

# НАКОПЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЛОФИЛЬНЫМИ И ТЕРМОФИЛЬНЫМИ ЦИАНОБАКТЕРИАЛЬНЫМИ СООБЩЕСТВАМИ (СОЛЁНЫЕ ОЗЁРА ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ, ТЕРМАЛЬНЫЕ ИСТОНИКИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ И УЗОН-ГЕЙЗЕРНОЙ ДЕПРЕССИИ)

**Лазарева<sup>1</sup> Е.В., Брянская<sup>2</sup> А.В., Таран<sup>3</sup> О.П., Тикунова<sup>4</sup> Н.В., Жмодик<sup>1</sup> С.М.**

<sup>1</sup>*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск,  
e-mail: lazareva@uiggm.nsc.ru*

<sup>2</sup>*Институт цитологии и генетики СО РАН, г. Новосибирск*

<sup>3</sup>*Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск*

<sup>4</sup>*Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, г. Новосибирск*

Микробные сообщества экстремальных экосистем интересны не только как модель прокариотных сообществ, существовавших на ранних этапах развития Земли [Заварзин, 1993, 2001; Добрецов, 2005], но и являются местами сосредоточения микроорганизмов со свойствами перспективными для биотехнологических разработок. Свидетельства жизнедеятельности микробных сообществ зафиксированы в горных породах в виде строматолитов, органогенных донных осадков, чёрных сланцев, битуминозных отложений и т.д., которые активно исследуются. Однако собственно цианобактериальные сообщества с геохимической точки зрения изучены недостаточно. Реконструкция минералого-геохимических и физико-химических условий, в которых развивались древние сообщества, возможна только при детальном изучении геохимии современных систем с бактериальными ассоциациями.

Микроорганизмы играют важную роль в геохимическом круговороте вещества, используя широкий спектр элементов в процессе жизнедеятельности, они приводят в движение биогеохимические циклы, которые намного превосходят по скорости неорганические реакции. Помимо основных элементов (H, C, N, O, P, S) фактически все организмы используют щелочные и щёлочноземельные металлы (Na, K, Mg, Ca), элементы с переменной валентностью, получая энергию в процессе окисления/восстановления (например, As(III/V), Fe(II/III), Mn(II/IV), V(IV/V), Se(IV/VI), U(IV/VI)) [Tebo, Obraztsova, 1998; Stolz, Oremland, 1999; Ehrlich, 2002; Lloyd et al., 2003; Tebo et al., 2005; Madigan, Martinko, 2006 и т.д.]. Известно селективное использование некоторыми организмами В, F, Si, Cd, Sr, Ba [Chen et al, 2002 и др.]. Для большинства микроэлементов известны случаи осаждения, мобилизации, восстановления или метилирования микроорганизмами. Наиболее интересны с биотехнологических точек зрения являются случаи аккумуляции или даже гипераккумуляции микроорганизмами отдельных элементов. Широко известны примеры накопления микроорганизмами золота [Reith et al., 2007]. Способность микроорганизмов, и в частности прокариот, накапливать радионуклиды даже предлагается использовать для иммобилизации последних из окружающей среды [Satvatmanesh et al., 2003; Simonoff et al., 2007].

Авторами получен материал по распределению большого спектра элементов в цианобактериальных сообществах гидротермальных источников континентальной и островодужной обстановок: источники Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), Курило-Камчатского вулканического пояса, а также солёных озёр Западной Сибири (табл. 1). В процессе исследований в первую очередь определялись рН раствора, содержание сульфид-иона, которое напрямую связано с окислительно-восстановительным потенциалом, содержание радионуклидов и минерализация. Как видно из табл. 1, для всех исследованных сообществ характерны щелочные условия обитания. Термофильные цианобактериальные сообщества развиваются на выходе источников, минерализация которых достаточно низка (<1.5 г/л), за исключением источников Восточного Саяна. Значительные различия наблюдаются в содержании сульфид-иона и радионуклидов.

