

УДК 574.52

## ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ТЕРМОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ НЕКОТОРЫХ ГОРЯЧИХ ИСТОЧНИКОВ КАМЧАТКИ

*Тембрел Е.И.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
г. Петропавловск-Камчатский*

*Научный руководитель д.г.-м.н. Карпов Г.А.*

В работе рассматривается механизм формирования специфических биокремнистых пластинчатых отложений, которые накапливаются только в термальных источниках кальдеры вулкана Узон (Камчатка). Формирование этих осадков происходит благодаря сочетанию таких факторов как: 1) повышенное содержание кремния в растворе 2) наличие активно растущего альго-бактериального мата; 3) обилие газовых проколов по шлейфу стока источника, где они достигают мощности до 30 см. Показано влияние альго-бактериальных матов на физико-химические параметры термальных вод и послонную биоаккумуляцию в них отдельных компонентов. Полученные результаты позволяют рассматривать циано-бактериальные маты современных термальных источников в качестве активного преобразователя термальных вод и важного фактора биогеохимической миграции элементов.

*Ключевые слова: сине-зеленые водоросли, цианобактерии, тяжелые металлы, макроэлементы, биоаккумуляция, альго-бактериальные маты*

### ВВЕДЕНИЕ

Термальные источники кальдеры вулкана Узон являются природным полигоном для изучения процессов, протекающих в поствулканическую стадию развития вулcano-тектонических депрессий. [1, 7, 11]

В зонах деятельности термальных источников в областях современного вулканизма формируются термальные источники со специфическим характером гидротермально-измененных пород [8] и хемогенно-биогенных образований [9].

Процессы их формирования, по мнению ряда исследователей, аналогичны тем, которые происходили в таких же условиях на ранней стадии развития Земли.

В целом, для всех матов характерно наличие нескольких основных зон, имеющих определенный набор микроорганизмов, с присущим им метаболизмом. Первая верхняя зона, имеющая зеленую окраску, - зона оксигенного фотосинтеза с цианобактериями; вторая - розовато-вишневого цвета - зона аноксигенного (бескислородного) фотосинтеза с пурпурными бактериями; третья - черного цвета - зона анаэробной деструкции с сульфидогенами [2, 3, 11]. В свою очередь, данные зоны можно разделить на несколько слоев. Соответственно, эти зоны различаются по температурному режиму, рН, Eh и могут рассматриваться как биогеохимические барьеры, на которых отлагаются минеральные компоненты, выносимые термальными растворами. В ранних работах [10, 11] было отмечено накопление ряда микроэлементов в поверхностной зоне альго-бактериальных матов.

Целью данной работы является изучение степени аккумуляции ряда элементов биомассой альго-бактериальных матов и роль мата в преобразовании и накоплении ряда элементов в осадках термального потока.

С этой целью во время полевых работ на Камчатке из термальных источников в кальдере вулкана Узон были отобраны пробы вод и послойно как из биомассы мата, так и осадков.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе обсуждаются результаты, полученные в полевые сезоны 2007-2009 годов. Объектом исследования явился источник «Термофильный» в кальдере вулкана Узон, в котором по стоку развивается термофильное альго-бактериальное сообщество, формирующее слоистый водорослевый мат.

Отбор проб вод проводился по общепринятой методике, как правило в двух точках термального источника: в истоке или в начале развития альго-бактериального мата и в конце постройки мата с измерением температуры, рН, Eh раствора.

Пробы биологического материала отбирались также в начале и конце мата по шлейфу источника, за исключением случаев, в которых мат имел небольшую площадь, где отбор проводился один раз. Мат разделялся на основные зоны, в которых затем выделялись отдельные слойки. Подстилающее осадочное образование также разделялось на 4 слоя, но данное деление условно и не определялось природой отложения. Концентрацию тяжелых металлов в пробах термальных вод и сине-зеленых водорослей определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии приборами "Квант-2А" (в пламени) и "Квант-Z.ЭТА (в графитовой кювете). Ряд проб отдельных микрослойков мата анализировался с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра «S4 PIONEER». Анализы проб термальных вод выполнялись как на атомно-абсорбционном спектрофотометре «SOLAR» так и потенциометрическими, объемными, колориметрическими методами в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН.

Полевые наблюдения показали, что доминирующими организмами биоматов были осцилляториевые сине-зеленые водоросли. Диагностика видов водорослей проведено с помощью определителя [4].

### МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По стоку горячего ручья «Термофильный» с температурой 57-35<sup>0</sup>С обильно и постоянно развивается альго-бактериальное сообщество, в растущей верхней зеленой части которого формируется слоистый водорослевый мат толщиной от 1 до 2.5 мм (рис.1). Наблюдения и определения в полевых условиях показали, что доминирующими органическими образованиями в изучаемых нами точках с температурами 55-45<sup>0</sup>С, оказались сине-зеленые разности, принадлежащие к представителям осцилляториевых водорослей, а именно, *Phormidium. molle*, *Ph. ambiguum*, *Ph. tenue* и *Oscillatoria terebriformis* [4].

Гидротермы источника «Термофильный» по химическому составу относятся к гидрокарбонатно-углекислым хлоридно-натриево-кальциевым

водам с общей минерализацией 1,3 г/л. Особенностью данного источника является высокое содержание кремния в пересчете на ортокремневую кислоту, при температуре 72-25 °С (до 400 мг/л  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  в растворе и 189 мг/л в коллоиде, рН=6.5-6.7).

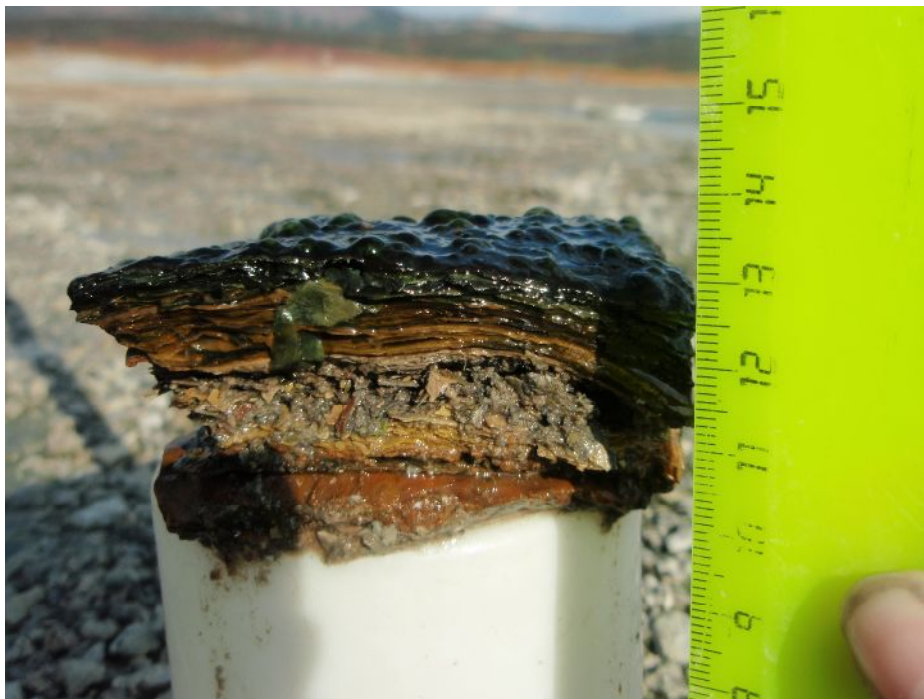


Рис. 1. Циано-бактериальный мат.

Водорослевый мат, структурообразующим компонентом которого являются представители названных выше осцилляториевых сине-зеленых водорослей, развивается поверх слоя дресвы, представляющей собой слоистое осадочное образование в виде пластинок размером от долей мм до 1 см. Мощность отложения такой дресвы достигает порой 30 см на территории действия источника.

Эти пластины характеризуются следующим химическим составом (в % масс):  $\text{SiO}_2$  - 46,81,  $\text{TiO}_2$  - 0,01,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 0,55,  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{FeO})$  - 1,07,  $\text{MnO}$  - 0,22,  $\text{MgO}$  - 0,89,  $\text{CaO}$  - 18,11;  $\text{P}_2\text{O}_6$  - 0,09,  $\text{Na}_2\text{O}$  - 0,21,  $\text{K}_2\text{O}$  - 0,10,  $\text{BaO}$  - 0,02,  $\text{SrO}$  - 0,08, п.п.п. - 31,84. Видно, что основными компонентами являются кремний и кальций. Кривые инфракрасного спектра этого вещества свидетельствуют о наличии опала и карбонатов [12].

Залегание пластинок горизонтальное. Они не скреплены между собой в монолит и легко отделяются друг от друга. Обследование потока ручья источника и растущего водорослевого мата показало непосредственную связь отложений слоистых осадков с жизнедеятельностью растущего альго-бактериального мата. Это проявляется в том, что на поверхности мата данного источника, растущего по шлейфу стока, часто можно видеть отдельные обсохшие бугорки высотой до 5 см, покрытые минерализованной коркой белого цвета толщиной до 3 мм. На сколах этих корок видно, что по внешнему виду ее частички идентичны дресве. Наши наблюдения показали, что образование таких бугров обусловлено активным выделением газов (из многочисленных точечных проколов) под альго-бактериальным матом. Выходящий газ, концентрируясь в том или ином месте под водорослевым матом, а иногда именно над газовым проколом, способствует приподниманию растущей водорослевой биопленки над поверхностью потока воды.

