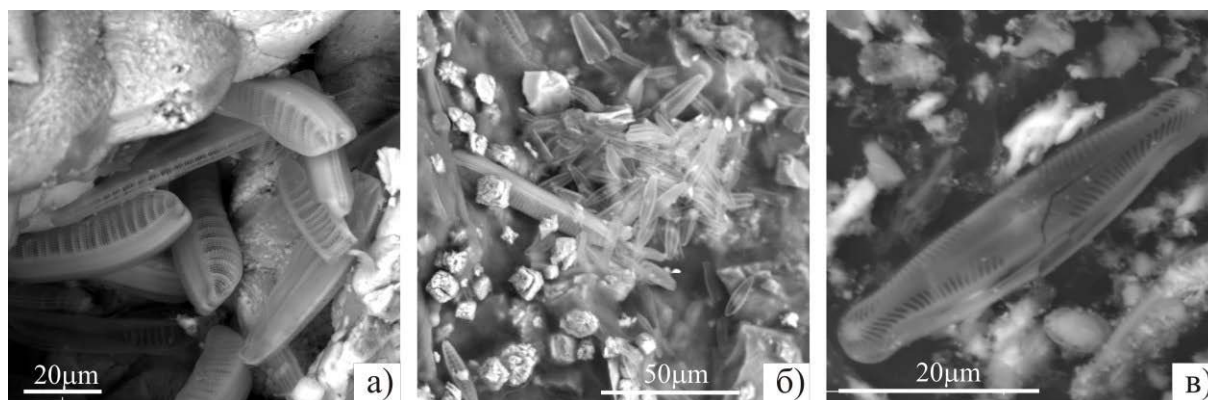


Рис. 1. Створки диатомовых водорослей.

а – травертин источника Жойгон (БРЗ); б – микробное сообщество, развивающееся в зоне смешения термальных вод источника Алла и вод р. Алла (БРЗ); в – донный осадок источника «Аркашин шурф» (КУ).

ОТПЕЧАТКИ

Отпечатки нитей и отдельных клеток наблюдались в кальците внутри микробных сообществ и в минеральных постройках горячих источников (рис. 2). Отложение кальцита из щелочных гидротермальных растворов источников Баргузинской долины (БРЗ) происходит при условии достаточного содержания Са в растворе. В термофильных цианобактериальных сообществах кальцит отлагается, как правило, в виде кристаллов. Сравнительно крупная карбонатная постройка формируется на источнике Гарга (БРЗ) и традиционно называется «травертином» [9], хотя уже давно обсуждается вопрос об определяющей роли в образовании этого тела цианобактериального сообщества [10]. Кристаллы кальцита образуются цианобактериальном мате (см. рис. 2 а, б) [3, 14]. Внутри мата отдельные индивиды плотно опутаны нитями цианобактерий (см. рис. 2 в, г), которые частично

блокируют рост, что приводит к формированию в кристаллах незакономерных «прорезей» и сквозных каналов (см. рис. 2 б). Карбонатная постройка представляет собой купол, в вертикальном разрезе которого наблюдается чередование слоев с различным составом, структурными и текстурными особенностями [2, 6]. В двух разновидностях были установлены кристаллы кальцита, по размерам и отпечаткам нитей соответствующие тем, что формируются в микробном сообществе (см. рис. 2 д). Также установлены отпечатки в зернах кальцита, отличающихся по морфологии от тех, что образуются в микробном мате (см. рис. 2 е). Данные наблюдения позволили провести дополнительные исследования и по распределению радионуклидов показать, что основная часть постройки сформирована в результате деятельности микробного сообщества [6].

