



ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВАХ

Е. В. Лазарева

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.

Ключевые слова: минералы, циано-бактериальные 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.

Keywords: 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 [12, 14, 18, 19]. Известно селективное использование B, F, Si, Cd, Sr, Ba некоторыми организмами [17]. 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 [11]. 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) [5], Долины Гейзеров (ДГ) и кальдеры Узон (КУ) (Курило-Камчатский вулканический пояс) [4]. 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 %).

Отпечатки

Отпечатки нитей и отдельных клеток наблюдались в кальците внутри микробных сообществ и минеральных постройках горячих источников (рис. 2). Отложение кальцита из щелочных гидротермальных растворов источников Баргузинской долины (БРЗ) происходит при условии достаточного содержания Ca в растворе. В термофильных цианобактериальных сообществах кальцит отлагается, как правило, в виде кристаллов. Сравнительно крупная карбонатная постройка формируется на источнике Гарга (БРЗ) и традиционно

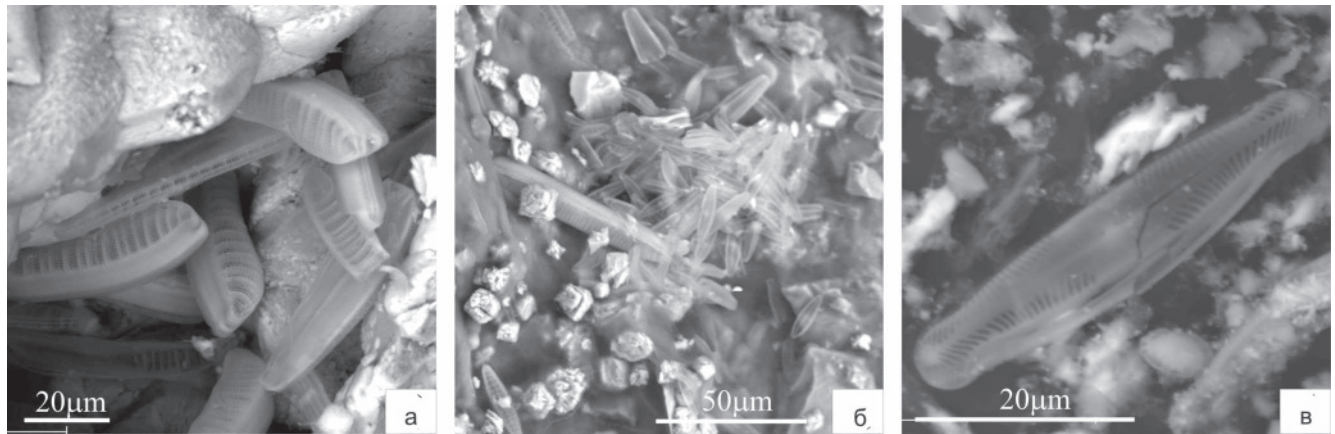


Рис. 1. Створки диатомовых водорослей: а – травертин источника Жойгон (БРЗ); б – микробное сообщество, развивающееся в зоне смешения термальных вод источника Алла и вод р. Алла (БРЗ); в – донный осадок источника «Аркашин шурф» (КУ)

