



УДК 55:553.3:550.72

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-2

МИКРОБИАЛЬНОЕ РАЗНООБРАЗИЕ В КРЕМНИСТО-ЖЕЛЕЗИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА: ОБЗОР

Н.Р. Аюпова

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; aypova@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 21.08.2024 г., после доработки 11.10.2024 г., принята к печати 25.10.2024 г.

Аннотация. Палеозойские кремнисто-железистые отложения колчеданосных районов Урала содержат текстурно-структурные признаки, указывающие на роль микроорганизмов при их формировании. Описаны нитчатые, палочковидные, сферические и трубчатые бактериальные формы микронного размера, минерализованные гематитовым, гематит-кремнистым и кремнистым материалом. По морфологии доминируют нитевидные формы. Постоянным спутником бактериоморфных структур являются аутигенные апатит, Mn-кальцит, оксиды титана, иллит и минералы редких земель (фосфаты и карбонаты). Идентификация структур ископаемых бактерий, основанная на размере, форме, реликтам клеточного строения, распределении в колониях и сравнении с аналогичными железистыми отложениями современных гидротермальных систем и колчеданных месторождений других регионов мира, позволяет предположить, что микробиальные структуры представлены минерализованными железобактериями *Leptothrix ochracea* и *Gallionella ferruginea*, коккоидальными формами, сероокисляющими *Thiobacillus Ferrooxidans* и гигантскими *Beggiatoa*-подобными организмами. Эти наблюдения свидетельствуют о бактериальном биокатализе процесса гальмиролиза сульфидов и гиалокластов при формировании железистых отложений.

Ключевые слова: микробиальные структуры, минерализованные биопленки и гликокаликс, кремнисто-железистые отложения, колчеданные месторождения.

Финансирование. Полевые работы проводились в рамках государственного задания по государственной теме № 122031600292-6, минералогические исследования обеспечивались финансированием по проекту РНФ № 22-17-00215.

Благодарности. Автор благодарит к.г.-м.н. О.П. Шиловского за фотографии, полученные с помощью электронного микроскопа.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад автора. Разработка концепции, исследование, аналитические работы, написание черновика рукописи, визуализация, редактирование финального варианта рукописи.

Для цитирования: Аюпова Н.Р. Микробиальное разнообразие в кремнисто-железистых отложениях колчеданных месторождений Урала: обзор. Минералогия, 2024, 10(4), 41–59. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-2.

MICROBIAL DIVERSITY IN SILICEOUS-FERRUGINOUS SEDIMENTARY ROCKS FROM THE URALS MASSIVE SULFIDE DEPOSITS: A REVIEW

N.R. Ayupova

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; aypova@mineralogy.ru*

Received 21.08.2024, revised 11.10.2024, accepted 25.10.2024

Abstract. Paleozoic siliceous-ferruginous oxide sedimentary rocks of the Urals massive sulfide deposits contain well-preserved textural and structural evidence indicating the role of microorganisms in their

formation. Filamentous, rod-shaped, spherical and tubular micron-scale bacterial forms mineralized with hematite, hematite-siliceous and siliceous material are described. The filamentous forms are morphologically dominant. Authigenic apatite, Mn-calcite, Ti oxides, illite and rare earth minerals (phosphates and carbonates) are constantly associated with bacteriomorphic structures. The structures of fossil bacteria based on their size, shape, cell division, distribution in colonies and comparison with ferruginous sediments of modern hydrothermal systems and massive sulfide deposits worldwide indicate that they correspond to mineralized stalks of iron bacteria *Leptothrix ochracea* and *Gallionella ferruginea*, coccoidal forms and sulfur-oxidizing *Thiobacillus ferrooxidans* and giant *Beggiatoa*-like organisms. These observations indicate bacterial biocatalysis in the processes of halmyrolysis of sulfides and hyaloclasts during the formation of iron oxide deposits.

Keywords: microbial structures, mineralized biofilms and glycocalyx, ferruginous oxide sedimentary rocks, massive sulfide deposits.

Funding. Field trips were conducted in frame of state contract no. 122031600292-6. The mineralogical study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-17-00215).

Acknowledgements. The author is grateful to the Candidate of Geological–Mineralogical sciences O.P. Shilovsky for SEM images.

Conflict of interest. The author declare that she has no conflicts of interest.

Author contribution. Conceptualization, investigation, analytical works, writing – original draft, visualization, writing – review & editing.

For citation: Ayupova N.R. Microbial diversity in siliceous-ferruginous sedimentary rocks from the Urals massive sulfide deposits: a review. *Mineralogy*, 2024, 10(4), 41–59. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-2

ВВЕДЕНИЕ

Классические примеры древних кремнисто-железистых (Si-Fe) отложений, широко распространенных в вулканогенно-осадочных толщах колчеданосных районов, связаны с месторождениями Куроко в Японии (Kalogeropoulos, Scott, 1983), зеленокаменного пояса Абитибби в Канаде (Kalogeropoulos, Scott, 1989), Кипра (Constantinou, Govett, 1973; Robertson, Boyle, 1983; Herzig et al., 1991), Австралии (Duhig et al., 1992; Davidson et al., 2001), Урала (Масленников, 1999; Зайков, 2006; Maslennikov et al., 2012) и Понтид (Revan et al., 2019). Si-Fe отложения также широко представлены в гидротермальных рудопроявлениях Мирового океана (Juniper, Fouquet, 1988; Alt, 1988; Herzig et al., 1991; Hekinian et al., 1993; Hannington et al., 1998; Alt, Mata, 2000; Hein et al., 2008; Dekov et al., 2010; Maslennikov et al., 2023).

