



УДК 574.52

Е. И. Тембрел¹, Л. Л. Дёмина²

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683 006;
tembrel84@mail.ru

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Москва

Экологическая роль синезелёных водорослей в термальных источниках Камчатки

Особенности биогеохимического поведения тяжёлых металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cr, Pb, Cd) и металлоидов (As, Sb) были изучены при взаимодействии альго-бактериальных матов и термальных вод 8 камчатских источников. Содержание металлов было определено методами пламенной и электротермической атомно-абсорбционной спектрометрии. Результаты наших исследований показали, что тяжёлые металлы и металлоиды аккумулируются цианобактериями в разной степени, установлено влияние физико-химических параметров термальных вод на биоаккумуляцию.

Камчатка — уникальный район проявления активного вулканизма и современной гидротермальной деятельности [5]. По шлейфу ряда источников обильно развиваются альгобактериальные сообщества. В целом, для всех матов характерно наличие нескольких основных зон, имеющих определённый набор микроорганизмов, с присущим им метаболизмом. Первая верхняя зона, имеющая зелёную окраску, — зона окислительного фотосинтеза с цианобактериями; вторая — розовато-вишнёвого цвета — зона анаэробного (бескислородного) фотосинтеза с пурпурными бактериями; третья — чёрного цвета — зона анаэробной деструкции с сульфидогенами [1–3, 4].

Представляет интерес изучить поведение бактериального сообщества относительно протекающих через них термальных вод. С этой целью, во время полевых работ на Камчатке (в кальдере вулкана Узон, на Верхне- и Нижне-Апапельских источниках и на источниках Академии наук), были отобраны пробы термальной воды и контактирующей с ней биомассы мата. Основной задачей настоящего исследования является изучение степени аккумуляции тяжёлых металлов и металлоидов биомассой альгобактериальных матов различных гидротерм.

Непосредственно в истоке термального источника, или в начале развития альгобактериального мата по ручью термального потока, по методике [6] отбиралась первая проба воды, в конце постройки мата — вторая. При этом измерялись температура, pH и Eh раствора.

Концентрацию микроэлементов — Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Cr, Pb, Cd, As, Sb в пробах термальных вод и синезелёных водорослей определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Вариабельность содержания изученных элементов в термальных водах различных источников

весьма высока, что отражает геохимическую специализацию вулканогенных гидротермальных систем (рис. 1). Нами и другими исследователями описан процесс аккумуляции микроэлементов из термальных вод биотой. Термальные воды на изливе ручья и в начале мата (т. е. до взаимодействия воды с альгобактериальным сообществом) отличаются по содержанию металлов от концевых частей ручья и матов, причём, по-разному для разных элементов. Видовой состав сообщества также, обычно, меняется от истока к устью.

В описанных нами источниках доминирующими организмами верхнего слоя являются *Mastigocladus laminosus* Cohn, *Phormidium tenue* (Menegh.) Gom, *Ph. cincinnatum* Itzigs., *Ph. molle* (Kütz.) Gom, *Ph. laminosum* (Ag.) Gom, *Ph. valderiae* (Delp.) Geitl., *Ph. ambiguum* Gom., *Synechocystis salina* Wisl., *Oscillatoria terebriformis* (Ag.) Elenk., *O. terebriformis* F. pseudogrunowiana Elenk. et Kossinsk., *O. formosa* Bory (рис. 2).

При протекании термальной воды по поверхности альгобактериальных матов (и при насыщении мата водой), происходит биогеохимическое взаимодействие водорослей и термальной воды. Полученные нами данные свидетельствуют о влиянии сообщества синезелёных водорослей на концентрацию тяжёлых металлов в протекающей воде, а также о высокой интенсивности бионакопления этим сообществом ряда тяжёлых металлов и металлоидов.