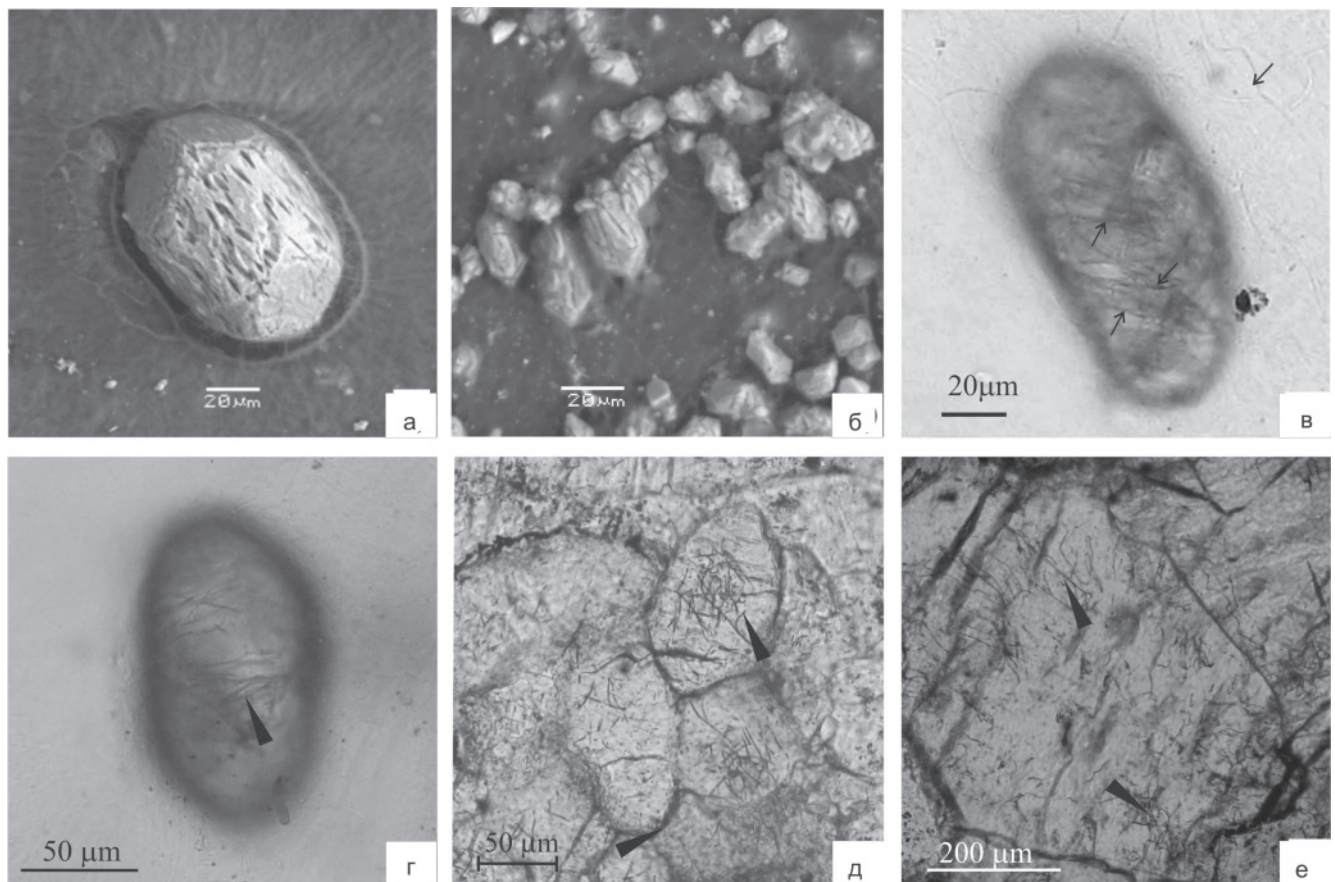


Рис. 2. Кристаллы кальцита, формирующиеся в цианобактериальном сообществе источника Гарга (БРЗ): а – с незакономерными прорезями от нитей цианобактерий; б – следы нитей цианобактерий, запечатанных в кристаллах внутри кристаллов кальцита (в, г), и кальците, слагающем Гаргинскую карбонатную постройку (д, е)

называется «травертином» [8], хотя уже давно обсуждается вопрос об определяющей роли в образовании этого тела цианобактериального сообщества [10]. Кристаллы кальцита образуются в цианобактериальном мате (см. рис. 2, а, б) [6, 13]. 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 ку-

пол, в вертикальном разрезе которого наблюдается чередование слоев с различным составом, структурными и текстурными особенностями [3, 9]. 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 ис-

