

УДК 582.232: 551.233

**Е.А. ЖЕГАЛЮ<sup>1</sup>, Г.А. КАРПОВ<sup>2</sup>, Е.Г. ЛУПИКИНА<sup>2</sup>, Л.М. ГЕРАСИМЕНКО<sup>1</sup>,  
В.К. ОРЛЕАНСКИЙ<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Межвузовская лаборатория ПИН – ИНМИРАН,

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 123, Россия

e-mail: orleano@mail.ru

<sup>2</sup>Ин-т вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

683006 Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, 9, Россия

**СУАНОФИТА В ГЕЙЗЕРИТОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КАМЧАТКИ**

При изучении образцов гейзеритов Камчатки с помощью сканирующего электронного микроскопа выявлена разнообразная минерализованная микробиота синезеленых водорослей (*Suaenophyta*), кремневая в экстремальных температурных условиях гидротермальных систем. Термофильные синезеленые водоросли и другая микробиота формируют микроструктуру и текстуру изучаемых образований. Высказано предположение о физиологической активности микробиоты как бактериальной матрицы в процессе осаждения кремния.

*Ключевые слова:* *Suaenophyta*, кремнение, гидротермальные источники, гейзерит.

**Введение**

Кремниевые отложения, слагающие постройки вокруг выходов гейзеров и субщелочных термальных источников, широко распространены в районах проявления современных вулканогенных гидротермальных систем. Российские исследователи называют их гейзеритами (Набоко, 1954; Устинова, 1955; Карпов, 1990). В зарубежных публикациях для их обозначения обычно используются термины: кремнистая накипь, кремнистый туф (*silica sinter*, *silica tuff*), кремнистые отложения (*siliceous deposits*) (Fournier et al., 1992; Takushi et al., 1999). В основном они на 88-90 % состоят из SiO<sub>2</sub>. Потери при прокаливании обычно составляют 5-6 %. Всегда наблюдаются примеси Fe, Ca, Al, реже – K, Na, Mg, As. Макроскопически отмечается их слоистость. Под микроскопом всегда заметна микрослоистость, структурные и текстурные неоднородности. Под электронным микроскопом структурно-текстурные особенности гейзеритов еще более отчетливы. Главная их особенность – наличие кремневых нитей *Suaenophyta*.

На гейзеритовых постройках с температурой порядка 55 °С обычно развиваются колонии термофильных синезеленых водорослей (Кальдерные ..., 1989). Термофильные организмы лучше развиваются в источниках с повышенным содержанием растворенных минеральных веществ, таких как Na, K, Ca, Cl и др., имеющих первостепенное значение для жизни организмов. Кроме того, в горячих источниках обычно наблюдается повышенное, по сравнению с пресноводными, содержание таких элементов, как F, Br, Mn, Mg, Si, Fe, Cu и др. металлов.

Целью данной работы является изучение морфологического разнообразия кремневых микрофоссилий, найденных нами в отложениях гейзеров Камчатки.

© Е.А. Жегалю, Г.А. Карпов, Е.Г. Лупкина, Л.М. Герасименко, В.К. Орлеанский, 2007

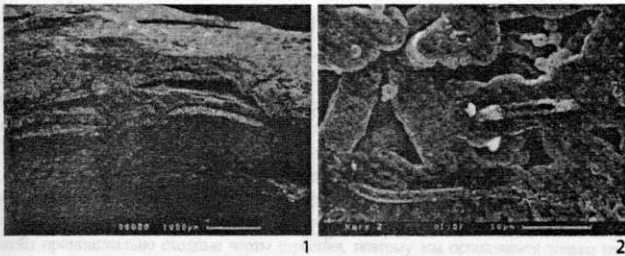
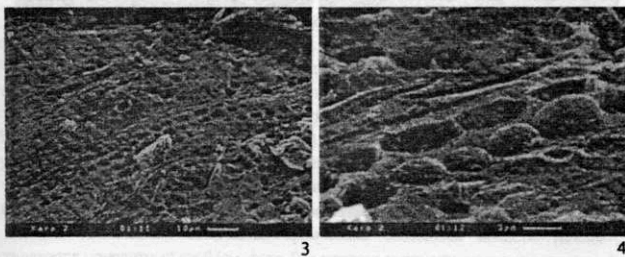