Различными авторами эти отложения трактовались как: (1) проксимальные отложения плавучих гидротермальных плюмов (Lupton et al., 1985; Grenne, Slack, 2003); (2) эксгалиты – отложения низкотемпературных (20–100 °С) одновременных или поздних по отношению к рудообразованию гидротермальных флюидов (Kalogeropoulos, Scott, 1989; Зайкова, 1991; Binns et al., 1993; Hekinian et al., 1993; Boyd, Scott, 2001; Davidson et al., 2001;

Kennedy et al., 2003; Slack et al., 2003; Hein et al., 2008; Dekov et al., 2010); (3) продукты субмаринного окисления колчеданных руд (Robertson, Boyle, 1983; Herzig et al., 1991; Масленников, Зайков, 1991; Goodfellow, Franklin, 1993; Mills, Elderfield, 1995; Hannington et al., 1998) или гальмиролиза сульфидных руд и смешивающихся с ними фоновых гиалокластических и карбонатных осадков (Maslennikov et al., 2012). Причина многообразия мнений о генетической природе железоксидной минерализации в колчеданосных районах связана с тем, что они значительно различаются между собой по облику, минеральному составу, геохимии, положению в разрезе относительно залежей сульфидных руд и пространственно-возрастным соотношениям с рудами.

Несмотря на существование различных точек зрения на происхождение, исследователи отмечают важную роль микробиоты в образовании как древних (Duhig et al., 1992; Little et al., 2004; Slack et al., 2003; Grenne, Slack, 2005; Ayupova et al., 2017), так и современных Si-Fe образований (Juniper, Fouquet, 1988; Binns et al., 1993; Halbach et al., 2001; Hein et al., 2008; Dekov et al., 2010) (таблица). В этой работе рассмотрены морфологические типы бактериоморфных структур как свидетельства участия микробиоты в формировании Si-Fe отложений на колчеданных месторождениях Урала.

Таблица

Бактериоморфные структуры в окисдно-железистых отложениях современных и древних гидротермальных систем

Table

Bacteriomorphic structures in ferruginous-siliceous rocks of modern and ancient hydrothermal systems

Местоположение	Породы	Бактериоморфные структуры	Литература
Атлантический океан			
Сегмент FAMOUS (36°57' с.ш., 33°17' з.д.)	Окси-гидроксиды железа	Сгруппированные ветвящиеся нити	Juniper, Fouquet, 1988
Поле TAG (26°08' с.ш., 44°49' з.д.)	Кремнеземистые железистые осадки	Нитевидные клеточные массы, цепочки наносфер	Al-Hanbali et al. 2001
Поле Лилипут (09°33' ю.ш.)	Fe-Si отложения	От сферических (диаметр 1–2 мкм) до паутинных и сегчатых нитевидные, инкрустированных Fe-Si оксигидроксидами, <i>Thiomicrospira</i> spp. и <i>Epsilonproteobacteria</i>	Petner et al., 2007; Dekov et al., 2010
Вулкан Санторини, Средиземное море (36°23' с.ш., 25°27' в.д.)	Оксигидроксидные кремнисто-железистые	Чехлы, скрученные нити (<i>Gallionella ferruginea</i>)	Holm, 1987; Hanert, 2002
Тихий океан			
Поле Философер (Philosopher Vent), хребет Эксплорер (49°55' ю.ш., 129°32' з.д.)	Аморфный кремнезем и оксигидроксиды железа	Гифоподобные нитевидные, разветвленные нити, тонкие полые нити (диаметр 1–2 мкм)	Juniper, Fouquet, 1988
Волшебная гора (Magic Mountain), хребет Эксплорер (49°72' ю.ш., 130°32' з.д.)	Кремнезем и обогащенные Mn оксигидроксиды железа	Грубые линейные нити, образующие цепочки	Fortin et al., 1998
Гаалапагосский рифт (00°85' з.д.)	Нонтронит	Нити, трубки, чехлы	Köhler et al., 1994
Гора Лоихи, Гавайские острова (18°02' с.ш., 155.27 з.д.)	Железистые отложения	Чехлы, скрученные нити, бактериальные маты	Emerson, Moyer, 2002
Гавайские острова (19°72' с.ш., 155°08')	Гиалокластиты	Следы бактериальной деятельности (Streptococci)	Fisk et al., 2003
Восточно-Тихоокеанское поднятие, поле 21°30' с.ш., 114°30'	Фрагменты неактивной оксидной трубы	Тонкие полые нити	Juniper, Fouquet, 1988
Восточно-Тихоокеанское поднятие, подводная гора 5 (13°00' с.ш., 103°50')	Аморфные оксигидроксиды железа и нонтронит	Скрученные нити	Alt, 1988
подводная гора Франклин, бассейн Вудларк (09°54' ю.ш., 151°50' в.д.)	Fe-Si-Mn-оксигидроксидные	Ветвистые, пучковые, переплетенные нити (<i>Galionella</i>)	Binns et al., 1993; Boyd, Scott, 2001; Богданов и др., 2006