Сообщества водорослей в процессе своего метаболизма захватывают из термальных вод, утилизируют и выделяют в воду в виде метаболитов многие металлы, причём, степень их бионакопления весьма высока. В этом можно убедиться, сравнивая коэффициенты накопления ($F_{\text{нак}}$) альгобактериальных матов относительно термальных вод ($F_{\text{нак}} = C_{\text{водор.}}/C_{\text{вода}}$), т. е. рассматривая концентри-

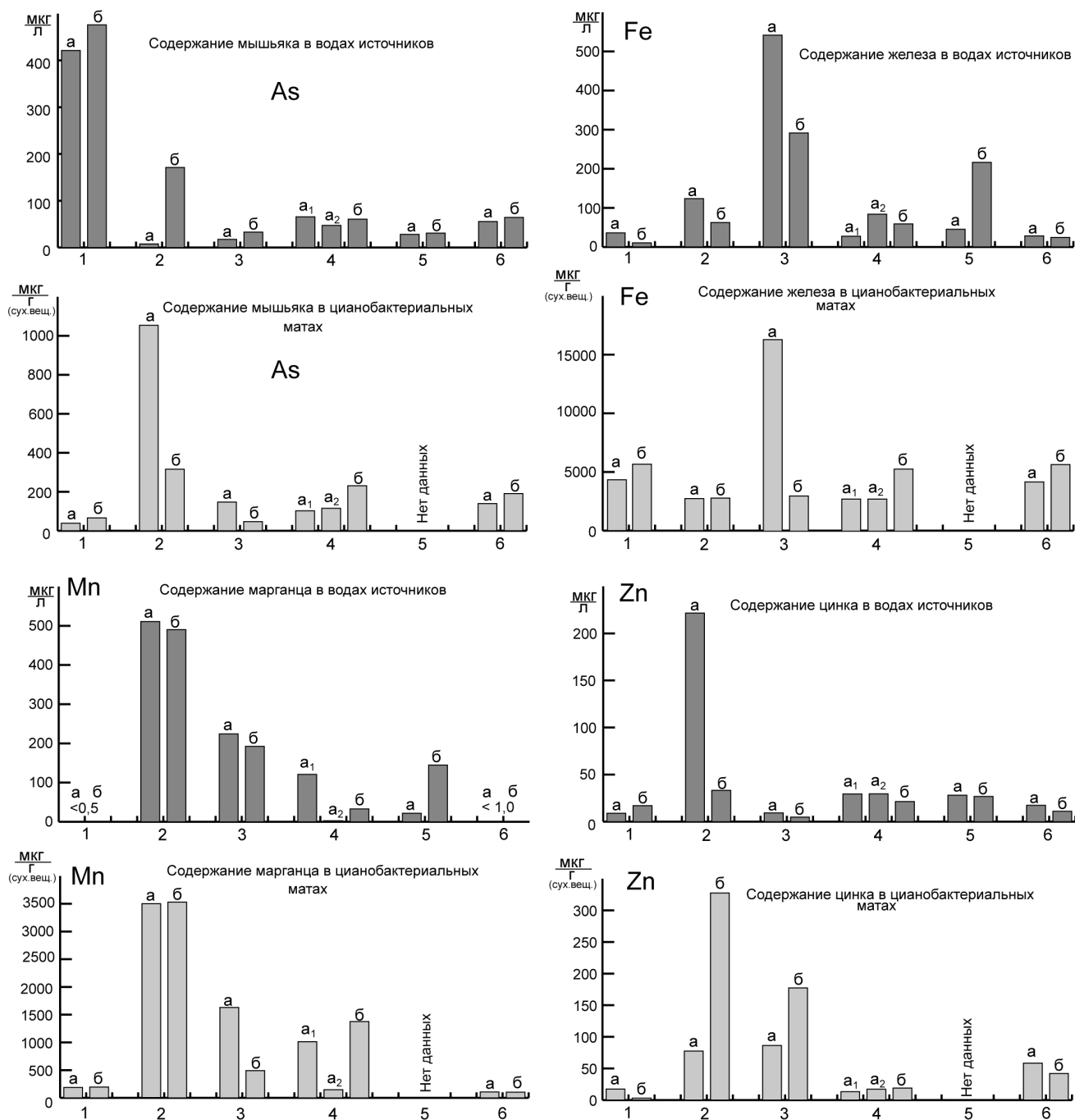


Рис. 1. Изменение содержания As, Mn, Fe, Zn в водах и цианобактериальных матах некоторых термальных источников Камчатки от их истока до устья. 1–6 – Места отбор проб; а – исток источника, б – устье источника; 1 – ручей Зелёный, источники Академии Наук, 2 – ручей Термофильный, кальдера вулкана Узон, 3 – строматолитовый участок II, кальдера вулкана Узон, 4 – источники № 18 и № 19, Верхнее-Апапельская группа источников (а₁ – исток источника № 18, а₂ – исток источника № 19, б – общее устье (слияние