Микрокопирование материала приподнятого участка мата показало, что структура верхнего минерализованного слоя представляет собой слои водорослей, в которых и происходит накопления оксида кремния, аккумулирующегося здесь за счет его экстракции из среды, отличающейся относительно высоким, как указывалось выше, содержанием этого компонента (принцип фитиля). При искусственном высушивании нижних зеленых слоев (прилегающих к белесым слоям) отмечено, что прослойки между слоями, а возможно и сами слои частично белеют, что свидетельствует о значительном наличии и в них минеральной компоненты.

При высушивании растущего участка мата, расположенного в потоке ручья, подобного эффекта белых прослоек не отмечено. При погружении обратно в толщу воды минерализованного слоя, он вновь зарастает биопленкой с возможным повторением минерализации по описанному выше пути, что, по-видимому, обуславливает накопление дресвы в районе существования данного мата.

Описываемые нами окремненные осадочные отложения (дресва) в источниках кальдеры вулкана Узон имеют крайне локальное распространение и обусловлены специфическими условиями источника «Термофильный». Его особенности характеризуются относительно повышенным содержанием кремния в растворе и большой поверхностью шлейфа стока. Причем, что особенно важно - наличием многочисленного количества действующих газовых проколов, располагающихся, практически, под всей поверхностью растущего биомата, на которой формируются подсыхающие водорослевые бугры концентрирующие соединения кремния.

Изучение территории кальдеры Узон показало, что сочетание подобных факторов - редкое явление. Водорослевые маты развиваются, практически, в потоке каждого термального источника. При этом происходит локальное высыхание биопленок, но они занимают крайне небольшую площадь, а образующиеся тонкие пластинки не закрепляются на месте, а уносятся временными водными потоками.

Безусловно, используемый в данной работе термин «дресва», хотя и удобен, тем не менее, не отвечает общепринятому [5]. Отложения, к которым этот термин отнесен, - это не продукты механического (физического) разрушения горных пород, а специфические кремнистые новообразования, которые получили в научной литературе название «биосилициты». Они образуются при обязательном сочетании двух факторов: геохимического (разгрузка «кремнийсодержащих соединений») и биологического (в данном случае - альгологического).

Термофильное сообщество оказывает непосредственное воздействие на воду, протекающую в зоне его роста. Температура воды при прохождении по мату понижалась в среднем в полтора раза, кислотность среды уменьшалась (возрастание рН) в среднем на 1.2, окислительно-восстановительный потенциал (Еh) в среднем повышался на 63 мВ.

Так, например, изменение содержаний растворимых форм марганца и железа меняется в источнике от истока к устью. При высоком насыще-

нии кислородом воды марганец окисляется до большей валентности и осаждается. Для ряда элементов наблюдается противоположная картина. Например, изменение содержания растворимой меди в источнике от истока к устью возрастает – при высоком рН и присутствии свободной углекислоты образуются растворимые бикарбонатные соединения меди [6].

Представляется интересным проследить геохимическую эволюцию сконцентрированных циано-бактериальным матом химических элементов. Анализ мата послойно показал, что происходит возрастание содержания кремния от верхних слоев к нижним частям (диаграмма 1). При этом также возрастают концентрации меди, натрия, алюминия. Количества кальция, стронция, бария, марганца, церия, фосфора – напротив уменьшаются по мере деструкции мата.