Продолжение таблицы

Местоположение	Породы	Бактериоморфные структуры	Литература
Подводная гора Осевая (Axial seamount), хребет Хуан де Фука (45°95' с.ш., 130° 00' з.д.)	Оксигидроксиды железа	Спирали, скрученные нити <i>L. ochraceasheaths</i> , <i>G. ferruginea stalks</i> (G), PV-1 filaments (P)	Kennedy et al., 2003
Сегмент Миддл Вэллей (Middle Valley), хребет Хуан де Фука (48°27' с.ш., 128°41' в.д.)	Сульфидные отложения с примесью оксигидроксидов железа	Скрученные, дендритовидные, прямые нитевидные пучки, плетения нитей	Edwards et al., 2003
Зона разлома Бланко (44° 13' с.ш., 139.38 з.д.)	Металлоносные и кремнеземисто-гемапитовые отложения	Разветвленные и стреловидные гематит-кремнистые нити	Hein et al., 2008
Марианский трог (18°00' с.ш., 144 в.д.)	Нонtronитовые отложения	Нити, трубки, чехлы	Köhler et al., 1994
Гидротермальное поле Пакманус (03°43' ю.ш., 151° 40' в.д.)	Fe-Si осадки	Стержневидные нити (<i>Lerthothrix ochracea</i>), нити дендритовой структуры, скрученные нити с полым отверстием	Yang et al., 2015
Впадина Кориолис (Corgolis), бассейн Вануату (17°50' ю.ш., 168° 40' в.д.)	Fe-Si оксигидроксиды	Нитевидные паутинообразные сети, полые трубки	Iizasa et al. 1998
Индийский океан			
Поле МЕЗО (MESO), Центрально-Индийский хребет (23° 23' ю.ш., 69°14' в.д.)	Яшмы	Нити дендритовой структуры	Halbach et al., 2001
Колчеданные месторождения на континентах			
Месторождение Фигероа, США (34°42' с. ш. 119°69' з. д.)	Кремнисто-железистые отложения (яшмы)	Разветвленные нитевидные структуры	Little et al., 2004
Месторождение Таланга (Thalanga), Австралия (20° 20' ю.ш., 145° 46' в.д.)	Кремнисто-железистые эжгалиты	Сети гематитовых нитей (диаметр 2–5 мкм, длина 100 мкм) цилиндрического и эллипсоидального сечения из гематитовых пластинок и гранул	Duhig et al., 1992

Местоположение	Породы	Бактериоморфные структуры	Литература
Месторождения Леккен (Løkken) (63°42' с.ш., 10°39' в.д.) и Хейдал (Høydal) (68°56' с.ш., 15°03' в.д.), Норвегия	Слоистые гематит-кремнистые породы	Прямые или изогнутые цепочки гематитовых нитей (диаметр 3–10 мкм, длина 20–100 мкм); разветвленные сети толщиной 15–25 мкм, трубчатые структуры, окруженные криптокристаллическим гематитом и заполненные кварцем; сферические формы (до 10 мкм)	Grenne, Slack, 2005
Месторождение Балд Маунтин (Bald Mountain), США (39°46' с.ш., 115°31' з.д.)	Железисто-кремнистые породы над сульфидными рудами (сфалерит-пиритовыми)	Гематитовые нити	Slack et al., 2003
Железорудный пояс Лабрадор, Канада (49°45'–55°15' с.ш., 67°15'–67°30' з.д.)	Железисто-кремнистая формация	Нитевидные	

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы для исследования кремнисто-железистых отложений отобраны на колчеданных месторождениях Урала, главным образом, на месторождениях Узельгинского (Талганское, им. XIX Партсъезда, Узельгинское, Молодежное, Чебачье), Александринского (Александринское, Бабарыкинское), Учалинского (Учалинское, Ново-Учалинское), Сибайского (Сибайское), Медногорского (Яман-Касинское, Блявинское), Бурибайского (Юбилейное) и Ивдельского (Шемурское, Ново-Шемурское) рудных районов (рис. 1).

Морфология, особенности внутреннего строения и минеральный состав исследовались с использованием микроскопа Olympus BX51 в отраженном свете в Институте минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс). Большинство фотографий получено в темнопольном изображении. Текстуристый, морфометрический и элементный состав микрофоссилий определен также в свежих сколах пород с применением растрового электронного микроскопа AURIGA CrossBeam, оснащенного системой INCA X-MAX EDS, в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета (г. Казань). СЭМ анализ проводился с использованием электронного пучка длиной 1 мкм, тока пучка 15 нА, ускоряющего напряжения 20 кВ и времени счета 120 с для каждой точки. Для сопоставления полученных результатов привлечены материалы по железистым отложениям гидротермальных полей Мирового океана и некоторых колчеданных месторождений мира.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОКСИДНО-ЖЕЛЕЗИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Кремнисто-железистые отложения на колчеданных месторождениях Урала встречаются на разных литостратиграфических уровнях: либо в базальтовых или дацитовых лаво-гиалокластитах, либо в ассоциации с колчеданными рудными телами, залегающая непосредственно на рудах или в виде переслаивания с сульфидными турбидитами и хлоритизированными гиалокластитами на флангах месторождений. Они характеризуются широким спектром текстурно-структурных и минеральных разновидностей из-за разного соотношения в составе исходного сульфидного, гиалокластического



Рис. 1. Схема размещения кремнисто-железистых отложений в колчеданосных районах Урала (Maslennikov et al., 2012).

Рудные районы: 1 – Ивдельский, 2 – Карпинский, 3 – Кабанский, 4 – Красноуральский, 5 – Кировградский, 6 – Дегтярский, 7 – Маукский, 8 – Ивановский, 9 – Ишкининский, 10 – Медногорский, 11 – Верхне-Пышминский, 12 – Карабашский, 13 – Миасский, 14 – Учалинский, 15 – Узельгинский, 16 – Александринский, 17 – Сибайский, 18 – Баймакский, 19 – Подольский, 20 – Бурибайский, 21 – Гайский, 22 – Теренсайский, 23 – Ашебутакский, 24 – Домбаровский, 25 – Режевской, 26 – Кунашакский, 27 – Амурский, 28 – Айдырлинский, 29 – Среднеорский, 30 – Верхнеорский, 31 – Берчогурский

Fig. 1. Scheme of distributions of siliceous-ferruginous sedimentary rocks in massive sulfide regions of the Urals (Maslennikov et al., 2012).