источников № 18 и 19), 5 – источник № 2, Верхнее-Апапельская группа источников, б – ручей возле лагеря, Нижне-Апапельская группа источников.

рующую функцию синезелёных водорослей, обитающих в этих водах. В табл. 1 приводятся последовательности убывания $F_{\text{нак}}$ для тяжёлых металлов и металлоидов в начале и в конце бактериального мата ручьёв Зелёного и Термофильного.

Как видно из этих данных, наибольшим бионакоплением ($F_{\text{нак}}$ от 10^5 до 10^3) в Зелёном ручье характеризуются Fe, Mn, Zn, Cu и Co, что обусловлено биохимической важностью этих элементов для живого вещества. В Термофильном ручье, кроме

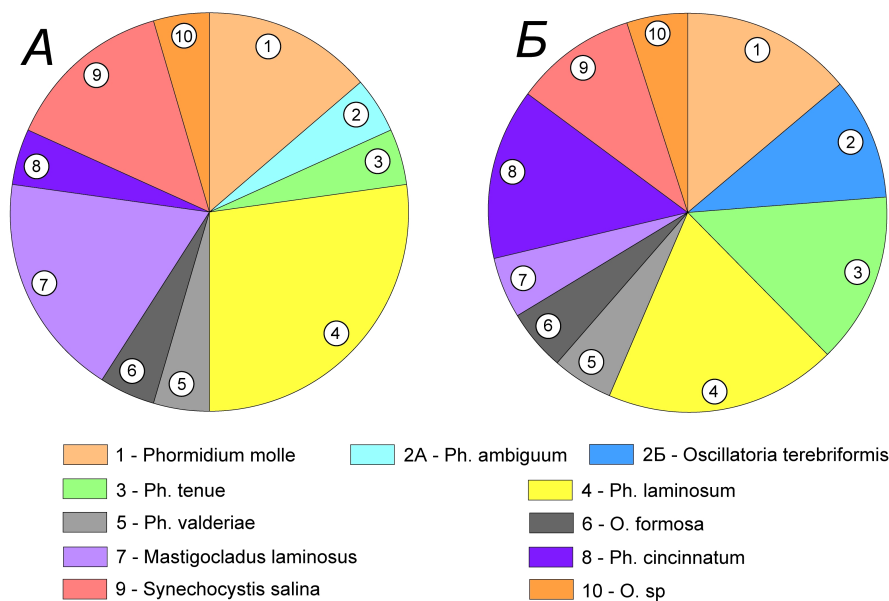


Рис. 2. Встречаемость видов термофильных водорослей в % для изученных термальных источников Камчатки (А – в начале мата, Б – в конце мата).

Таблица 1. Значения $F_{\text{нак}}$ для тяжёлых металлов и металлоидов в начале и в конце бактериального мата ручьёв Зелёного и Термофильного.