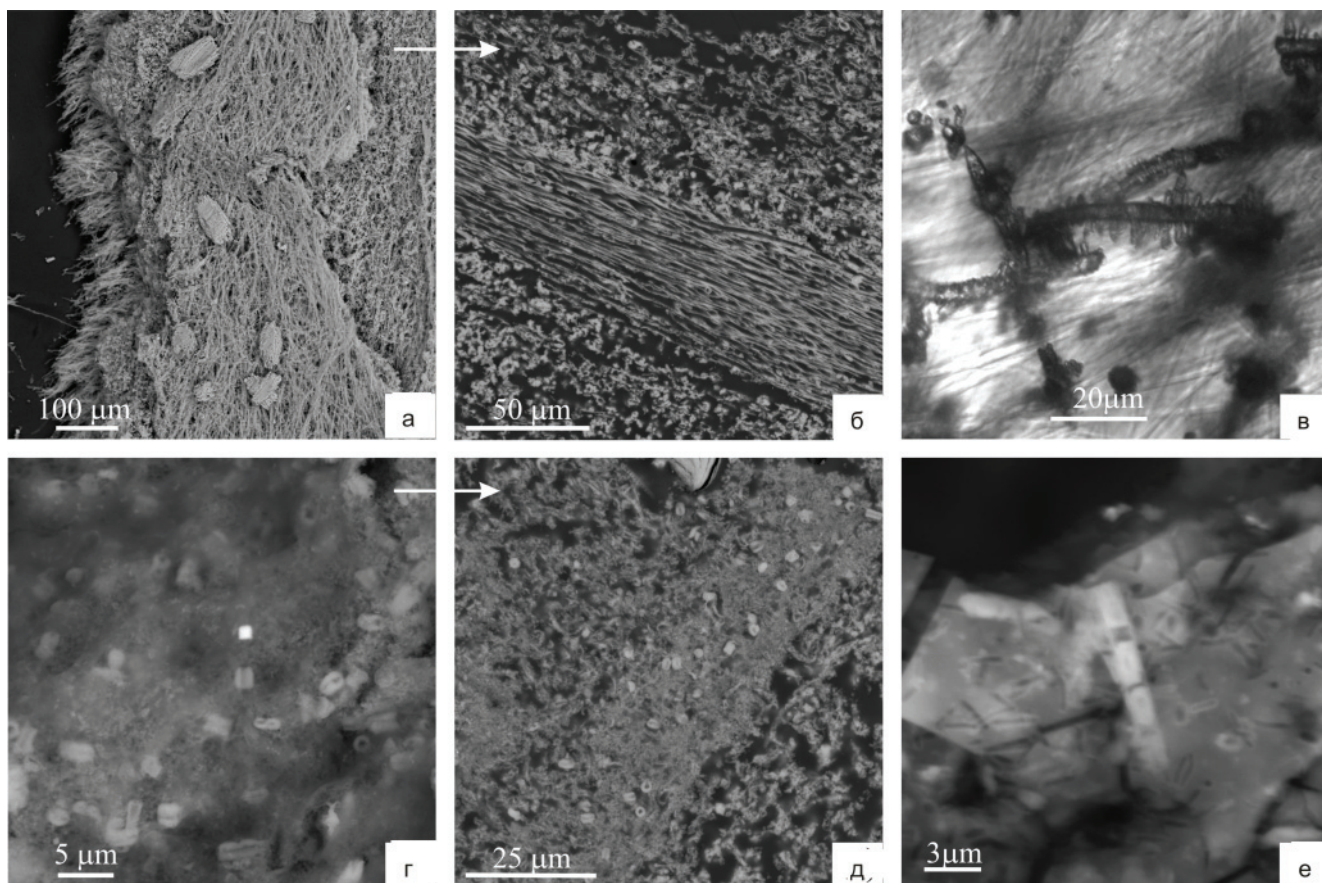


Рис. 3. Псевдоморфозы облекания (чехлы и фоссилии): а – опаловая минеральная вата в цианобактериальном сообществе источника Термофильный (кальдера Узон); б – то же в палеоотложениях; в – чехлы S° по нитям цианобактерий среди обрастаний бактерий рода *Thiobacillus* (источник Алла, БРЗ); г – чехлы опала 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)

следования и по распределению радионуклидов показать, что основная часть постройки сформирована в результате деятельности микробного сообщества [9].

Псевдоморфозы облекания (чехлы) по нитям и клеткам микроорганизмов

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

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) полно-

стью 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 H_2S в растворе, развиваются сероокисляющие бактерии. Среди обрастаний нитчатых бактерий рода *Thiobacillus* встречаются чехлы, сложенные серой, которые соответствуют размеру нитей цианобактерий рода *Phormidium* [5]. 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 [16].