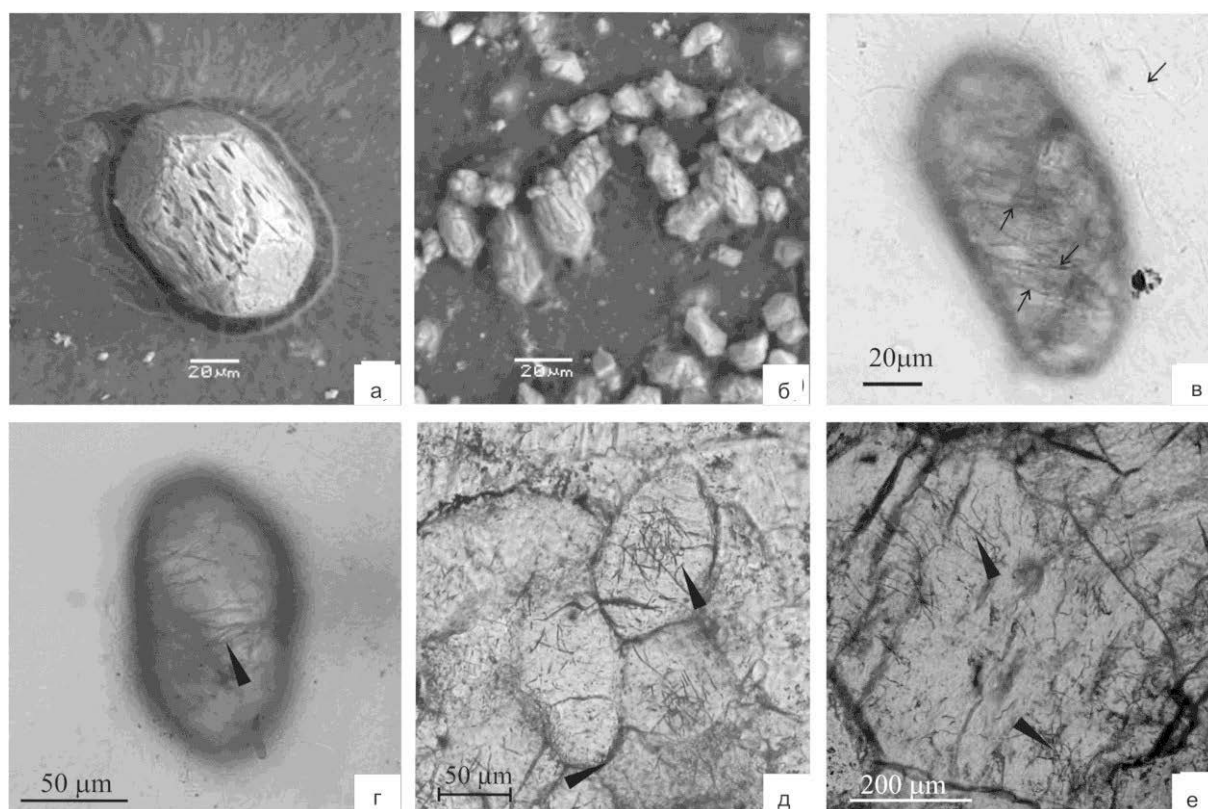


Рис. 2. Кристаллы кальцита, формирующиеся в цианобактериальном сообществе источника Гарга (БРЗ).

а – с незакономерными прорезями от нитей цианобактерий б – следы нитей цианобактерий, запечатанных в кристаллах внутри кристаллов кальцита (в, г), и кальците, слагающем Гаргинскую карбонатную постройку (д, е).

ПСЕВДОМОРФОЗЫ ОБЛЕКАНИЯ (ЧЕХЛЫ) ПО НИТЯМ И КЛЕТКАМ МИКРООРГАНИЗМОВ

Они наиболее распространены в сообществах, различаются по генезису: могут быть сложены соединениями: 1) отлагающимися непосредственно из термального раствора гидрохимическим путем, 2) состоящими из элементов сконцентрированных микроорганизмами из раствора (рис. 3).

