

УДК 56.01.012:551.71/72+553.31

БАКТЕРИАЛЬНЫЕ ОСТАТКИ В НИЖНЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ КРАСНОЦВЕТНЫХ КВАРЦИТАХ

© 2021 г. **М. М. Астафьева^a, С. Б. Фелицын^b*, Н. А. Алфимова^c****

^aПалеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, Москва, Россия

^bИнститут геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

^cСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: felitsynsergey@gmail.com

**e-mail: n.alfimova@spbu.ru

Поступила в редакцию 16.11.2020 г.

После доработки 20.11.2020 г.

Принята к публикации 20.11.2020 г.

Обнаружение многочисленных бактериальных остатков (включая морфологически сходных с современными железобактериями) в нижнепротерозойских красноцветных кварцитах Карелии — Шокшинского п-ова Онежского озера и о-ва Большой Тюттерс Финского залива — указывает на значительную роль бактериальных сообществ в формировании гематитового пигмента в изученных породах.

Ключевые слова: красноцветные кварциты, Шокша, о-в Большой Тюттерс, нижний/ранний протерозой, гематит, пигмент

DOI: 10.31857/S0031031X21040024

Красноцветные кварцевые песчаники издавна привлекали внимание своими непревзойденными качествами как материала для строительства и облицовки наиболее важных и ценных объектов. Причина — высокие строительные качества и красота. То, что красноцветность этих кварцитов обусловлена железистыми пленками, покрывающими кварц, известно давно и сомнений не вызывает (Туре, Булах, 2017). Но сама природа железистых пленок оставалась неизвестной. Поэтому мы поставили целью своей работы выявление признаков бактериального происхождения гематитового пигмента пленок и сопоставление полученных данных с изотопно-геохимическими сигналами пигмента. Основной задачей исследований явилось обнаружение бактериальных структур в хогландской и шокшинской свитах и в ожелезненных кварцитах (~1.6 млрд лет).

МАТЕРИАЛ

В нашем распоряжении были образцы красноцветных пород (кварцитов) различного возраста из нижнего протерозоя Карелии — Шокшинского п-ова Онежского озера и о-ва Большой Тюттерс Финского залива.

Исторические каменоломни шокшинских кварцитов расположены в Прионежском р-не, на Шокшинском п-ове на Онежском озере в 50 км от Петрозаводска. Географические координаты 61°30' N; 35°03' E. Месторождение приурочено к толще красноцветных пород шокшинской свиты вепся, венчающей разрез нижнего протерозоя Карелии. Кварциты и кварцевые песчаники свиты налегают с размывом на песчаники петрозаводской свиты. Для пород характерен чисто кварцевый состав обломочного материала и широкая фациальная изменчивость (Медведев и др., 2011). Красноцветные отложения шокшинской свиты интродуцированы силлами ропручейского комплекса. Сиенитовые сегрегации габброперидотитов комплекса датированы уран-свинцовым методом по циркону, возраст 1770 ± 12 млн лет (Бибикина и др., 1990), что является верхним пределом для возраста пород шокшинской свиты. Шокшинский кварцит состоит в основном из кварца, сопутствующие минералы халцедон и серицит. Красноцветность (от темно-малинового до серовато-розового цвета) кварцитов вызвана гематитом (Зискинд, 1989; Туре, Булах, 2017). Причем темный малиновый сорт камня настолько красив, что его использовали при создании саркофага Наполеона в Доме Инвалидов в Париже.