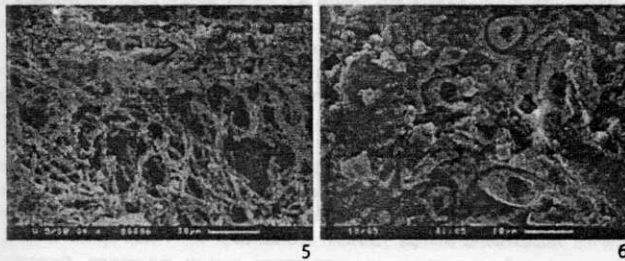
Фото 1 – слоистые гейзерные отложения; 2 – кремневые футляры по нитям водорослей; 3 – монолитный слой кремнезема с нитями синезеленых водорослей; 4 – фрагмент участка 3 (продольный скол); 5 – вертикально стоящие кремневые нитчатые формы рыхлого слоя; 6 – поперечный разлом кремневых осцилляториевых нитей;

#### Рис. 1. Нитчатые формы в осциллятории



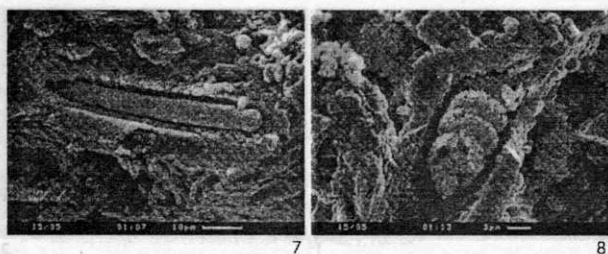
3 – монолитный слой кремнезема с нитями синезеленых водорослей; 4 – фрагмент участка 3 (продольный скол);

#### Рис. 2. Монолитный слой кремнезема по рыхлому слою (см. фото 1) по поперечному разлому

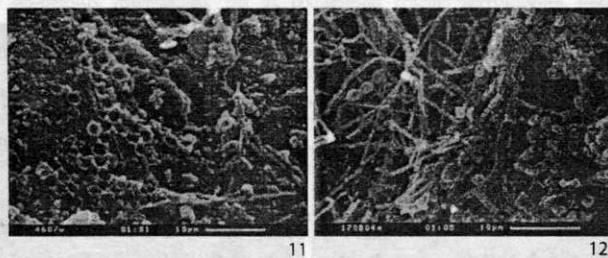
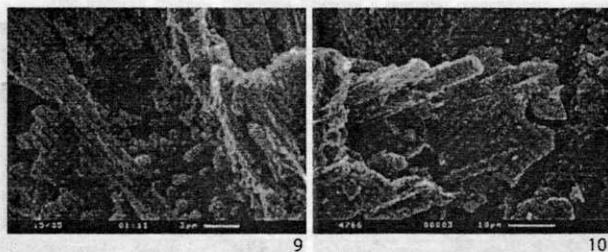


5 – вертикально стоящие кремневые нитчатые формы рыхлого слоя; 6 – поперечный разлом кремневых осцилляториевых нитей;

Фото 1 – слоистые гейзерные отложения; 2 – кремневые футляры по нитям водорослей; 3 – монолитный слой кремнезема с нитями синезеленых водорослей; 4 – фрагмент участка 3 (продольный скол); 5 – вертикально стоящие кремневые нитчатые формы рыхлого слоя; 6 – поперечный разлом кремневых осцилляториевых нитей;



СКОПЛЕНИЯ В ПУЧКАХ ВОЛОСНИКОВ ОТ КОЖУХИ КАРМАТКИ



7 – сохранение и фоссилизация внутреннего содержимого трихома внутри слизистого чехла; 9 – скопление глобул внутри футляров разрушенных нитей; 10 – минерализация пучка нитей синезеленых водорослей; 11 – минерализованные клетки рода *Fischerella* (Born. et Flah.) Gom. (*Mastigocladus laminosus* Cohn); 12 – актиномицетные гифы, оплетающие нити синезеленых водорослей и использующие их как пищевой субстрат.