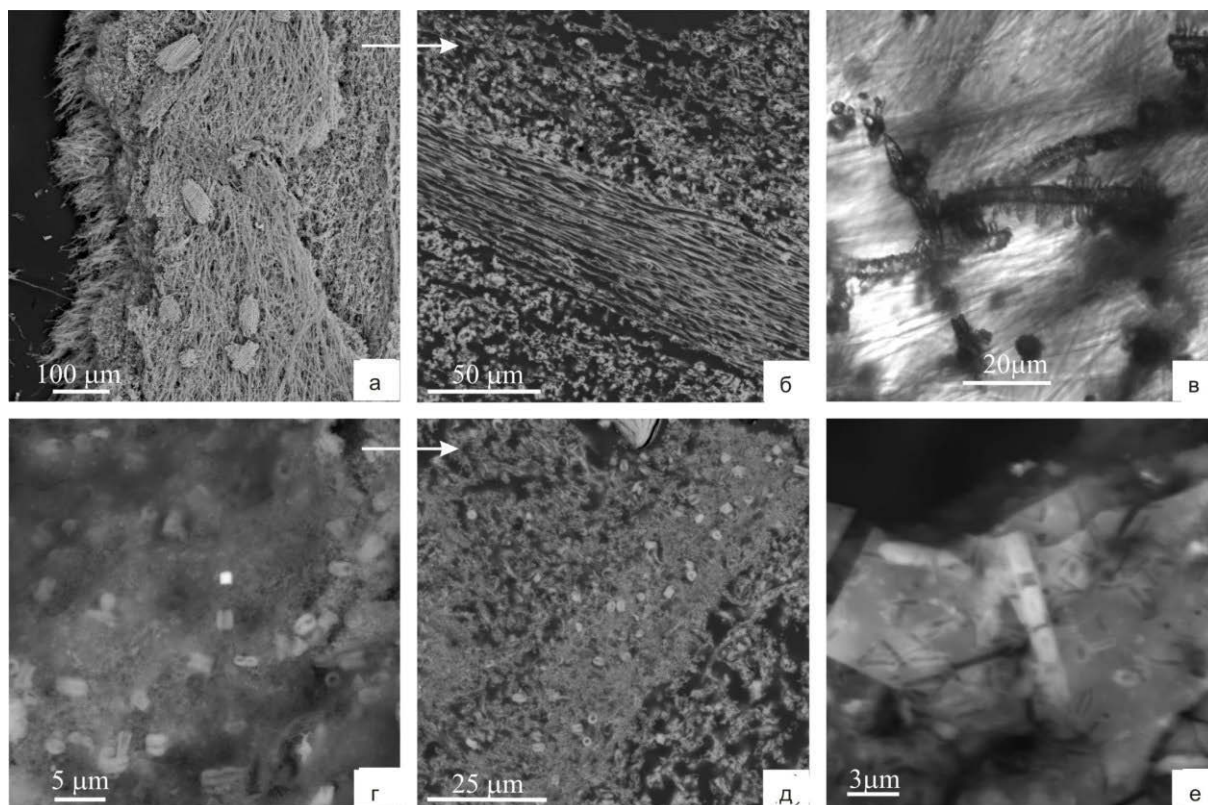


Рис. 3. Псевдоморфозы облекания (чехлы и фоссилии).

а – опаловая минеральная вата в цианобактериальном сообществе источника Термофильный (кальдера Узон); б – то же в палеоотложениях; в – чехлы S° по нитям цианобактерий среди обрастаний бактерий рода *Thiothrix* (источник Алла, БРЗ); г – чехлы опала по клеткам микроорганизмов в сообществе источника Термофильный (КУ); д – то же в палеоотложениях; е – чехлы фосфата Fe и Ca по клеткам и нитям микроорганизмов в сообществе водопада Эскалатор (ДГ).

Псевдоморфозы первого типа распространены фактически повсеместно, чаще других встречаются опаловые (см. рис. 3 а, г). Максимальное количество псевдоморфоз приурочено к участкам, где активно в результате испарения термального раствора отлагается опал и консервирует структуру сообщества, поскольку поверхность микроорганизмов хорошо удерживает коагулирующий из раствора гель кремнекислоты (см. рис. 3 г). Псевдоморфозы, сложенные опалом, хорошо сохраняются в геологических отложениях. Кремнистые чехлы в живом сообществе источника Термофильный (кальдера Узон) полностью идентичны тем, что сохранились в его палеоотложениях. Сравнительно реже встречаются чехлы, сложенные кальцитом. Ко второму типу относятся псевдоморфозы фосфата Ca и Fe, обнаруженные в цианобактериальном сообществе, развивающемся в водопаде Эскалатор Долины Гейзеров. Содержание P и Fe в растворе низкое (26 и 37 мкг/л); очевидно, что элементы концентрируются микробным сообществом и отлагаются как псевдоморфозы по клеткам и в виде пленок (см. рис. 3 е).

На выходе горячих источников, содержащих H₂S в растворе, развиваются сероокисляющие бактерии. Среди обрастаний нитчатых бактерий рода *Thiothrix* встречаются чехлы, сложенные серой, которые соответствуют размеру нитей цианобактерий рода *Phormidium* [3]. Сам чехол служит зародышем для дальнейшего роста индивидов серы.

Большинство цианобактерий окисляют сульфидную серу с образованием S° , которая выпадает снаружи клетки или остается прикрепленной в виде дисперсных частиц на слизистом чехле [15].