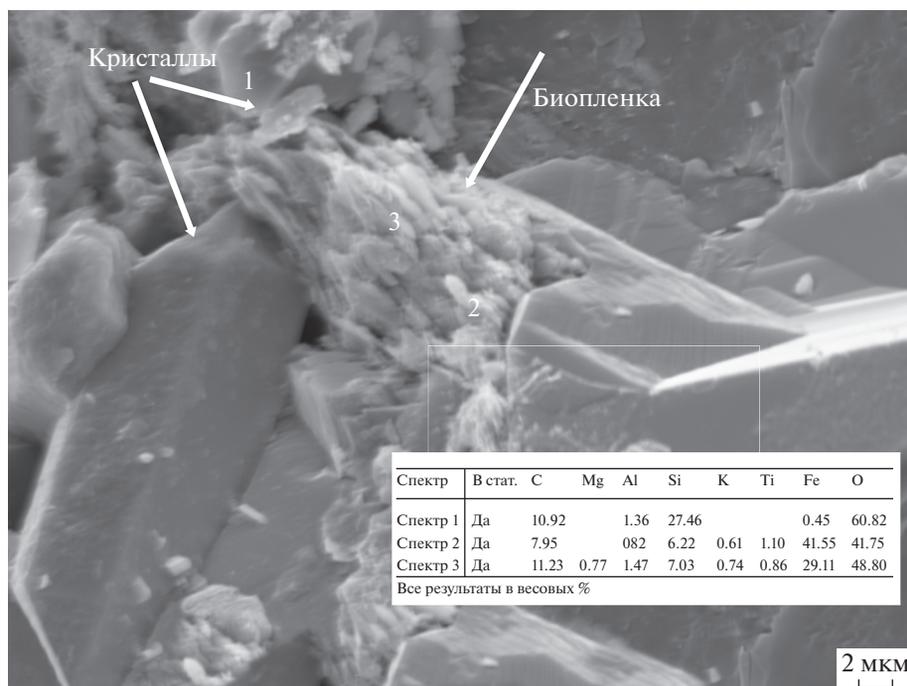


Рис. 1. Кристаллы кварца из образца нижней пачки шокшинской свиты, покрытые биопленкой, и химический анализ. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9182 от 11.04.2019 г. Шокшинский п-ов Онежского озера, ~50 км от Петрозаводска, карьер у пос. Шокша; нижний протерозой, шокшинская свита вепской серии, 1-ая нижняя пачка, 1.65–1.8 млрд лет.

О-в Большой Тютерс находится недалеко от о-ва Гогланд в Финском заливе Балтийского моря. Образцы были отобраны на западном побережье острова. Крупнозернистые кварциты слагают значительную часть обнаженных коренных пород о-ва Б. Тютерс. Эти кварциты считают вторичными, образовавшимися за счет кислотного выщелачивания углекислыми растворами при температуре 375°C подстилающих биотитовых плагиогнейсов (Терехов и др., 2017; Щербакова, Терехов, 2019). Подобные PT условия (330–375°C, 152–210 МПа) свидетельствуют о высокотемпературной фации образования вторичных кварцитов, сформировавшихся на большой глубине. Тогда как прочие кварциты Балтийского щита считаются низкотемпературными образованиями, кристаллизовавшимися в условиях зеленосланцевой фации (Лютеев и др., 2016). Верхний рубеж формирования вторичных кварцитов оценивается как 1.68 млрд лет (Терехов и др., 2017). В некоторых обнажениях кварцитов на о-ве Б. Тютерс наблюдаются признаки ожелезнения в виде близких к изометричным пятен диаметром до 2 м интенсивно мясо-красного цвета в центре, к периферии интенсивность окраски снижается. Образец ПИН РАН происходит из центральной части такого наложенного ожелезнения из обнажения в южной части о-ва Б. Тютерс. Координаты места отбора образца 59°50'20.1" N; 27°11'31.8" E.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку проблема происхождения и условий образования красноцветного пигмента железистых кварцитов представляет значительный интерес, для ее решения были привлечены микрорепалеонтологические, в частности, бактериально-палеонтологические методы исследования. Для изучения были выбраны красноцветные кварциты Шокши и о-ва Тютерс, имеющие, по данным геологов, разное происхождение. Все бактериально-палеонтологические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе системы Zeiss EVO 50 с рентгеновским микроанализатором Inca Oxford (350); TESCAN VEGA II ZMU с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450 и TESCAN VEGA 3. Исследовались только свежие сколы образцов, напыление – золотом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В образцах из **нижней пачки** шокшинской свиты вепской серии кварц представлен чаще всего хорошо оформленными кристаллами (рис. 1), а также округлыми (диаметр менее 100 мкм) и аморфными частицами (рис. 2).

Кристаллы кварца часто покрыты пленкой (рис. 2, 3), в которой иногда можно проследить отдельные нити и кокки, сцементированные