Изменение степени окисления элементов и Eh-pH условий

Наиболее распространенный пример – деятельность сероокисляющих и сульфатредуци-

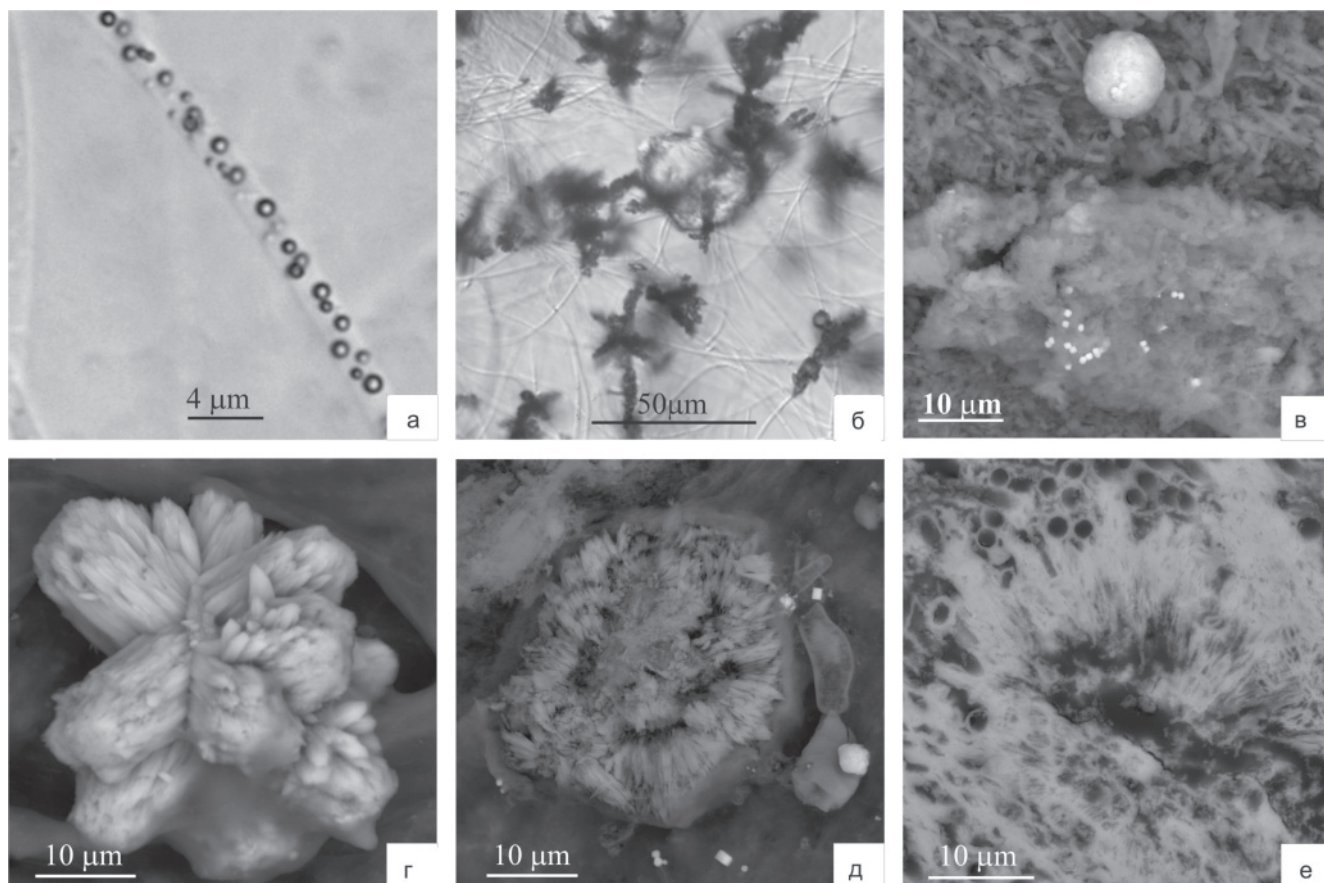


Рис. 4. Минералы, отлагающиеся в сообществах за счет изменения Eh-pH параметров и восстановления S: а – шаровидные частицы S° в нитях *Thiothrix*, б – кристаллы S° в пространстве между ними (источник Алла, БРЗ); в – пирит, образующийся в микробном сообществе за счет деятельности сульфатредуцирующих бактерий (источник Уро, БРЗ); г, д – кальцит, образующийся в цианобактериальном сообществе источника Термофильный (КУ); е – псевдоморфоза опала по кальциту (д) в палеотолжениях источника Термофильный