ИЗМЕНЕНИЕ СТЕПЕНИ ОКИСЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И ЕН-РН УСЛОВИЙ

Наиболее распространенный пример – деятельность сероокисляющих и сульфатредуцирующих бактерий. Отложение S° характерно для сообществ бактерий родов *Thiothrix* и *Thermothrix*, образующих космы белого цвета на выходе термальных ручьев. Образование субмикронных шаров S° начинается еще внутри живых нитей *Thiothrix* (рис. 4 а) в результате процесса хемосинтеза [19]. После гибели бактерий шары слипаются, образуя агрегаты. Эти агрегаты становятся зародышами для дальнейшего роста острибипирамидальных кристаллов (см. рис. 4 б).

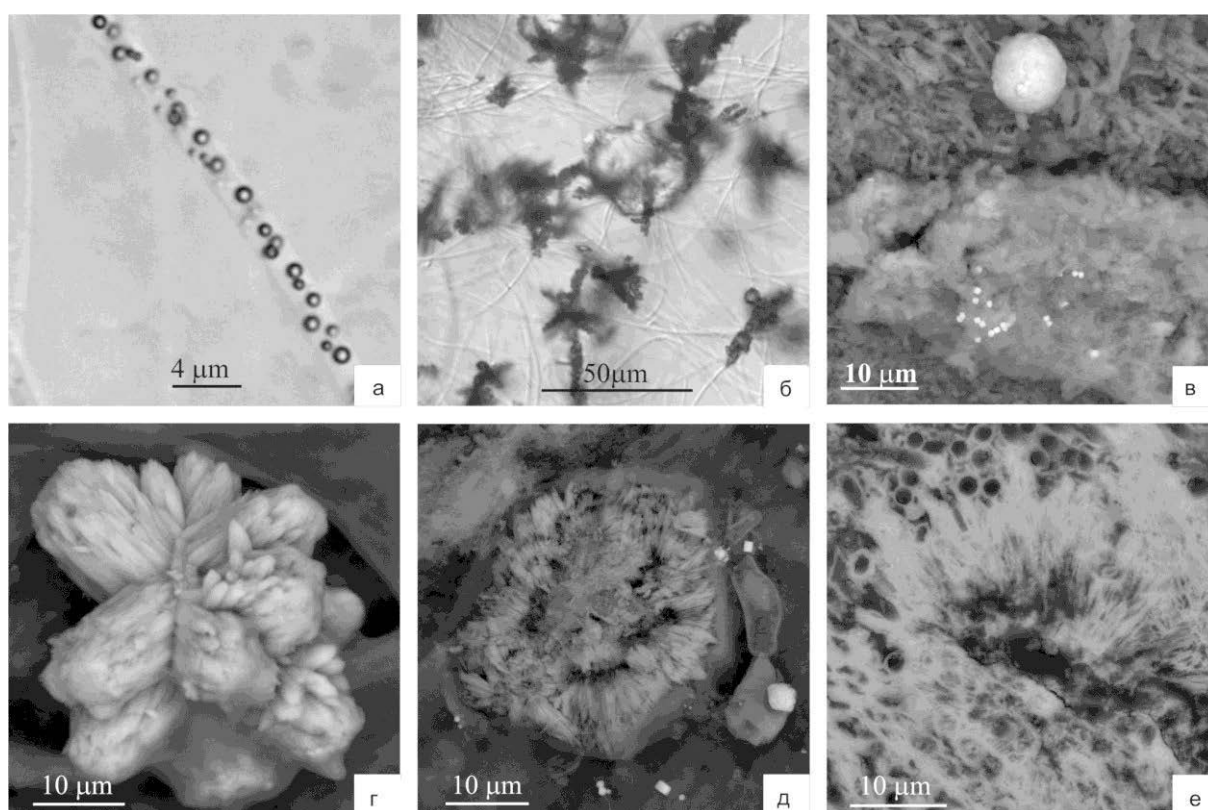


Рис. 4. Минералы, отлагающиеся в сообществах за счет изменения Eh-pH параметров и восстановления S.

а – шаровидные частицы S° в нитях *Thiothrix*, б – кристаллы S° в пространстве между ними (источник Алла, БРЗ); в – пирит, образующийся в микробном сообществе за счет деятельности сульфатредуцирующих бактерий (источник Уро, БРЗ); г, д – кальцит, образующийся в цианобактериальном сообществе источника Термофильный (КУ); е – псевдоморфоза опала по кальциту (д) в палеотложениях источника Термофильный.