Ore regions: 1 – Ivdel, 2 – Karpinsk, 3 – Kaban, 4 – Krasnouralsk, 5 – Kirovgrad, 6 – Degtyarsk, 7 – Mauk, 8 – Ivanovka, 9 – Ishkinino, 10 – Mednogorsk, 11 – Verkhnyaya Pyshma, 12 – Karabash, 13 – Miass, 14 – Uchaly, 15 – Mezhozerny, 16 – Aleksandrinka, 17 – Sibay, 18 – Baymak, 19 – Podol, 20 – Buribay, 21 – Gay, 22 – Terensay, 23 – Ashchebutak, 24 – Dombarovka, 25 – Rezh, 26 – Kunashak, 27 – Amur, 28 – Aydyrlya, 29 – Sredneorsk, 30 – Verkhneorsk, 31 – Berchogur.

и карбонатного материала (Maslennikov et al., 2012). Выделены две генетические разновидности пород: госсаниты – продукты окисления сульфидных руд и джаспериты – продукты гальмиролиза гиалокластических отложений (Масленников, 1999). В случае накопления марганца в их составе на некоторых месторождениях (например, Талганское, им. XIX Партсъезда, Узельгинское) выделяются марганецсодержащие разновидности – умбриты (Аюпова, Масленников, 2005). Основные минералогические и геохимические характеристики выделенных пород описаны в работах (Масленников, 1999; Аюпова, Масленников, 2005; Зайков, 2006; Масленников, Аюпова, 2007; Maslennikov et al., 2012).

Джаспериты – это оранжево-красные гематит-кварцевые породы микробрекчиевидной текстуры с признаками замещения гиалокластов

гематит-кварцевыми агрегатами (Масленников, 1999; Аюпова, Масленников, 2005). В некоторых образцах джаспериты демонстрируют массивные брекчиевидные текстуры с характерной грубой сортировкой гематитизированного обломочного материала. В типичных джасперитах порода целиком сложена фрагментами тонкозернистых гематит-кварцевых агрегатов, сцементированных кварцем (80–95 об. % кварца и 5–15 об. % гематита), редко в их составе наблюдаются реликтовые обособления хлорита в ассоциации с включениями анатаза и фосфатов РЗЭ, а в основной массе присутствуют карбонатные минералы (Maslennikov et al., 2012; Аюпова и др., 2022). Джаспериты встречаются на колчеданных месторождениях в виде пластов, прослоев и согласных линз среди базальтовых и/или риодацитовых гиало-лавокластитов.

Госсаниты – литифицированные аналоги современных госсанов, описанных на океанических гидротермальных полях (Масленников, 1999; Зайков, 2006; Масленников, Аюпова, 2007; Maslennikov et al., 2012). Госсаниты имеют пурпурно-красный цвет и состоят из окисленных обломочных сульфидов и смешанных с ними хлоритизированных и/или гематитизированных гиалокластов и карбонатов в разных пропорциях. В госсанитах обычно встречаются аутигенные пирит, сфалерит и халькопирит в ассоциации с редкими теллуридами Hg, Au и Ag, сульфидами Cu и Ag, селенидами, висмутидами и самородным золотом (Аюпова и др., 2017; Maslennikov et al., 2019). Слои госсанитов (1–10 мм до 50–60 см) перекрывают обломочные сульфидные руды или переслаиваются с сульфидными турбидитами и хлоритизированными гиалокластитами, образуя ореол рассеяния вокруг разрушенных сульфидных холмов.

Выделенные разновидности пород могут быть использованы для поисков колчеданного оруденения. Очевидно, поисковая значимость каждого из них различна. Джаспериты, связанные с процессами гальмиролиза гиалокластических отложений, для накопления которых нужно значительное время, могут фиксировать длительные перерывы в вулканизме, благоприятные для формирования колчеданных руд, и таким образом, наличие этих пород является признаком потенциально рудоносного уровня. Госсаниты – железоксидные проявления, сформированные при подводном окислении сульфидов, являются локальным поисковым признаком, свидетельствующем о непосредственной близости сульфидных руд.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Микрофоссилии в аншлифах кремнисто-железистых пород идентифицируются по морфологии и четким контурам в гематит-кварцевой матрице. Они встречаются как в ассоциации с сульфидами и гематитовыми/гематит-кварцевыми псевдоморфозами по сульфидам, так и в различной степени преобразованными в гематит-кварцевые агрегаты гиалокластами. Выделено несколько морфологических разновидностей бактериоморфных структур: нитчатые, палочковидные, сферические и трубчатые. Сохранность различных микрообъектов сильно отличается не только в различных слоях породы, но также и в пределах одного слоя на небольшом расстоянии друг от друга.

Нитчатые бактериоморфные структуры представляют собой плавно изгибающиеся, ветвящиеся, а также собранные в пучки и сети «нити» гематитового или гематит-кварцевого состава, которые встречаются в определенных участках породы или слагают слойки (рис. 2). Такие структуры могут быть обнаружены как в джасперитах, так и в госсанитах. В некоторых случаях они уплощаются, деформируются до неузнаваемости, сливаясь с основной массой породы и присутствуют в виде разорванных фрагментов. Тонкие гематитовые нити (диаметр 1–3 мкм) хаотично ориентированы, состоят из тончайших гранул гематита (рис. 2а). Под большим увеличением нитевидные формы часто имеют закрученное строение (рис. 2б). Более крупные гематитовые нити с реликтовым клеточным строением представляет собой короткие параллельные сегментированные раздвоенные пучки гематита (длина 40–60 мкм, толщина 5–7 мкм), направленные перпендикулярно к слоистости и образующие гематитовые прослои мощностью до 100 мкм (рис. 2в). Широко распространены дендритовидные формы, состоящие из разветвленных гематит-кварцевых нитей (диаметр 10–20 мкм) с редкими включениями анатаза, которые образуют когерентные веера диаметром до 1–2 мм (рис. 2г). Обычно такие нити состоят из округлых или продолговатых клеточных форм, соединенных друг с другом, образуя цепочку (рис. 2д, е). Особой разновидностью являются нитевидные структуры, где клетки друг от друга отделены явно выраженной клеточной оболочкой (рис. 2ж) или нити, состоящие из клеток, целиком окруженные толстым (толщина до 5–7 мкм) прозрачным чехлом (био пленкой) с тоненькой железистой каймой (рис. 2з), а также следы фоссилизованного гликокаликса в виде бугорчатой поверхности (рис. 2и). Спутанно-гематит-кварцевые нитевидные структуры нередко ассоциируют с ожелезненными гиалокластами.