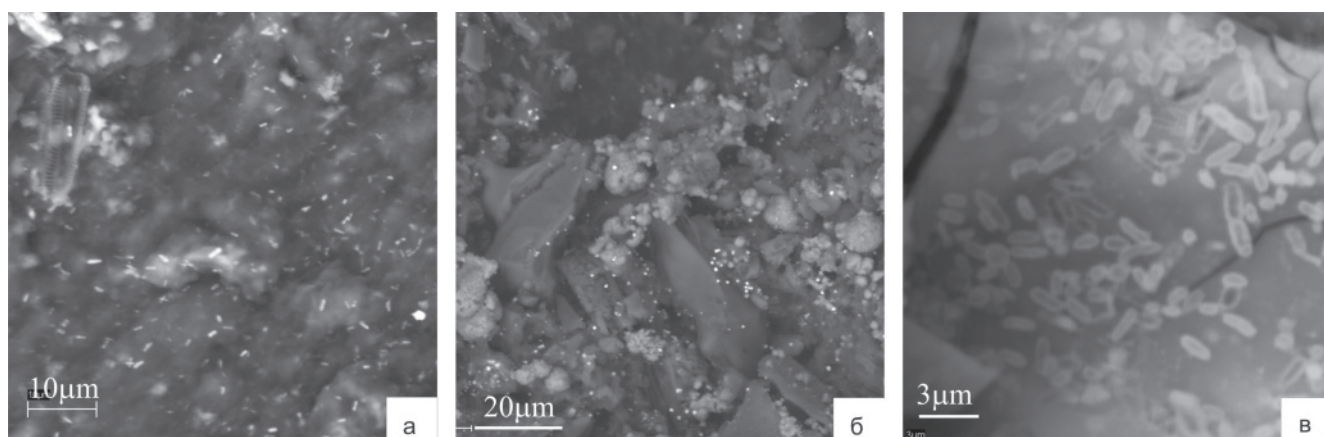


Рис. 5. Концентрирование элементов микробным сообществом и отложение минералов: а – субмикронные удлиненные выделения барита (светлое) в цианобактериальном сообществе, развивающемся на выходе парогазовых струй (ДГ); б – субмикронные светлые выделения сульфида Hg и шарообразные агрегаты сульфида Fe в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

рующих 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 [15]. После гибели бактерий шары слипаются, образуя агрегаты. Эти агрегаты становятся

зародышами для дальнейшего роста остриби-пирамидальных кристаллов (см. рис. 4, б).

Хорошо ограниченные кристаллы серы и сульфиды отмечены в богатых органическим веществом осадках термальных и холодных озер [2]. Такие сульфиды можно наблюдать и в цианобактериальных сообществах (см. рис. 4, в), но количество их в источниках, не содержащих H₂S, мало.



Развивающееся по изливу термального ручья цианобактериальное сообщество значительно влияет на изменение Eh-pH растворов [4, 7]. 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 [7], 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 палеотолжениях 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, в). 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 [1]. 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 [1].

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Золото** в системе сульфидные отходы и торфяник как модель поведения в геологических процессах [Текст] / И. Н. Мякая, Е. В. Лазарева, М. А. Густайтис [и др.] // Докл. РАН. – 2013. – Т. 453, № 2. – С. 201–206.

2. **Исследование** распределения элементов между компонентами системы соленого озера методом РФА-СИ [Текст] / Е. В. Лазарева, А. В. Брянская, О. П. Таран [и др.] // Поверхность. Рентгенов-

ские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 12. – С. 70–80.

3. **Исследование** распределения элементов между цианобактериальным сообществом и карбонатной постройкой термального источника методом РФА-СИ [Текст] / Е. В. Лазарева, А. В. Брянская, С. М. Жмодик [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 5. – С. 77–85.