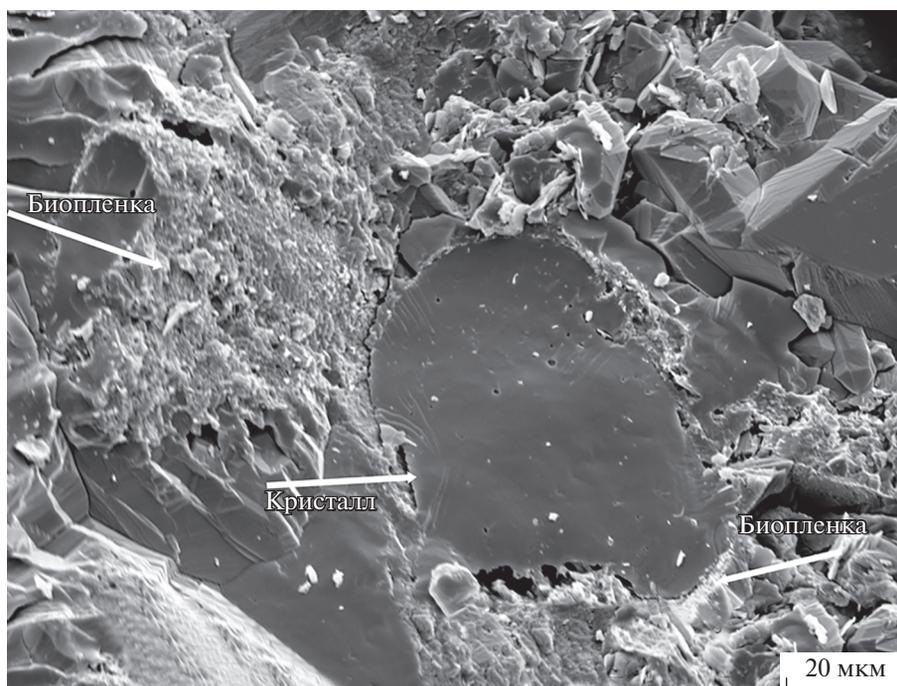


Рис. 2. Зерна кварца из образца нижней пачки шокшинской свиты, покрытые биопленкой. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9250 от 25.04.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 1.

уплотненным гликокаликсом, что дает возможность предположить биогенную природу гематитовых пленок, т.е., считать их биопленками. Иногда биопленки покрывают сразу несколько кристаллов, как бы объединяя их (рис. 4).

Изредка встречаются длинные нитевидные формы диаметром около 1.5 мкм (рис. 5). Однако доказать их инситность невозможно, не исключено, что это более поздние образования. Эта форма напоминает покрытый оксидом железа “стелек” галионеллы – железобактерии, существование которой в раннепротерозойское время сомнений не вызывает, и присутствие подобной формы в железистом красноцветном пигменте только подтверждает нашу гипотезу о биогенном происхождении красноцветного пигмента кварцитов Шокши. Хотя напоминаем, что это, возможно, более позднее засорение.

Химический элементный состав биопленок непостоянен, железо в основном приурочено к биопленкам.

В образцах из **верхней пачки** шокшинской свиты вепской серии кварц представлен крупными окатанными зернами диаметром ≥ 100 мкм (рис. 6), довольно часто покрытыми биопленками. Объединения нескольких кристаллов биопленкой не наблюдалось.

В кварцитах о-ва Тютерс картина принципиально иная. Ни кристаллы, ни крупные окатанные зерна и округло-овальные формы кварца не

встречены. Кроме аморфного (скрытокристаллического) кварца наблюдаются фрагменты пород, практически полностью состоящие из спрессованных биопленок, в которых зачастую превалирует кремний (рис. 7, 8). О том, что эти пленки имеют биогенное происхождение, говорит характер их строения, напоминающий спрессованные коккоидные структуры, сцементированные гликокаликсом.

В образцах с доминированием кремния обнаружена интересная крупная (65×6.5 мкм) форма с довольно толстой и плотной оболочкой (рис. 9). О ее систематическом положении судить не представляется возможным. Однако, судя по размерам (длина >100 мкм, ширина ≈ 15 мкм) и довольно сложному внутреннему строению – предполагаемому наличию толстой стенки, можно предположить ее цианобактериальную или даже эвкариотную природу, или, нельзя исключить, что эта форма является частью какого-то крупного организма.

Железистый пигмент в красноцветных кварцитах о-ва Б. Тютерс также присутствует в виде биопленок. Иногда кажется, что биопленки сложены коккоидными формами, погруженными в гликокаликс. Изредка встречаются и нитевидные формы. Нитевидные формы могут быть широкими (иногда >10 мкм) (рис. 10). Нити могут быть и тонкими, покрытыми чехлом.