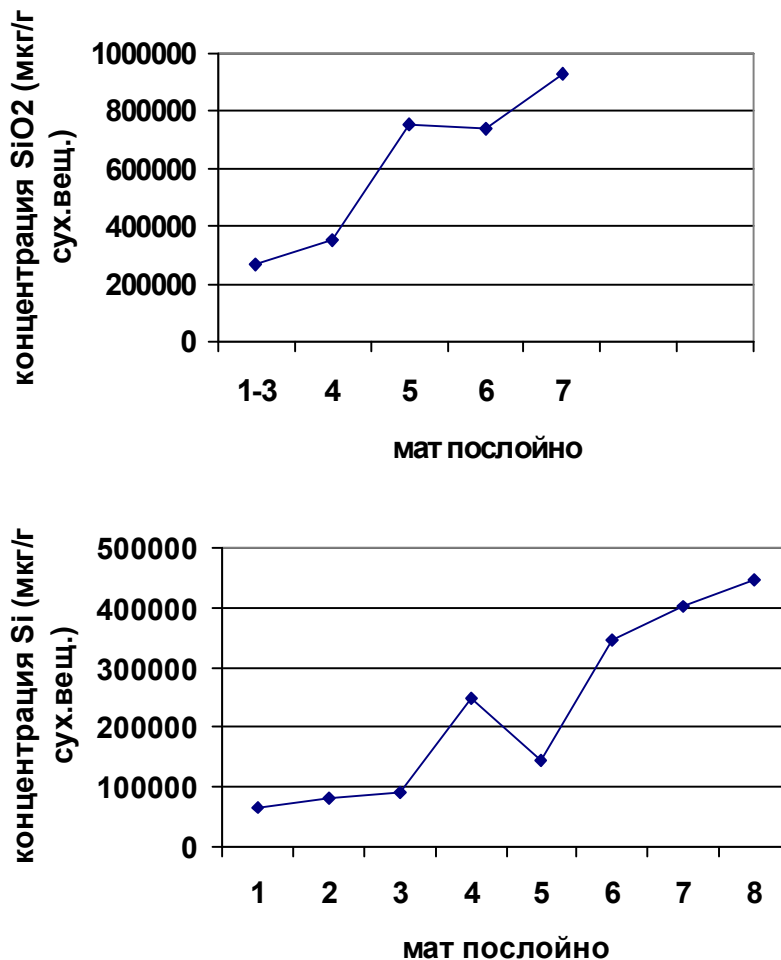


Диаграмма 1. Изменение содержания кремния по слоям в цианобактериальном мате в 2008 (вверху) и 2009 (внизу) годах.

Анализ дресвы послойно показал снижение содержания кремния по мере заглубления слоев, что еще раз указывает, на наш взгляд, на формирование ее вследствие происходящих в мате процессов (диаграмма 2). В дресве также продолжается возрастание содержания меди и алюминия, прослеживается увеличение кальция, стронция, церия, железа, мышьяка. Содержание марганца снижается, как и в мате послойно.

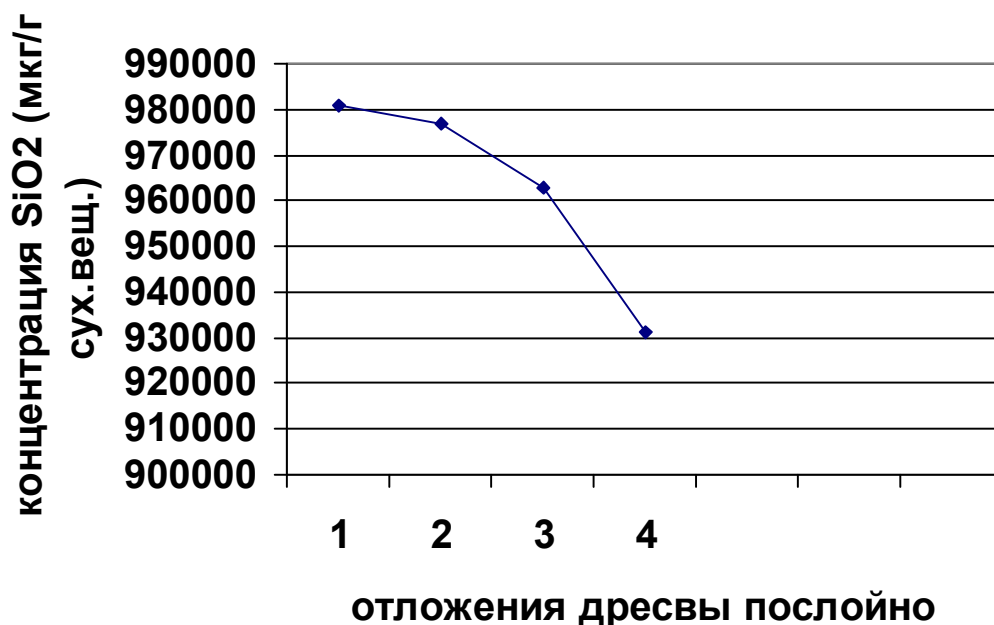


Диаграмма 2. Изменение содержания кремния по слоям в минерализованном отложении «дресва» в 2008 году.

Хром и свинец накапливаются примерно в одинаковых количествах в слоях мата и дресвы и не демонстрируют ясной динамики. Содержание цинка и ванадия повышается только в нижних слоях дресвы и цианобактериального мата.