4. **Кальдерные** микроорганизмы [Текст] / Отв. ред. Г. А. Заварзин. – М. : Наука, 1989. – 120 с.

5. **Микробные** сообщества щелочных гидротерм [Текст] / З. Б. Намсараев, В. М. Горленко, Б. Б. Намсараев, Д. Д. Бархутова. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. – 110 с.

6. **Минералообразование** в цианобактериальных матах щелочных гидротерм Баргузинской впадины Байкальской рифтовой зоны [Текст] / Е. В. Лазарева, А. В. Брянская, С. М. Жмодик [и др.] // Докл. РАН. – 2010. – Т. 430, № 5. – С. 675–680.

7. **Особенности** минералообразования в микробных сообществах, развивающихся по изливу источника Термофильный (кальдера Узон, Камчатка) [Текст] / Е. В. Лазарева, Н. С. Анисимова, А. В. Брянская [и др.] // Тр. Кроноцкого государственного биосферного заповедника. Вып. 2 / Отв. ред. В. И. Мосолов. – Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2012. – С. 143–156.

8. **Особенности** формирования травертинов из углекислых и азотных термальных вод в зоне Байкальского рифта [Текст] / А. М. Плюснин, А. П. Суздальницкий, А. А. Адушинов, А. Г. Мионов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 4. – С. 564–570.

9. **Перераспределение** радионуклидов между микробным матом и травертином Гаргинского горячего источника (Байкальская рифтовая зона) [Текст] / Е. В. Лазарева, С. М. Жмодик, М. С. Мельгунов [и др.] // Докл. РАН. – 2011. – Т. 439, № 5. – С. 669–676.

10. **Роль** бактериальных матов в петрогенезе и образовании рудных минералов травертинов азотных гидротерм Байкальской рифтовой зоны [Текст] / А. В. Татаринцев, Л. И. Яловик, З. Б. Намсараев [и др.] // Докл. РАН. – 2005. – Т. 403, № 5. – С. 678–681.

11. **Chojnacka, K.** Biosorption and bioaccumulation – the prospects for practical applications [Text] / K. Chojnacka // Environ. Intern. – 2010. – Vol. 36. – P. 299–307.

12. **Ehrlich, H. L.** Geomicrobiology [Text] / H. L. Ehrlich. – New York : Marcel Dekker, 2002. – 768 p.

13. **Elements** redistribution between organic and mineral parts of microbial mats: SRXFA research (Baikal Rift Zone) [Text] / E. V. Lazareva, A. V. Bryanskaya, S. M. Zhmodik [et al.] // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A. – 2009. – Vol. 603. – P. 137–140.



14. **Geomicrobiology** of manganese (II) oxidation [Text] / B. M. Tebo, H. A. Johnson, J. K. McCarthy, A. S. Templeton // Trends Microbiol. – 2005. – Vol. 13 – P. 421–428.

15. **Lithifying** microbial mats in Lagoa Vermelha, Brazil: Modern Precambrian relics? [Text] / C. Vasconcelos, R. Warthmann, J. A. McKenzie [et al.] // Sedimentary Geology. – 2006. – Vol. 185. – P. 175–183.

16. **Stal, L. J.** Microbial mats and Stromatolites [Text] / L. J. Stal // The Ecology of Cyanobacteria. Their Diversity in Time and Space / B. A. Whitton and M. Potts (Eds). – Dordrecht : Kluwer, 2000. – P. 61–120.

17. **Structural** identification of a bacterial quorum-sensing signal containing boron [Text] / X. Chen, S. Schauder, N. Potier [et al.] // Nature. – 2002. – Vol. 415, № 6871. – P. 545–549.

18. **Stolz, J. F.** Bacterial respiration of arsenic and selenium [Text] / J. F. Stolz, R. S. Oremland // FEMS Microbiol. Rev. – 1999. – Vol. 23, N 5. – P. 615–627.

19. **Tebo, B. M.** Sulfate-reducing bacterium grows with Cr(VI), U(VI), Mn (VI), and Fe(III) as electron acceptor [Text] / B. M. Tebo, A. Y. Obraztsova // FEMS Microbiol. Lett. – 1998. – Vol. 162. – P. 193–198.

© Е. В. Лазарева, 2014