## Материалы и методы

Во время полевых экспедиционных работ 2004-2005 гг. на Камчатке были отобраны образцы гейзеритов, которые в лабораторных условиях исследовали в Палеонтологическом ин-те РАН с помощью сканирующего электронного микроскопа Cam-Scan-4 с совмещенным микроанализатором (одноплатным спектрометром) Sbs-50m «НПО Юни-Экспорт». Образцы изучали в виде сколов и пластинок 5x10x5 мм.

В данной работе рассматриваются результаты исследований из гейзеритов гейзеров Великан, Щель, Жемчужный, Тройной в Долине Гейзеров и пульсирующих источников Удачный в Долине Гейзеров и «Стенка» в кальдере Академии наук. Все они имеют принципиально сходные черты строения, поэтому мы остановимся только на тех препаратах, которые показали нам наиболее интересными.

## Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, визуальный осмотр отложений гейзеров, как правило, показывает слоистость. При увеличении это особенно заметно (см. фото, 1). Обнаруживаемая слоистость представлена двумя типами слоев: плотными и рыхлыми. Окременная биота присутствует в обоих типах слоев, но в рыхлых, дырчатых слоях она встречается всегда. Нити нитчатых образований из рыхлого слоя довольно сильно облеплены выпавшим кремнеземом (фото, 2). Очевидно, такое осаждение кремния в виде футляров вокруг нитей связано со слизистым покровом самих нитей, а выделяемый клетками экзогенный полисахарид является своеобразной «бактериальной матрицей», способствующей осаждению кремнезема (Герасименко и др., 2004).

С увеличением количества кремнезема свободные полости исчезают и формируется монолитный слой (см. фото 3), а клетки в нитях минерализуются (см. фото, 4, продольный скол).

Механизм образования рыхлых слоев (см. фото, 5), по нашей версии, обусловлен поступлением в какой-то момент меньшего количества кремнезема в коллоидной фазе, которое относительно достаточное, чтобы нити синезеленых водорослей могли находиться в нем во взвешенном или даже вертикально расположенном состоянии. Лабораторные эксперименты показали, что *Cyanophyta* в альгобактериальном мате расположены горизонтально, но в условиях полужидкого агара 0,5-0,8 %, т.е. там, где нитям есть на что опереться, они пронизывают всю толщину агарового слоя. Предполагаем, аналогичная ситуация создается и в природе. Затем этот слой перекрывается другим слоем, видимо, более насыщенным кремнеземом, формируя более монолитный прослой (см. фото, 3). Кремнезем, оставшийся в рыхлом слое, также постепенно кристаллизуется, но в виду его меньшего количества нити остаются относительно голыми.

В поперечном сколе представлена типичная картина окаменевших нитчатых образований, отнесенных нами к осцилляториевым водорослям, обнаруживаемых в термальных источниках (см. фото, 6). Поперечный скол нитей просматривается в виде колец. Просмотр живого материала в полевых условиях, а также в лабораторных экспериментах показал, что содержимое нитей у осцилляториевых может распадаться на отдельные участки и выходить из слизистой оболочки в виде клеток – гормоний. В результате этого процесса остаются полые, пустые оболочки, облепленные силикатным футляром. В отдельных случаях содержимое нити может сохраниться целиком, пропитавшись кремнеземом (см. фото, 7). Содержимое трихома в условиях подсыхания или