## ВЫВОДЫ

1. Предварительные результаты геохимического анализа показали наличие явно выраженной зональности как по зонам альгобактериального мата, так и подстилающего кремнистого новообразования - дресвы, переходящей в глинистую породу.
2. С деградацией органического субстрата происходит увеличение минерального вещества, о чем свидетельствует возрастание содержания меди, алюминия, натрия по мере развития этого процесса.
3. Уменьшение концентраций кальция, стронция, бария, церия, фосфора, марганца в мате может объясняться особой ролью этих элементов, которую они играют в жизнедеятельности микроорганизмов или их большей подвижности.
4. Микроорганизмы оказывают активное влияние на формирование специфических биокремнистых пластинчатых отложений.
5. Эта работа послужит основанием для дальнейших геохимических исследований роли термофильных микроорганизмов в формировании минеральных образований.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бонч-Осмоловская Е.А., Горленко В.М., Карпов Г.А., Старыкин Д.А. Анаэробная деструкция органического вещества в цианобактериальных матах ист. Термофильный // Микробиология, 1987. т. 56, С. 1022-1028.
- 2 Герасименко Л.М., Орлеанский В.К. Актуалистическая палеонтология цианобактерий. // Труды Института микробиологии им. С.Н. Виноградского. Вып. XII: Юбилейный сборник к 70-летию Института - М.: Наука. 2004. С.80-108.
- 3 Герасименко Л.М. Актуалистическая палеонтология циано-бактериальных сообществ. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора биологических наук. Москва. 2002. 70 с.
- 4 Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И. Сине-зеленые водоросли. т. 2, М.: «Советская наука», 1953 г.
- 5 Геологический словарь, т. 1, Москва, 1973 г., 239 с.

- 6 Дмитриева А.Г., Кожанова О.Н., Дронина Н.Л. Физиология растительных организмов и роль металлов. – М.: Изд-во Московского университета, 2002. – 160 с.
- 7 Жегалло Е.А., Карпов Г.А., Лупикина Е.Г., Герасименко Л.М., Орлеанский В.К. Суанорфита в гейзеритовых отложениях Камчатки // Альгология 2007, Т.17, № 1, С. 88-92.
- 8 Карпов Г.А., Заварзин Г.А., Ерощев-Щак В.А. Роль биогенного фактора в формировании среды зоны аргиллизации в областях разгрузки современных гидротермальных систем и сольфатарных полей. // Вулканология и сейсмология. 1984, № 2, С. 64-74.
- 9 Карпов Г.А., Лупикина Е.Г., Жегалло Е.А., Орлеанский В.К. Биосилициты – отложения субщелочных вод горячих источников и гейзеров // Материалы 23-х Крашенинниковских чтений, г.Петропавловск-Камчатский, 2006, С. 122 – 127.
- 10 Карпов Г.А., Саенко Г.Н., Макиенко В.Ф., Недозоров А.Н. Концентрирование микроэлементов термофилами горячих источников Узона и Долины Гейзеров на Камчатке. // Вулканология и сейсмология, 1983, №6. С. 40-49.
- 11 Кальдерные микроорганизмы. Под ред. Г.А.Заварзина, М. Наука, 1989, 120 с.
- 12 Орлеанский В.К., Ерощев-Щак В.А., Карпов Г.А., Инкова Т.А., Заварзин Г.А. Слоистые бактериально-водорослевые образования (маты) термальных полей Камчатки. // Известия АН СССР, 1983, №10. С. 126-131.

#### GEOCHEMICAL ACTIVITY OF THERMOPHILIC MICROORGANISMS IN SOME HOT SPRINGS IN KAMCHATKA

*Tembrel E.I.*

*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS*

Considered is the formation mechanism for specific biosiliceous laminar sediments typical only for certain thermal springs. Such springs have been described in Uzon Caldera (Kamchatka). Formation of laminar biosiliceous sediments is controlled by the combination of the following three factors: 1) increased silicon content in the solution; 2) presence of intensively growing algae-bacterial mat; 3) multiple gas outlets over the spring drainage plume. Observed thickness of sedimentary biomineral structures reached about 30cm in the spring operation area.

Described is the influence of algae-bacterial mats upon physical-chemical characteristics of thermal waters and bioaccumulation of certain elements in them. Their migration is traced through the mat's layers with further burial in the sedimentary deposit. The results obtained allow considering cyanobacterial mats of modern thermal springs as active converters of thermal waters and an important factor for biogeochemical migration of elements.

*Key words: blue-green algae (cyanobacteriae), heavy metals, macroelements, bioaccumulation, algae-bacterial mats.*