Короткие палочковидные формы в виде самостоятельных изогнутых образований (иногда заметно небольшое утолщение на одном конце) в госсанитах распределены хаотично и обычно ассоциируют с гематит-кварцевыми псевдоморфозами по сульфидным обломкам (рис. 3а). Встречаются гранулы гематит-кварцевого состава (размер 1 мкм), располагающиеся в виде коротких цепочек, объединенных единым чехлом (рис. 3б). В краевой части гематитизированных гиалокластах отмечены изогнутые цепочки (длина до 100 мкм) из пластинок гематита (размер 3–5 мкм), занимающих строго

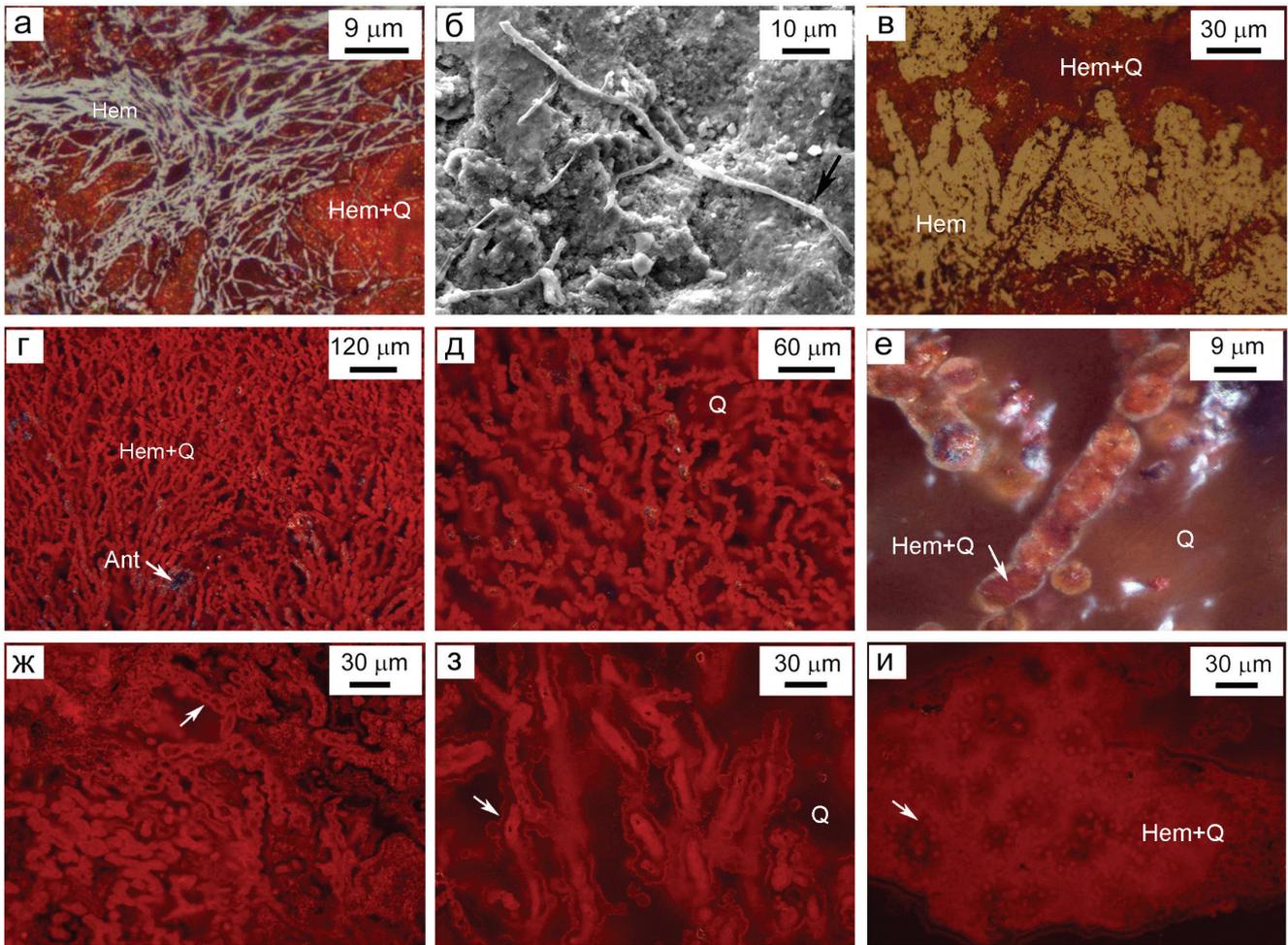


Рис. 2. Разнообразие минерализованных нитчатых бактериоморфных форм: а – тонкие переплетающиеся гематитовые (Hem) нити в гематит-кварцевой (Hem+Q) основной массе; б – сломанные закрученные гематитовые бактериальные нити на сколе образца; в – короткие раздвоенные гематитовые пучки, образующие слои; г, д – веерообразные гематит-кварцевые структуры с клеточным строением нитей и включениями анатаза (Ant) в кремнистой массе (Q); е – продольный срез фрагмента гематит-кварцевой нити внутри тонкого слизистого чехла в кварцевой основной массе; ж – закрученные гематит-кварцевые нити с клеточным строением; з – минерализованная биопленка вокруг нитевидных форм с полым отверстием; и – фоссилизованный гликокаликс.