Циано-бактериальные сообщества исследованных солёных озёр юга Западной Сибири имеют сходный облик и сходный состав доминантов. Основу составляет колониальная цианобактерия *Microcystis sp.* и диатомовые водоросли. В результате проведенного пилотного клонирования выявлены и идентифицированы также цианобактерии, принадлежащие к родам *Synechococcus* и *Cyanothece*; представители *Deltaproteobacteria* (*Desulfatibacillum sp.*, *Pelobacter sp.*, *Desulfotalea sp.*), *Alphaproteobacteria* (*Erythrobacter sp.*), *Bacteroidetes* (*Gramella sp.*), *Firmicutes* (*Bacillus sp.*).

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Тип сообществ	Объект, расположение		Состав раствора	pH	HS <sup>-</sup> , мг/л	РН	М, г/л	
Галофильные	Солёные озёра	Кулундинская степь	Na(Mg)-Cl, Na(Mg)-Cl-SO <sub>4</sub>	7-9	0.2	н. д.	50-300	
Геофильные	Источники гидротермального типа	Сейсмический район	Баргузинская долина, БРЗ	Na-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	8-10	2.5-18	фон	0.3-0.4
			В. Саян, БРЗ	Na-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	8-10	<0.02	<sup>222</sup> Rn, <sup>210</sup> Pb, <sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra	0.3-1.0
				Na-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	8-10	<0.02	фон	0.7
		Острово-дужные	Долина Гейзеров	Na-HCO <sub>3</sub> Na-Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>	7-8.5	4	<sup>222</sup> Rn, <sup>210</sup> Pb, <sup>226</sup> Ra, <sup>228</sup> Ra	4-8
			Кальдера Узон	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	8-8.5	20	фон	0.3-0.7

Примечание: РН – радионуклиды, М – минерализация, н.д. – нет данных, фон – фоновые содержания, жирным шрифтом выделены районы четвертичного (Восточный Саян) и действующего (Долина Гейзеров и кальдера Узон) вулканизма.

В родовом спектре цианобактерий термофильных источников БРЗ (Баргузинская долина и Восточный Саян) повсеместно встречаются *Synechococcus*, *Phormidium* и *Leptolyngbya*. Часто – *Gloeocapsa*, *Calothrix* и *Oscillatoria*, иногда *Lyngbya*. По количеству обнаруживаемых видов и родов гидротермы отличаются не значительно. Чаще всего в исследованных источниках доминантами из цианобактерий являются виды рода *Phormidium* или *Mastigocladus*, из бактерий – *Chloroflexus* и в сульфид-содержащих источниках – *Thiothrix*. Доминантами исследованных цианобактериальных сообществ Долины Гейзеров и кальдеры Узон являются также микороорганизмы родов *Chloroflexus*, *Phormidium*, *Synechococcus* *Mastigocladus*, а также *Rhodopseudomonas*, *Chromactum vinosum*. Таким образом, основную биологическую массу в термофильных сообществах составляют организмы одних и тех же родов, что позволяет корректно проводить сравнение способности накапливать элементы в зависимости от различных условий.

Средние содержания большинства элементов в изученных цианобактериальных матах близки между собой, но выявлены очевидные различия в содержаниях Br, Ia, Cs, As и Ge. Установлено существенное накопление Br микробными сообществами солёных озёр (рис. 1). В палеоклиматических построениях используют прямые корреляционные отношения между содержанием Br и биогенного кремнезёма в осадках [Phedorin et al., 2000 и др.], что связывается с поглощением элемента диатомовыми водорослями. Цианобактериальные сообщества солёных озёр состоят на 1/5-1/4 часть из диатомовых водорослей и также

аккумулируют Br в значительных количествах. Существенное повышение концентрации брома наблюдается и в донных отложениях солёных озёр. Микробные сообщества в гидротермальных системах бром не накапливают.

Установлено накопление микробными сообществами: йода в термальных источниках Долины Гейзеров и источника Жойгон; мышьяка в гидротермах Долины Гейзеров, кальдеры Узон и в источниках Восточного Саяна (Хойто-Гол и Жойгон). Обе группы источников относятся к районам четвертичной или современной вулканической деятельности, хотя основной ионный состав растворов значительно различается (табл. 1). Недавно было обнаружено, что микроорганизмы озера Моно Лэйк (содержащего высокие концентрации As) могут существовать при отсутствии фосфора, замещая его мышьяком в биомолекулах, включая ДНК [Wolfe-Simon et al., 2010].