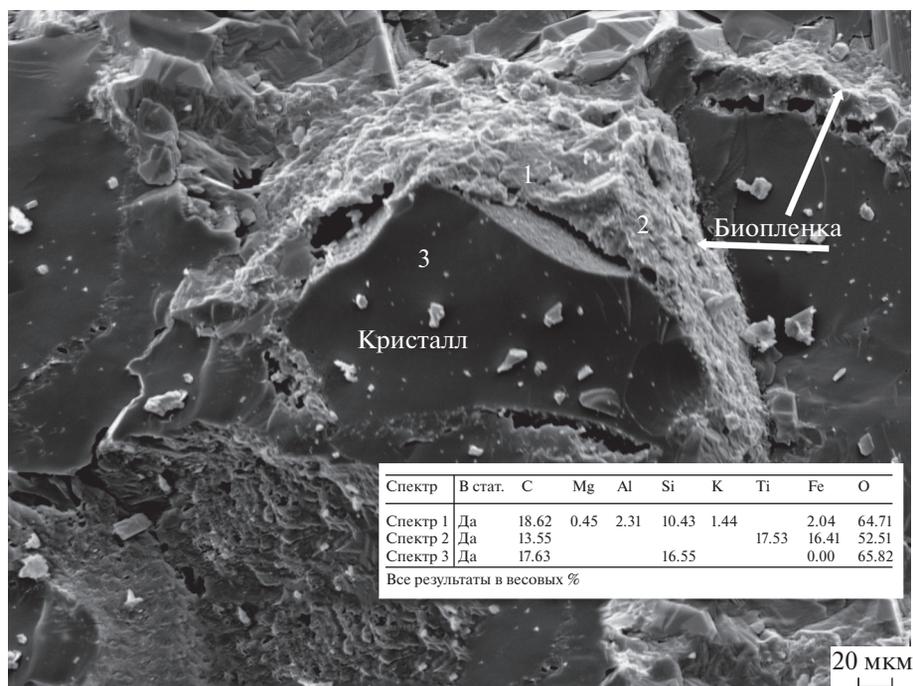


Рис. 3. Обломок кварца, покрытый биопленкой, из образца нижней пачки шокшинской свиты, и химический анализ. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9249 от 25.04.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 1.

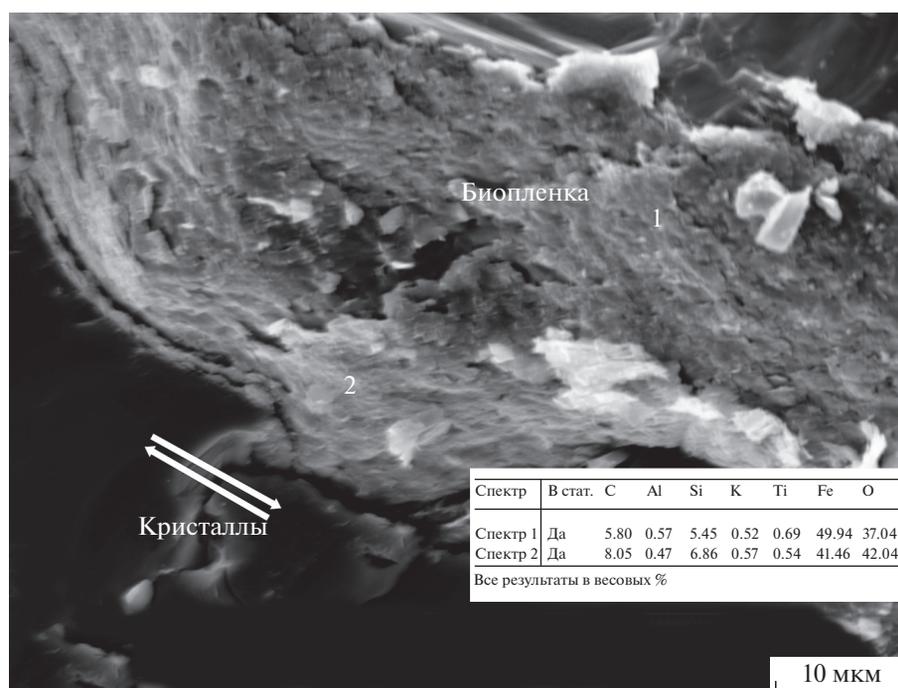


Рис. 4. Обломки минералов, покрытые биопленкой, объединяющей несколько кристаллов из образца нижней пачки шокшинской свиты, и химический анализ. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9187 от 12.04.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 1.

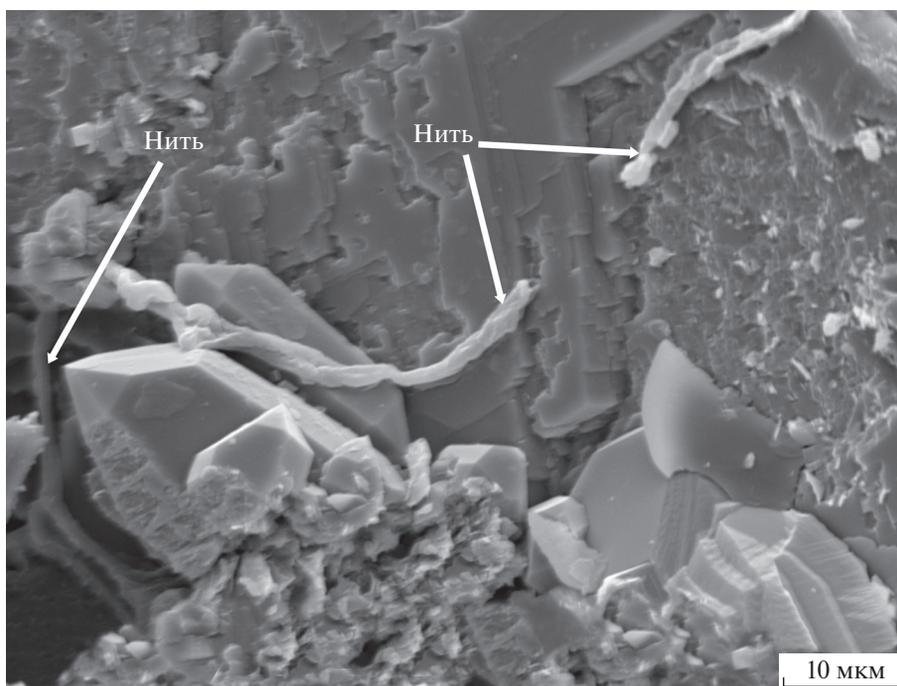


Рис. 5. Нитевидные формы, покрытые оксидами железа, из образца нижней пачки шокшинской свиты. Одна из них разорвана в центральной части и напоминает “стебелек” современных железобактерий *Gallionella* spp. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9164 от 11.04.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По характеру биогенных пленок кварцита Шокши и о-ва Тютерс принципиально отличаются.