Фото а, в–и – отраженный свет (г–и – темнопольное изображение), б – СЭМ фото.

Fig. 2. Diversity of mineralized filamentous bacteriomorphic forms: а – thin intertwined hematite (Hem) threads on hematite-quartz (Hem+Q) mass; б – broken twisted bacterial threads on a sample chip; в – short bifurcated hematite bundles forming independent layers; г, д – fan-shaped hematite-quartz structures with cellular threads containing anatase (Ant) inclusions enclosed in siliceous (Q) material; е – longitudinal section of a hematite-quartz thread fragment inside a thin mucous sheath; ж – twisted threads with a cellular structure; з – mineralized biofilm around threads with a hole; и – fossilized glycolyx.

Images а, в–и – reflected light (г–и – dark-field image), б – SEM image.

фиксированное положение относительно друг друга (рис. 3в). В большинстве случаев для гематит-кварцевых псевдоморфоз по гиалокластам характерны следы бактериальной жизнедеятельности в виде минерализованных туннельных полостей (рис. 3г–е). Наблюдается ассоциация с бактериоморфными структурами включений апатита, иллита, анатаза или рутила и бастнезита в основной массе породы.

Сферические структуры обнаружены в виде глобул, образующих скопления различной конфигурации (микрочлонины) с четкими контурами в бесструктурной прозрачной массе в джасперитах (рис. 4а). Глобулы внутри колонии имеют стандартный диаметр (10–15 мкм) гематит-кремнистый или гематитовый состав (рис. 4б), ворсинчатую, иногда ямчатую поверхность (рис. 4в) и сложены

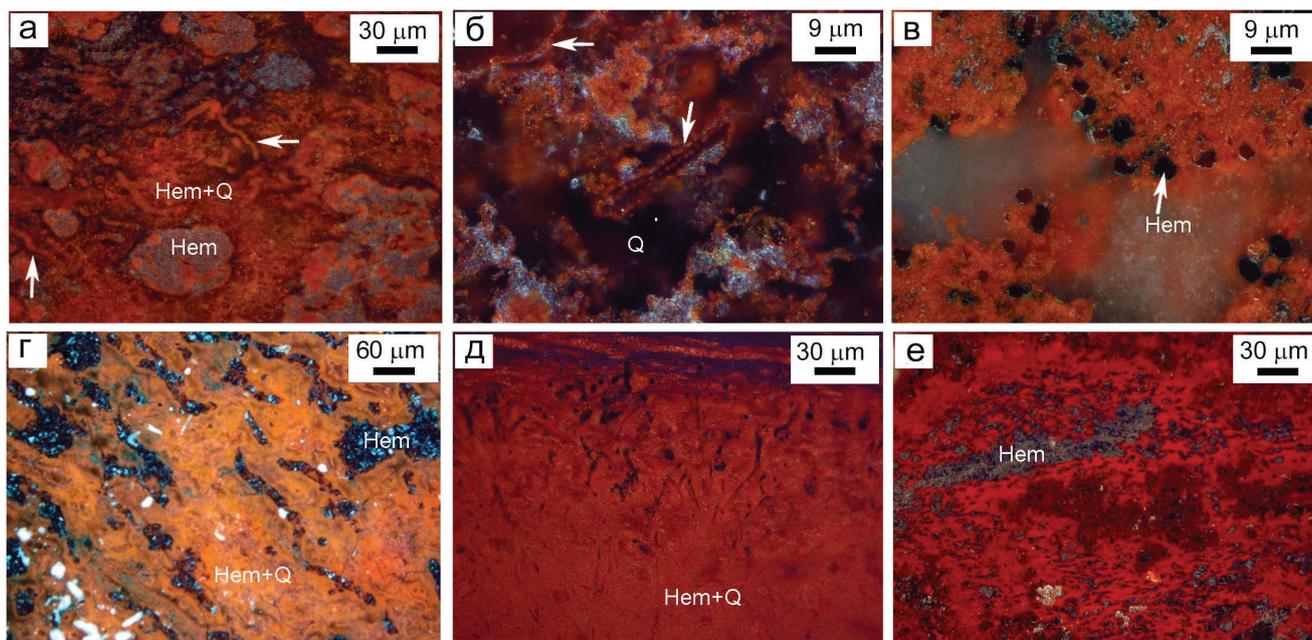


Рис. 3. Извилистые палочковидные формы: а – среди ожелезненного тонкообломочного материала (Hem), основная масса – гематит-кварцевая (Hem+Q); б – изолированные короткие цепочки из гематит-кварцевых клеточных форм, объединенных единым чехлом; в – пластинки гематита, составляющие цепочку вдоль краевой части гематитизированных гиалокластов; г – гранулы гематита в туннельных полостях; д, е – следы сверления, сохранившиеся в ожелезненных гиалокластах.

Отраженный свет (темнопольные изображения).

Fig. 3. Sinuous rod-shaped forms: а – among ferruginous fine-grained matrix (Hem) in main hematite-quartz mass (Hem+Q); б – isolated short chains of hematite-quartz cell forms united by a single cover; в – chain of hematite plates along the marginal part of hematitized hyaloclasts; г – hematite granules inside the tunnel cavities; д, е – mineralized traces of tunneling preserved in ferruginous hyaloclasts.

Reflected light, dark-field images.

многочисленными кристаллитами (до 0.5 мкм) гематита, плотно облегающими друг друга (рис. 4г). В госсанитах отмечаются микроколонии сложенные глобулами, состоящими из фрамбоидов гематит-кварцевого состава, замещающих в свою очередь гематитом с образованием сплошных гематитовых глобул с шероховатой поверхностью (рис. 4д). Реже встречаются концентрически-зональные сферические формы кремнистого состава с включениями гематита в ядрах. Обнаружены также фрагменты псевдоморфоз гематит-кварцевого состава по гиалокластам, характеризующиеся округлыми углублениями, напоминающими следы от описанных выше глобул (рис. 4е), и содержащие многочисленные кристаллы аутигенных Mn-содержащего кальцита и апатита.