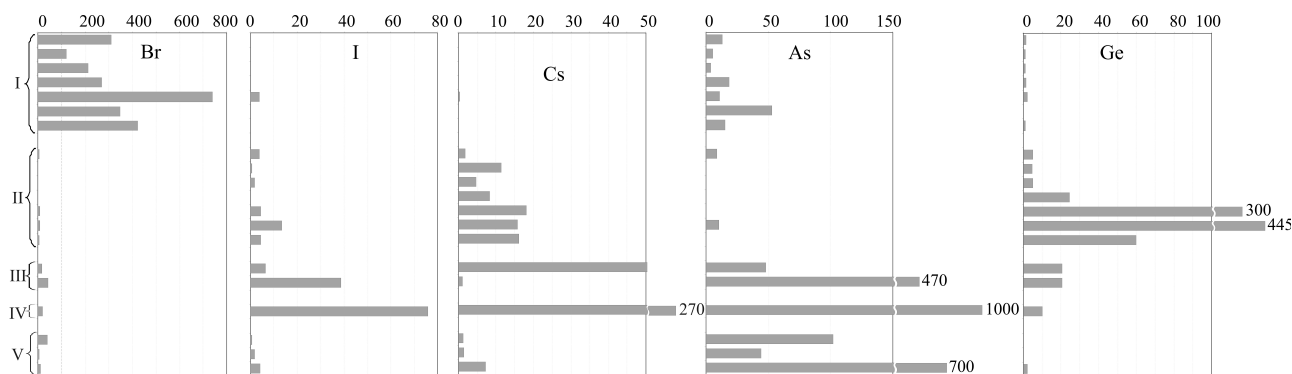


Рис. 1. Содержание брома, йода, цезия, мышьяка и германия (г/т) в: (I) галофильных микробных сообществах солёных озёр Юга Западной Сибири; (II) цианобактериальных матах термальных источников Баргузинской долины и (III) Восточного Саяна; (IV) биоминеральных агрегатах, формирующихся на выходе термальных источников Долины Гейзеров и (V) кальдеры Узон (Камчатка).

Заметные содержания Cs наблюдаются в бессульфидных источниках Баргузинской долины ( $> 15$  г/т). Значительные вариации концентраций Cs, достигающие 200 г/т ( $x_{\text{среднее}} = 50$  г/т), установлены в микробных сообществах сульфидсодержащего источника Хойто-Гол в Восточном Саяне, а также от 180 до 330 г/т Cs ( $x_{\text{среднее}} = 300$  г/т Cs на сухое вещество) в биоминеральных агрегатах Долины гейзеров (рис. 1).

Биологическая роль Ge не изучена. Большой интерес к Ge возник в результате работ японских исследователей [Mochizuki, Kada, 1982], установивших, что его органические соединения оказывают антимутогенный эффект на *Escherichia coli* при воздействии  $\gamma$ -излучения. В последнее время всё более рассматривается возможность биотехнологического получения композитных оксидов кремния и германия с помощью диатомовых водорослей [Jeffryes et al., 2008], но элемент токсичен для организмов, и на данный момент опыты по культивированию диатомовых водорослей в присутствии Ge не увенчались успехом.

Авторами установлено избирательное накопление Ge циано-бактериальными сообществами бессульфидных источников с повышенным содержанием Rn,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  (Гаргинский и Уринский источники БРЗ) в количествах от 160 до 1000 г/т на в сухое вещество [Lazareva et al., 2009] (рис. 1). Повышенные содержания германия наблюдаются так же в микробных сообществах других источников БРЗ: Гусихинского ( $x_{\text{среднее}} = 60$  г/т), Сеюйского ( $x_{\text{среднее}} = 25$  г/т). Средние содержания Ge в сообществах сульфидсодержащих источников Баргузинской долины, в целом, несколько повышены (4 г/т). Микробные сообщества Восточного Саяна развиваются в сульфидсодержащей среде с повышенным содержанием радионуклидов (как и на Гаргинском источнике здесь наблюдаются более высокие удельные активности изотопов радия), содержат в среднем 20 г/т Ge, что может свидетельствовать о влиянии различных форм нахождения Ge на уровень его накопления бактериальными сообществами.