минерализации слегка сжимается. Такое сжатие цитоплазмы приводит к тому, что между содержимым клеток и слизистой оболочкой образуется своеобразный ободок пустоты (см. фото, 7, 8). Происходит распад и минерализация содержимого клетки нити (см. фото, 8). Часто в разрушенных футлярах окаменевших нитей отмечается скопление своеобразных глобул (см. фото, 9). Очевидно, эти глобулы (порядка 1 мкм и менее) являются продуктом осаждения кремнезема. Такие глобулы (шарики) практически наблюдаются во всех пустотах. Образование глобул внутри пустого клеточного пространства обнаружено лишь в клетках диаметром более 3 мкм, и чем крупнее клетка, тем больше глобул, а в клетках диаметром 1-2 мкм такого явления не наблюдается. Образование силикатного футляра может происходить не только по единичным нитям, но и по пучку нитей (см. фото, 10).

В гидротермальных источниках Камчатки преимущественно развиваются такие виды *Cyanophyta* рода *Fischerella* (Born. et Flah.) Gom. (*Mastigocladus laminosus* Cohn) с его многочисленными морфологическими формами (пленки, нити, губчатые образования), а также представители родов *Synechococcus* Näg. и *Oscillatoria* Vauch. (Карпов и др., 1983; Кальдерные ..., 1989; Никитина, 2000). В приведенной фото (11) изображена колония, представленная сгруппированными минерализованными округлыми клетками *Fischerella* (*Mastigocladus laminosus*).

Кроме фоссиллизованных нитевидных образований (2-10 мкм), которые, с нашей точки зрения, можно с уверенностью отнести к *Cyanophyta*, в наших образцах постоянно присутствовали ветвящиеся нитевидные формы, которые схожи с низшими грибами и актиномицетами. Ветвистые формы, по размерам сходные с актиномицетами (толщина нитей около 1 мкм), которые оплетают более крупные нити, отнесены нами к осцилляториевым водорослям (фото, 12).

Анализируя полученные данные, следует отметить, что, с одной стороны, микробиота, преимущественно синезеленые в комплексе с грибами и актиномицетами, участвуют в формировании структуры и текстуры гейзеритов в стадии субэвразального осадконакопления. Допускается участие продуктов физиологической деятельности микробиоты в процессе осаждения кремния. Отсутствие в отдельных слоях остатков органики можно объяснить формированием их в неблагоприятных для развития микробиоты условиях (высокая температура, быстрое и активное образование хемогенного гейзерита, сильный поток воды и т. д.). С другой стороны, наличие гифов грибов и актиномицетов можно трактовать как вторичное явление развития этих организмов по разлагающейся водорослевой органике. В термальных источниках имеется богатое разнообразие бактериальной флоры, происходит активный обмен веществ и своя пищевая цепочка (Кальдерные ..., 1989), но визуально коккоидные формы в постмортальном состоянии очень сложно отличить от глобул кремнезема.

Принято считать, что кремний является одним из лучших «вечных фиксаторов» различных биоморфных образований. Известны случаи, когда окремненный организм легко по морфологии сопоставляется и идентифицируется с ныне живущими организмами. К сожалению, в наших образцах определение минерализованных организмов по их остаткам проблематично и приблизительно. Еще более спорным остается вопрос интерпретации коккоидных глобул: продукт ли это живого или чисто хемогенное образование? Некоторые авторы предлагают решать этот вопрос с помощью рентгеновского микроанализа (Мулюкин и др., 2002). Если в анализируемой частице есть пики фосфора, серы, калия, магния то, по мнению этих авторов, это указывает на вероятность биологического происхождения частицы. Частица, лишенная этих элементов, рассматривается ими как абиогенная. В наших препаратах при анализе глобул проявлялись

лишь пики кремния и кальция. Только наличие в препаратах биоморфных нитей позволяет говорить об их биогенной природе и минерализации. Геохимический барьер (резкое падение температуры и давления) в условиях гейзеров и гейзеритовых отложений обуславливает активное осадконакопление и является, по нашему мнению, доминирующим фактором в отложении силиката и создании красивых природных террас и прочих образований со слоистой структурой.