Хорошо огранные кристаллы серы и сульфиды отмечены в богатых органическим веществом осадках термальных и холодных озер [5]. Такие сульфиды можно наблюдать и в циано-бактериальных сообществах (см. рис. 4 в), но количество их в источниках, не содержащих H_2S , мало.

Развивающееся по изливу термального ручья цианобактериальное сообщество значительно влияет на изменение Eh-pH растворов [1, 4]. По изливу ручья источника Термофильный (КУ) pH раствора меняется от 6,2 до 8,7, Eh – от –40 до 230. В микробном сообществе установлено отложение кальцита. Согласно термодинамическим расчетам [4], образование CaCO_3 не может происходить, так как воды источника слишком кислые. Только благодаря взаимодействию с микробным сообществом, раствор подщелачивается и окисляется достаточно для формирования минерала (см. рис. 4 г, д). Но за пределами сообщества минерал неустойчив, в палеотложениях источника не обнаружен, наблюдаются только псевдоморфозы опала, идентичные выведениям кальцита (см. рис. 4 е).

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

При исследовании цианобактериальных термофильных сообществ автором установлено не так много примеров концентрирования элементов и отложения их в виде минералов. Ранее уже говорилось об отложении фосфата Fe и Ca (см. рис. 3, е; рис. 5 с). Также обнаружено образование барита в цианобактериальном сообществе, развивающемся на выходе парогазовых струй в ДГ (см. рис. 5 в). Одним из наиболее важных случаев можно считать концентрирование Hg (до 1000 г/т на сухое вещество) бентосным микробным сообществом источника Заварзина (КУ) и отложение ее в виде сульфида (см. рис. 3 б). Подобное концентрирование Hg происходит в торфе, контактирующем с кислыми дренажными растворами и хвостами Урского хвостохранилища [7]. Важно, что в торфе совместно с Hg концентрируются Au (до 80 г/т) и Ag (до 500 г/т). Se-содержащие сульфиды и селениды Hg с примесью I и Ag обильно покрывают органические остатки и местами образуют чехлы по клеткам микроорганизмов [7].

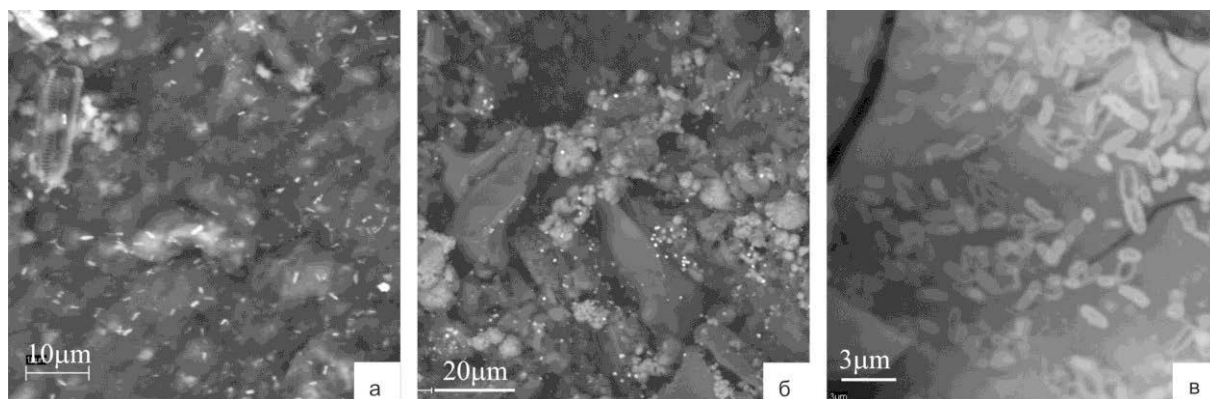


Рис. 5. Концентрирование элементов микробным сообществом и отложение минералов.
а – субмикронные удлиненные выделения барита (светлое) в цианобактериальном сообществе, развивающемся на выходе парогазовых струй (ДГ); б – субмикронные светлые выделения сульфида Hg и шарообразные агрегаты сульфида Fe в бентосном сообществе источника Заварзина (КУ); в – отложение фосфата Fe и Ca в цианоактериальном сообществе водопада Эскалатор (ДГ).