На основе взаимоотношения биогенных структур и кварца основной массы красноцветные песчаники шокшинской свиты можно разделить на две группы. Первая группа соответствует нижней пачке шокшинской свиты вепской серии. Кварц в этих кварцитах встречается в виде хорошо оформленных кристаллов размером до 10–20 мкм и их обломков, которые покрыты железистой биопленкой. Причем часто биопленка охватывает сразу несколько кристаллов.

Вторая группа представлена кварцитами верхней пачки шокшинской свиты, где каждое окатанное зерно кварца покрыто биопленкой; объединения кристаллов не наблюдается.

Судя по сохранности кристаллов и зерен кварца и биопленок, их покрывающих, по всей видимости, железистые биопленки Шокши образовались в водной среде непосредственно после образования осадка, и их можно считать практически одновозрастными с процессом седиментации.

Железистые биопленки кварцитов о-ва Тютерс имеют совершенно другой характер. Отдельных зерен или кристаллов кварца, как ни странно, в этих образцах наблюдать не удалось, поскольку кварц присутствует в виде криптокристаллических сливных агрегатов. Железистые биопленки

образуют скопления, не связанные с кристаллами кварца (которых наблюдать не удалось). Вероятно, рекристаллизация и образование железистых биопленок были разорваны во времени, т.е., время образования пигмента определить трудно. Можно сказать лишь, что для образования биопленок необходима водная среда.

Соответственно, можно говорить о биогенности красноцветного пигмента, представленного железистыми биопленками, в красноцветных кварцитах Шокши и кварцитах о-ва Тютерс, хотя способ образования пигмента в разных местонахождениях может различаться.

Соотношение микрофоссилий, биопленок и кварца в изученных образцах полностью соответствует природе изученных кварцитов: осадочные континентальные и/или прибрежные отложения шокшинской свиты резко отличаются от продукта углекислотного метасоматоза — вторичных кварцитов о-ва Б. Тютерс. Шокшинская свита представляет собой классический пример осадочных красноцветных формаций позднего протерозоя (Негруца, 2011) суммарной мощностью до 100 м, тогда как развитые на гранитоидах белые вторичные кварциты о-ва Б. Тютерс имеют мощность не более 20 м (Лютеев и др., 2016; Терехов и др., 2017); участки ожелезнения в них проявлены в виде локальных зон с разной интенсивностью красной пигментации площадью первые м². Подобная форма ожелезнения сливных кварци-

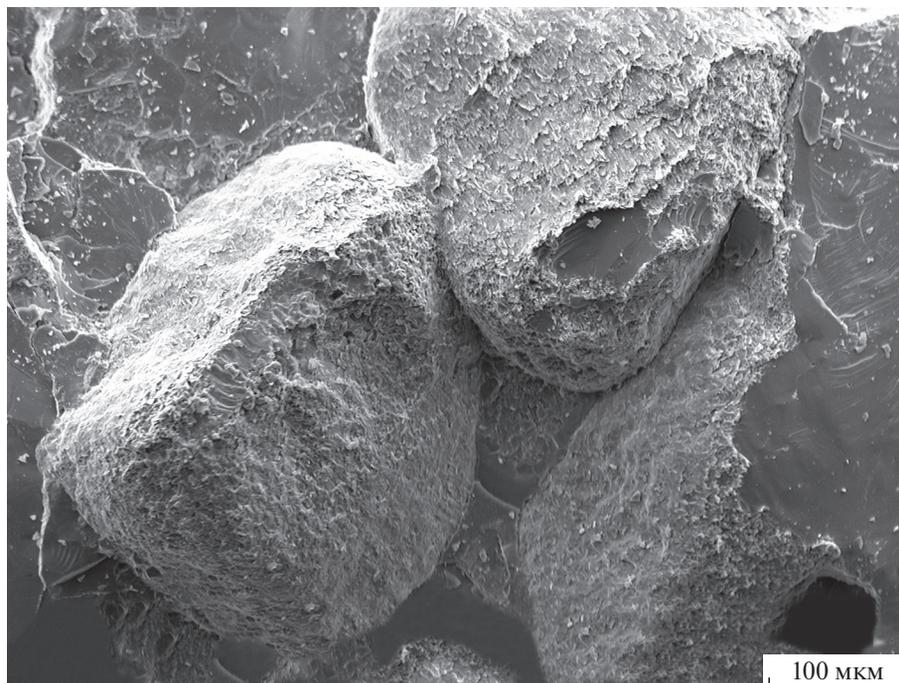


Рис. 6. Крупные окатанные зерна кварца из образца верхней пачки шокшинской свиты, диаметр >100 мкм. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9363 от 30.05.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 1; 3-я пачка шокшинской свиты.