Для уточнения систематического состава субфоссильных синезеленых водорослей и проведения более объективной реконструкции палеообстановки формирования гейзерита необходимо изучить видовой состав существующих ныне ассоциаций альгобактериального сообщества в конкретно рассматриваемой точке наблюдений.

### Заключение

Изучение образцов гейзеритов Камчатки показало:

1. Обилие нитчатых биоформ, принадлежащих представителям *Cyanophyta*.
2. Наличие ветвящихся нитей, схожих с актиномицетной и грибной флорой.
3. Обилие кремневых глобул в виде отдельных шариков (около 1 мкм) как единичных, так и слившихся уже в монолитные слои. Визуальная интерпретация глобул затруднена.

### Благодарности

Авторы благодарят инженеров Палеонтологического ин-та РАН Л.Т. Протасевича и А.В. Кравцова за техническое содействие при изучении образцов. Работа выполнена при финансовой поддержке программ Президиума РАН «Происхождение и эволюция биосферы» и «Молекулярная клеточная биология», гранта CRDF № RUB2 – 10618NO-04, гранта РФФИ 05-04-48008 и Ведущей научной школы № НШ-974.2003.5.

*E.A. Zhigallo<sup>1</sup>, G.A. Karpov<sup>2</sup>, E.G. Lupikina<sup>2</sup>, L.M. Gerasimenko<sup>1</sup> & V.K. Orleanzky<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Interinstitute Laboratory of the Paleontology Institute of RAS,  
123, Profsoyuznaya St., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: orleanor@mail.ru

<sup>2</sup> Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS,  
9, Piypa Boul., 683006 Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia

### CYANOPHYTA IN GEYSERITE DEPOSITS OF KAMCHATKA

In studies of the Kamchatka geyserte specimens by a scanning electron microscope it was possible to reveal various mineralized microbiota of *Cyanophyta*, which was silicified under extreme temperature conditions of hydrothermal systems. Thermophilic blue-green algae and other microbiota form the microstructure and texture of the formations under study. An assumption is advanced about the physiological activity of microbiota as a bacterial matrix in the process of siliceous deposits.

*Key words*: *Cyanophyta*, silicification, hydrothermal springs, geyserte.

- Герасименко Л.М., Сапова Е.В., Орлеанский В.К., Ушатинская Г.Т., Жегалло Е.А., Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. Сидификация цианобактерий в лабораторной культуре // Кварц, кремнезем. – Сыктывкар: Геопринт, 2004. – С. 277-278.
- Кальдерные организмы / Под ред. Г.А. Заварзина. – М.: Наука, 1989. – 120 с.
- 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.
- Мулюкин А.Л., Сорокин В.В., Воробьева Е.А., Сузина Н.Е., Дуда В.И., Гальченко В.Ф., Эль-Регистан И.В. Применение метода рентгеновского микроанализа для выявления и предварительной оценки физиологического состояния микроорганизмов в объектах окружающей среды // Микробиология. – 2002. – 71, вып. 6. – С. 836-848.
- Набоко С.И. Гейзеры Камчатки // Тр. лаб. вулканологии. – 1954. – Вып. 8. – С. 126-209.
- Никитина В.Н. Синезеленые водоросли термальных местобитаний: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – СПб. 2000. – 43 с.
- Устинова Т.И. Камчатские гейзеры. – М.: Гос. изд-во геогр. лит., 1955. – 120 с.
- Fournier R. et al. Yellowstone National Park Field Trip (volcanic, Hydrothermal and Glacial Activity in the Yellowstone Rigion) // 7th Intern. Symp. on Water-Rook Interaction. – Park City, Utah, (USA), July, 1992. – 39 p.
- Karpov G. Das Tal der Geysire Perle Kamchatkas // 36 Urania Universum. – Leipzig, etc.: Urania-Verlag, 1990. – P. 388-395.
- Takushi Yokoyama et al. Siliceous deposits formed from geothermal water in Kynshu, Japan // Distrib. and State of Alujoual. – 1999. – 33. – P. 13-18.

Получена 17.08.06

Подписала в печать А.П. Олыштынская