Перечисленные минерало-морфологические особенности деятельности микроорганизмов наблюдаются в исследуемых системах как совместно, так и отдельно друг от друга.

Автор благодарит сотрудников Кроноцкого заповедника за содействие в организации работ в кальдере Узон и Долине Гейзеров. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-05-00668; ИП СО РАН №94.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кальдерные микроорганизмы / Отв ред. Г.А. Заварзин. М.: «Наука», 1989. 120 с.
2. Лазарева Е.В., Брянская А.В., Жмодик С.М. и др. Исследование распределения элементов между циано-бактериальным сообществом и карбонатной постройкой термального источника методом РФА-СИ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012. № 5. С. 77–85.
3. Лазарева Е.В., Брянская А.В., Жмодик С.М., и др. Минералообразование в циано-бактериальных матах щелочных гидротерм Баргузинской впадины Байкальской рифтовой зоны // ДАН, 2010. Т. 430. № 5. С. 675–680.
4. Лазарева Е.В., Анисимова Н.С., Брянская А.В. и др. Особенности минералообразования в микробных сообществах, развивающихся по изливу источника Термофильный (кальдера Узон, Камчатка) // Труды Кроноцкого государственного биосферного заповедника Выпуск 2. / Отв. ред. В. И. Мосолов. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 2012. С. 143–156.
5. Лазарева Е.В., Брянская А.В., Таран О.П., и др. Исследование распределения элементов между компонентами системы солёного озера методом РФА-СИ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012. № 12. С. 70–80.
6. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Мельгунов М.С. и др. Перераспределение радионуклидов между микробным матом и травертином Гаргинского горячего источника (Байкальская рифтовая зона)// ДАН, 2011. Т. 43. № 5. С. 669–676.
7. Мягкая И.Н., Лазарева Е.В., Густайтис М.А. и др. Золото в системе сульфидные отходы и торфяник как модель поведения в геологических процессах // ДАН, 2013. Т. 453. № 2. С. 201–206.
8. Намсараев З.Б., Горленко В.М., Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д. Микробные сообщества щелочных гидротерм. Новосибирск: СО РАН, 2006. 110с.
9. Плюснин А.М., Суздальницкий А.П., Адушинов А.А., Миронов А.Г. Особенности формирования травертинов из углекислых и азотных термальных вод в зоне Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2000. Т.41, № 4. С. 564–570.
10. Татаринов А.В., Ялович Л.И., Намсараев З.Б. и др. Роль бактериальных матов в петрогенезисе и образовании рудных минералов травертинов азотных гидротерм Байкальской рифтовой зоны // ДАН, 2005. Т. 403. № 5. С. 678–681.
11. Chen X., Schauder S., Potier N. et al. Structural identification of a bacterial quorum-sensing signal containing boron// Nature, 2002. V. 415. N 6871. P. 545–549.
12. Chojnacka K. Biosorption and bioaccumulation – the prospects for practical applications// Environ. Intern., 2010. V. 36. P. 299–307.
13. Ehrlich H.L. Geomicrobiology. 4th edition / Marcel Dekker, New York, 2002. 768 p.

14. Lazareva E.V., Bryanskaya A.V., Zhmodik S.M., et al.. Elements redistribution between organic and mineral parts of microbial mats: SRXFA research (Baikal Rift Zone) // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A. 2009. V. 603. P. 137–140.
15. Stal L.J. Microbial mats and Stromatolites. The Ecology of Cyanobacteria. Their Diversity in Time and Space / BA Whitton and M Potts (Eds), 2000. P. 61–120.
16. Stolz J.F., Oremland, R.S., Bacterial respiration of arsenic and selenium // FEMS Microbiol. Rev., 1999. V. 23. N 5. P. 615–27.
17. Tebo B.M., Johnson H.A., McCarthy J.K., Templeton A.S. Geomicrobiology of manganese (II) oxidation // Trends Microbiol., 2005. V. 13. P. 421–428.
18. Tebo B.M., Obraztsova A.Y., Sulfate-reducing bacterium grows with Cr(VI), U(VI), Mn (VI), and Fe(III) as electron acceptor // FEMS Microbiol. Lett. 1998. V. 162. P. 193–198.
19. Vasconcelos C., Warthmann R., McKenzie J.A. et al. Lithifying microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern Precambrian relics?// Sedimentary Geology, 2006. V. 185. P. 175–183.