Микротрубчатые структуры (длина до 1–2 мм, диаметр до 60–70 мкм) обнаружены в ассоциации с сульфидами. Они представлены одиночными бесцветными трубками и их фрагментами: в одних случаях с хорошо выраженными отдельными крупными клетками цилиндрической формы (раз-

мер до 100 мкм) в виде сегментации единого тела, отделенных друг от друга кольцевыми перетяжками (рис. 5а), а в других – границы между клетками утрачены или угадываются по реликтовой волнистой текстуре внешней стенки (рис. 5б, в). Некоторые трубки имеют наружную и внутреннюю стенки, сложенные тонкодисперсным гематит-кварцевым материалом или тонкочешуйчатым гематитом (рис. 5г, д). Канал трубки в поперечном срезе хорошо индивидуализирован и может состоять из кварца, гематит-кварцевых агрегатов или гематита (рис. 5е). Часто снаружи поверхность стенки шероховатая, иногда покрыта неоднородной коркой гематита или гематит-кварцевого состава колломорфно-почковидной структуры, а в канале присутствуют сульфиды (халькопирит, фрамбоидальный пирит), апатит, карбонаты, оксиды титана, фосфаты РЗЭ (рис. 5ж). Наблюдается частичная консервация трубок бактериоморфными нитчатыми или сферическими формами (рис. 5з). При полной гематитизации трубок наружная и внутренняя стенки сливаются с внутренним каналом и трубки сливаются с породой.

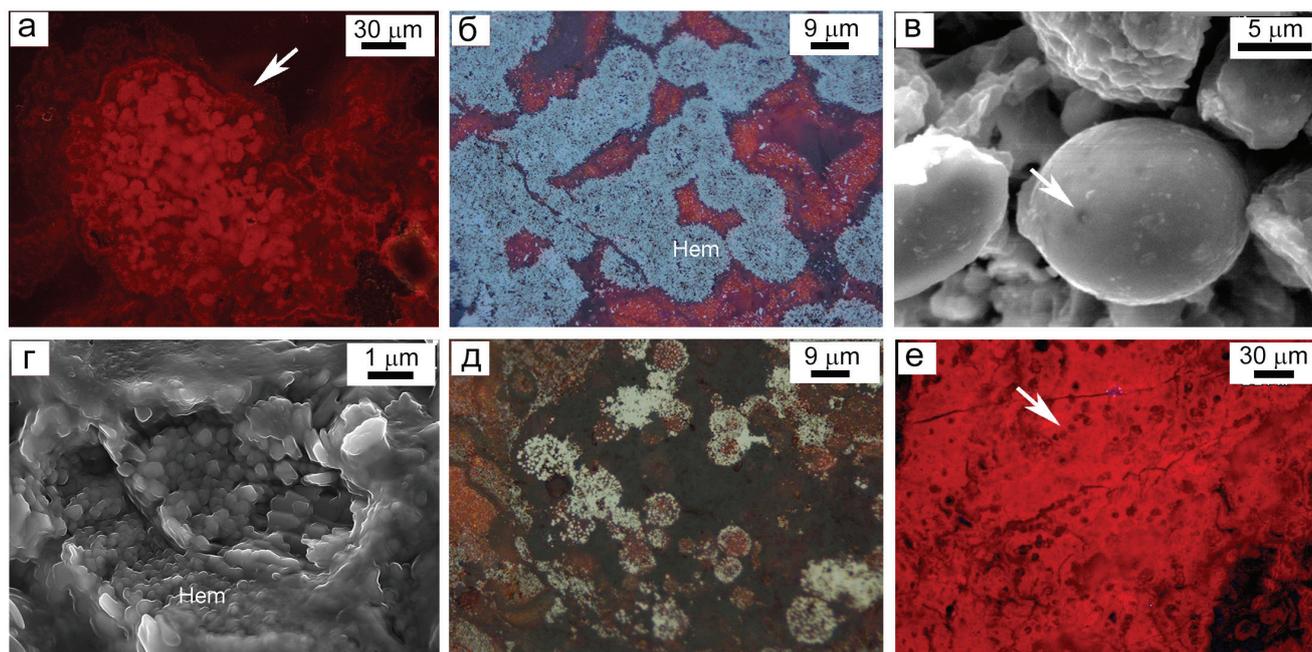


Рис. 4. Сферические биоморфные структуры: а – скопления глобул гематит-кварцевого состава (микроколония) в минерализованной биопленке; б – зональные гематитовые (Hem) глобулы; в – глобула с слабо заметной ямчатой поверхностью; г – пластинки гематита внутри глобулы; д – гематит-кварцевых фрамбониды в микроколонии; е – следы шлобул в виде углублений в гематит-кварцевой псевдоморфозе по гиалокласту.

Фото а, б, д, е – отраженный свет (а, б, е – темнопольное изображение), в, г – СЭМ-фото.

Fig. 4. Spherical biomorphic structures: а – clusters of hematite-quartz globules (microcolony) in mineralized biofilm; б – zoned hematite (Hem) globules; в – globule with barely noticeable pitted surface; г – hematite microplates inside the globule; д – hematite-quartz framboids in microcolony; е – traces of globules in hematite-quartz pseudomorphosis after hyaloclast.

Images а, б, д, е – reflected light (а, б, е – dark-field images), в, г – SEM image.