В результате проведенного молекулярно-генетического анализа можно сделать заключение о существенном сходстве микробных сообществ, выявленных в биоматах из

Уринского и Гаргинского термальных источников БРЗ. Учитывая высокое содержание германия в органической фракции микробных сообществ из этих источников, можно предположить наличие родственных микроорганизмов, которые обладают сходными биохимическими путями, участвующими в процессах аккумуляции Ge.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-05-00717; Интеграционного проекта СО РАН -№ 94.*

## Литература

Добрецов Н.Л. О ранних стадиях зарождения и эволюции жизни // Вестник ВОГиС. 2005. Т. 9. №1. С. 43-54.

Заварзин Г.А. Становление биосферы // Вестник РАН. 2001. Т. 71. № 11. С. 988-1001.

Заварзин Г.А. Эпиконтинентальные содовые водоемы как предполагаемые реликтовые биотопы формирования наземной биоты // Микробиология. 1993. Т. 62. 5. С. 789-800.

Chen X, Schauder S, Potier N, Van Dorsselaer A, Pelczer I, Bassler BL, Hughson FM. Structural identification of a bacterial quorum-sensing signal containing boron // Nature. 2002 Jan 31. N415(6871). P. 545-9.

Ehrlich H.L. Geomicrobiology. Marcel Dekker, New York, 2002.

Jeffryes C., Gutu T., Jiao J., Rorrer G.L. Two-stage photobioreactor process for the metabolic insertion of nanostructured germanium into the silica microstructure of the diatom *Pinnularia* sp. // Materials Science and Engineering C-Biomimetic and Supramolecular Systems. 2008. V. 28(1). P. 107-118.

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. N603. P.137-140.

Lloyd J.R., Leang C., Hodges Myerson A.L., et al. Biochemical and genetic characterization of PpcA, a periplasmic c-type cytochrome in *Geobacter sulfurreducens* // Biochem. J., 2003. N369. P. 153-161.

Madigan M.T. and Martinko J.M.. Brock Biology of Microorganisms, 11th edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ., 2006, ISBN 0-13-144329-1.

Mochizuki H. and Kada T. Antimutagenic action of mammalian placental extracts on mutation induced in *Escherichia coli* by UV radiation,  $\gamma$ -rays and *N*-methyl-*N'*-nitro-*N*-nitrosoguanidine // Mutation Research. 1982. N 95. P. 457-474.

Phedorin M.A., Goldberg E.L., Grachev M.A., et al. The Comparison of Biogenic Silica, Br and Nd Distributions in the Sediments of Lake Baikal as Proxies of Changing Paleoclimates of the Last 480 ky // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2000. V. A448. N 1-2. P. 400-406.

Reith F., Lengke M. F., Falconer D., Craw D. and Southam G. The geomicrobiology of gold // The ISME Journal. 2007. N 1. P.567-584.

Satvatmanesh D., Siavoshi F., Beitollahi M. M., Amidi J., Fallahian N. Biosorption of  $^{226}\text{Ra}$  in high level natural radiation areas of Ramsar, Iran // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2003. V. 258, N 3. P. 483-486.

Simonoff M., Sergeant C., Poulain S., Pravikoff M.S. Microorganisms and migration of radionuclides in environment // C. R. Chimie. 2007. N.10. P. 1092-1107.

Stolz J.F. and Oremland R.S. Bacterial arsenate and selenate reduction // FEMS Microbial Revs 1999. N.23. P. 615-627.

Tebo B.M., and Obraztsova, A.Ya.. Novel Sulfate-Reducing Bacterium Grows with Cr(VI), U(VI), Mn(IV), and Fe(III) as Electron Acceptors // FEMS Microbiol. Lett. 1998. N.162. P. 193-198.

Tebo B.M., H.A. Johnson, J.K. McCarthy and A.S. Templeton. Geomicrobiology of manganese(II) oxidation // Trends in Microbiology. 2005. N 13. P. 421-428.

Wolfe-Simon F., Blum J. S., Kulp T. R., et al. A Bacterium That Can Grow by Using Arsenic Instead of Phosphorus // Science. 2010, 2 December.