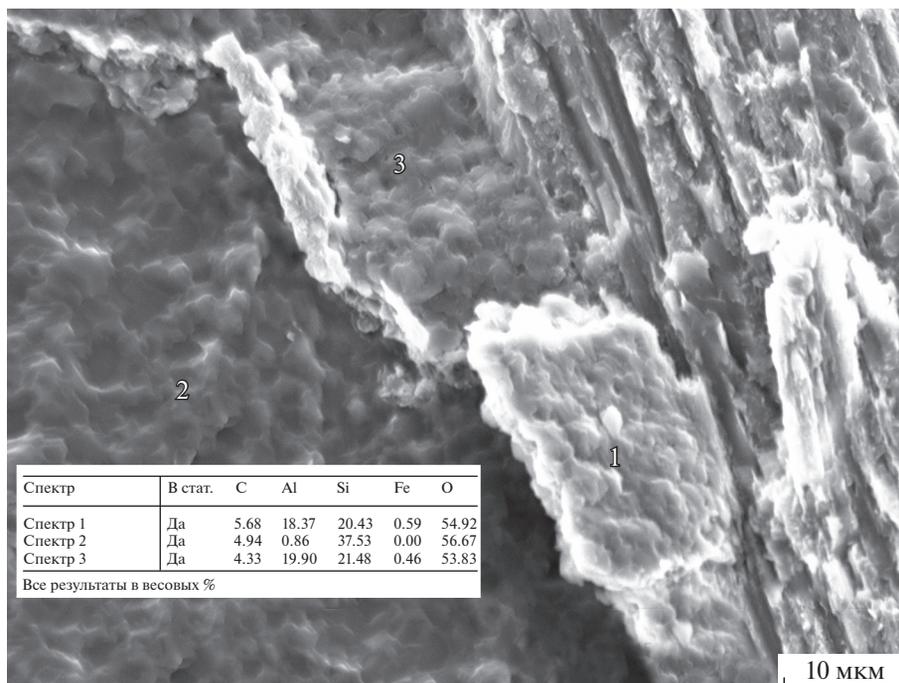


Рис. 7. Биоленки в кварцитах о-ва Тютерс и их химический состав. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9416 от 13.06.2019 г. Зап. побережье о-ва Б. Тютерс; нижний протерозой.

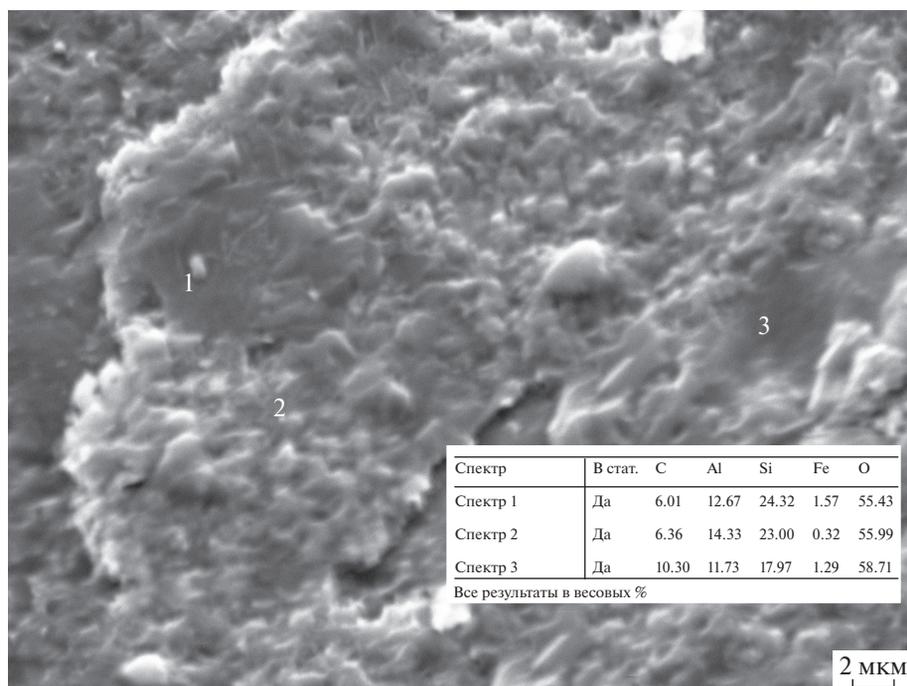


Рис. 8. Био пленки в кварцитах о-ва Тютерс и их химический состав. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9429 от 13.06.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 7.