руч. Зелёный				руч. Термофильный			
исток		устье		исток		устье	
Mn	$4 \cdot 10^5$	Mn	$4 \cdot 10^5$	Fe	$2 \cdot 10^4$	Fe	$4 \cdot 10^4$
Fe	$1 \cdot 10^5$	Fe	$5 \cdot 10^5$	Mn	$7 \cdot 10^3$	Zn	$1 \cdot 10^4$
Cu	$6 \cdot 10^3$	Cu	$3 \cdot 10^4$	As	$1 \cdot 10^5$	Mn, Cu	$6 \cdot 10^3$
Pb, Zn, Co	$2 \cdot 10^3$	Pb	$7 \cdot 10^3$	Cu	$7 \cdot 10^3$	As, Co	$2 \cdot 10^3$
Cr	$1 \cdot 10^3$	Cd, Co	$2 \cdot 10^3$	Sb	$5 \cdot 10^3$	Sb, Cd	$1 \cdot 10^3$
Cd	$3 \cdot 10^2$	Cr	$1 \cdot 10^3$	Co	$2 \cdot 10^3$	Cr	$5 \cdot 10^2$
As, Sb	$1 \cdot 10^2$	Zn	$2 \cdot 10^2$	Pb, Cd	$7 \cdot 10^2$	Pb	$2 \cdot 10^2$
		Sb	$1 \cdot 10^2$	Zn	$3 \cdot 10^2$		
		As	2	Cr	$7 \cdot 10^1$		

этих металлов, аналогичные высокие $F_{\text{нак}}$ (105–103) выявлены для As и Sb, которые являются токсичными элементами, но в бактериальных матах они накапливаются больше по сравнению с Зелёным ручьём, при более высоком содержании As и Sb в термальных водах Зелёного ручья. Возможно, это вызвано разным видовым составом сообществ источников, либо защитными механизмами, препятствующими биоконцентрированию данных металлоидов, выработанными в условиях с их значительными количествами.

Закономерное изменение содержания элементов по слоям мата прослеживается для Mn и As. Их содержание в нижних, деструктивных слоях понижается, некоторое повышение отмечено для Pb и Cu. Видимо, Pb и Cu, которые раньше имели относительно растворимую форму, образуют мало-растворимые сульфиды в зоне сульфат-редукции, переходя в отложения.

Относительно влияния температуры на аккумуляцию изученных элементов, чёткая закономерность прослеживается только для Fe – с понижением температуры по источнику, оно концентрируется в альго-бактериальном мате в больших количествах, вне зависимости от видового состава сообщества, что, видимо, обусловлено биохимической важностью этого элемента для живого вещества.

В целом, состав воды, температура, кислотность и окислительно-восстановительные условия источника оказывают большее влияние на накопление элементов, чем видовой состав микроорганизмов. Данный вывод подтверждается тем, что у представителей одного вида в воде разного состава аккумуляция одного и того же элемента может различаться на порядок.

Таким образом, термофильный циано-бактериальный мат современных мелководных гидротермальных систем следует считать активным преобра-

зователем воды гидротермальных источников и важным фактором биогеохимической дифференциации микроэлементов.

Список литературы

1. Герасименко Л. М. Актуалистическая палеонтология циано-бактериальных сообществ. Диссертация в виде научного доклада на соискание учёной степени доктора биологических наук. Москва. 2002. 70 с.
2. Герасименко Л. М., Орлеанский В. К. Актуалистическая палеонтология цианобактерий. // Труды Института микробиологии им. Виноградского С. Н.. Вып. XII: Юбилейный сборник к 70-летию Института — М.: Наука. 2004. С. 80–108.
3. Герасименко Л. М., Карпов Г. А., Орлеанский В. К., Заварзин Г. А. Роль цианобактериального фильтра в трансформации газовых компонентов гидротерм на примере кальдеры Узон // Журн. Общ. Биология, 1983, Том. 44. С. 842–851.
4. Кальдерные микроорганизмы. М.: Наука, 1989. 120 с.
5. Карпов Г. А. Узон-Вайотапский тип комплексного ртутно-сурьмяно-мышьякового оруденения в современных гидротермальных системах. // Геология рудных месторождений, 1991. № 3. С. 3–21
6. Набоко С. И. Металлоносность современных гидротерм в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1980. 199 с.