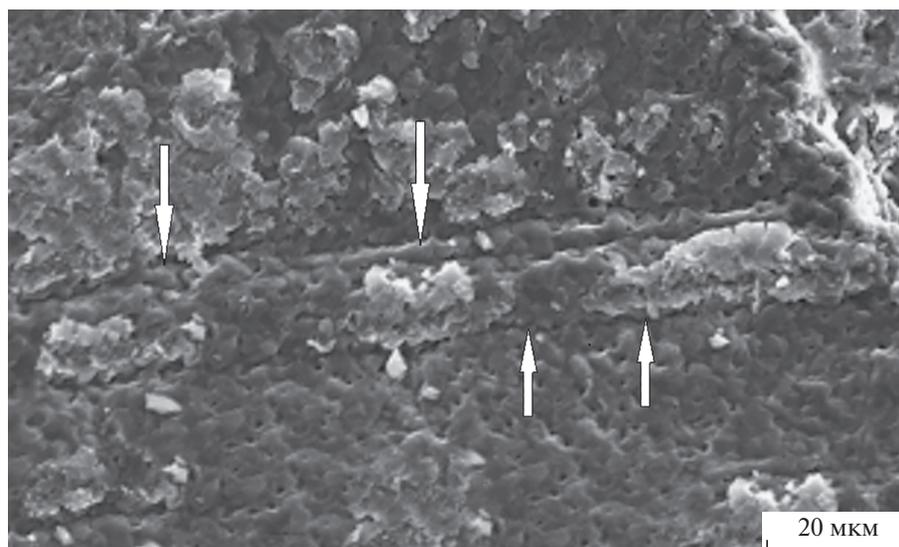


Рис. 9. Крупная форма сложного строения неясного систематического положения (см. стрелки). Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9412 от 13.06.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 7.

тов явно свидетельствует о наложенном характере ожелезнения, установление возраста которого не представляется возможным. В отличие от железненных вторичных кварцитов, гематитовый пигмент кварцитов шокшинской свиты имеет конседиментационную природу, установленную ранее (Голдобина, Михайлова, 1966).

Крайне важным результатом является обнаружение био пленок, облегающих кварц в образцах из нижней пачки шокшинской свиты. Кристаллический кварц регенерационного цемента образован при растворении и рекристаллизации кварца в условиях глубинного катагенеза (Сочава, 1979). Сохранность биоструктур на таких кри-

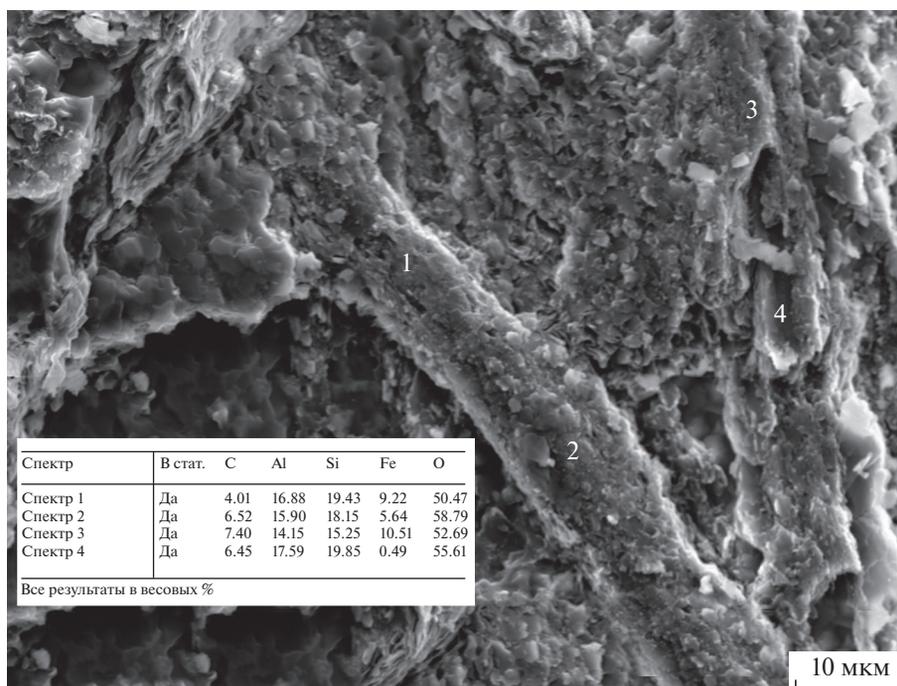


Рис. 10. Широкая нить в кварцитах о-ва Тютерс и химический состав. Изображение на электронном микроскопе ZEISS № 9481 от 20.06.2019 г. Местонахождение и возраст см. рис. 7.

сталлах свидетельствует об устойчивости морфологии объектов биогенного (бактериального) происхождения минералов железа даже в условиях метаморфогенного минералообразования.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- гематитовый пигмент изученных кварцитов имеет биогенное происхождение. В случае шокшинских красноцветов возрастом 1.65–1.8 млрд лет пигмент имеет первичную природу, и наличие биопленок подтверждает гипотезу А. Чухрова (1975) о бактериальном ферригидрите как прекурсоре гематита красноцветных отложений. Находки морфологически сходных с современными железобактериями форм в шокшинских кварцитах однозначно указывают на важную роль этой группы бактерий в формировании гематитового пигмента красноцветов. Время появления гематитового пигмента вторичных кварцитов о-ва Б. Тютерс установить невозможно, но оно явно моложе возраста кварцитов (~1.7 млрд лет).

- различное происхождение кварцевого субстрата, на котором развиты биопленки, определяет характер взаимоотношения кварца и биопленок. В случае шокшинской свиты биопленки облекают зерна песчаной размерности и кристаллический кварц регенерационного цемента. В случае метасоматических кварцитов о-ва Б. Тютерс

биопленки не связаны со сливным криптокристаллическим кварцем.

- биогенные образования сохраняют морфологические признаки их происхождения даже в условиях растворения и рекристаллизации кварца основной массы, что позволяет рассматривать гематитовый пигмент красноцветных отложений в качестве подходящего объекта для бактериальной палеонтологии.

* * *

Авторы признательны всем, кто помогал в проведении этой работы, за обсуждение результатов и ценные советы, особенно Е.А. Жегалло, О.С. Самылиной и Г.Т. Ушатинской, а также Л.В. Зайцевой и Р.А. Ракитову за помощь при работе на электронных сканирующих микроскопах.

Работа выполнена в рамках Госзадания № АААА-А18-118011590190-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бибикова Е.В., Кирнозова Е.И., Лазарев Ю.Н. и др. U-Pb изотопный возраст вепся Карелии // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310. № 1. С. 212–216.

Голдобина Л.П., Михайлюк Е.М. Литогенез иотнийских образований Онежской синеклизы // Проблемы осадочной геологии докембрия. Вып. 1. М.: Недра, 1966. С. 54–60.

- Зискинд М.С.* Декоративно-облицовочные камни. Л.: Недра, 1989. 258 с.
- Лютюев В.П., Терехов В.Н., Макеев А.Б., Лысюк А.Ю.* Первые данные о составе и спектроскопии кварцсодержащих пород острова Большой Тютерс // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. Минералогия, петрография, литология. 2016. № 3. С. 19–27.
- Медведев П.В., Голубев А.И., Куликова В.С.* Вепсий // Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Ред. Л.В. Глушанин, Н.В. Шаров, В.В. Щипцов. Петрозаводск: Карельский науч. центр, 2011. С. 119–123.
- Негруца В.З.* Проблемы стратиграфии нижнего докембрия России (историко-методологический анализ) // Литосфера. 2011. № 1. С. 3–19.
- Сочава А.В.* Красноцветные формации докембрия и фанерозоя. Л.: Наука, 1979. 207 с.
- Терехов Е.Н., Макеев Д.А., Панфилов И.П. и др.* О природе вторичных кварцитов острова Большой Тютерс (Финский залив), Россия // Литосфера. 2017. № 6. С. 34–56.
- Туре Ж., Булах А.Г.* Цветной камень гробницы Наполеона в Париже: искусство, геология, география // Вестн. СПбГУ. Науки о земле. 2017. Т. 62. Вып. 1. С. 20–30.
- Чухров А.Ф.* Проблема образования железистого пигмента красноцветных пород // Гипергенные окислы железа / Ред. Н.В. Петровская. М.: Наука, 1975. С. 126–133.
- Щербакова Т.Ф., Терехов Е.Н.* Геохимия силлиманит-каолиновых метасоматитов острова Большой Тютерс (Финский залив, Россия) // Геохимия. 2019. Т. 64. № 6. С. 605–617.

Bacterial Remains in the Lower Proterozoic Red-Colored Quartzites

M. M. Astafieva¹, S. B. Felitsyn², N. A. Alfimova³

¹*Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

³*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

The discovery of numerous bacterial remains (including those morphologically similar to modern iron oxidizing bacteria) in the lower Proterozoic red-colored quartzites of Karelia – the Shokshinsky Peninsula of the lake Onega and the Bolshoy Tyuters island of the Gulf of Finland indicates a significant role of bacterial communities in the formation of hematite pigment in the studied rocks.

Keywords: red-colored quartzites, Shoksha, Bolshoy Tyuters, lower/early Proterozoic, hematite, pigments