ОБСУЖДЕНИЕ

Минерализованные бактериальные формы являются неотъемлемой составляющей кремнисто-железистых отложений колчеданных месторождений Урала. Одним из важных признаков изученных структур является хорошая сохранность минерализованных чехлов и биопленки (минерализованной слизистой бесструктурной массы) бактерий. Считается, что хорошая сохранность бактериальных структур и их минерализованных чехлов зависит от скорости fossilization, которая, вероятно, происходила до начала деградации бактериальных тел или в случае наличия оболочки, наиболее подверженной минерализации и тем самым препятствующей растворению ткани (Phoenix, Konhauser, 2008), и свидетельствует о повышенной бактериальной активности (Sagemann et al., 1999). Результаты экспериментов по минерализации бактерий показывают, что клеточная стенка бактерий, а также цитоплазма и слизистая оболочка, продуцируемые бактерия-

ми, действуют как зародыши для образования минеральных фаз, что приводит, в конечном итоге, к полному исчезновению органического вещества по мере замещения минералами (Westall et al., 2001).

Точная идентификация микроорганизмов в ископаемом материале на основании только их морфологии не всегда возможна, поскольку разные экологически и физиологически прокариоты, относящиеся к разным систематическим группам, могут иметь одинаковую морфологию и размеры. В изученных образцах кремнисто-железистых отложений переплетающиеся тончайшие нити в виде длинных клеточных цепочек, по всей видимости, представляют собой минерализованные нити железобактерий *Gallionella ferruginea* и *Leptothrix ochracea*, сопоставимые с таковыми в богатых железом осадках современных (Juniper, Fouquet, 1988; Holm, 1987; Emerson, Moyer, 2002; Kennedy et al., 2003; Hanert, 2002; Yang et al., 2015) и древних (Duhig et al., 1992; Davidson et al., 2001; Little et al., 2004; Grenne, Slack, 2005) гидротермальных си-

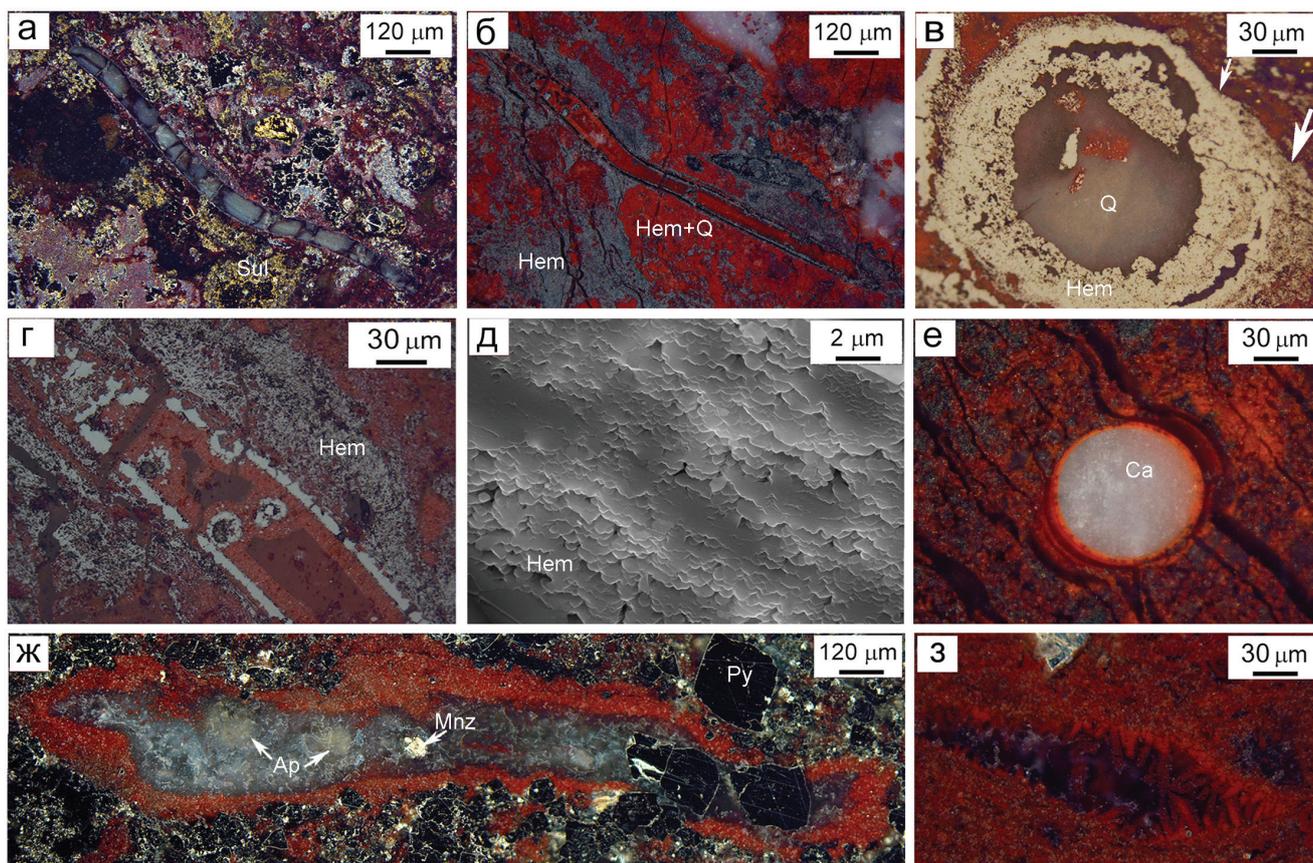


Рис. 5. Минерализованные трубчатые структуры: а – продольный срез трубки с большим количеством цилиндрических сегментов среди частично окисленных сульфидных обломков; б – продольный срез без явно-выраженной сегментации в гематит-кварцевой (Hem+Q) основной массе; в – сегментированная гематитовая стенка трубки, в канале – кварц (Q); г – внешняя и внутренняя стенки трубки со сферическими образованиями в канале; д – тонкочешуйчатый гематит стенки трубки; е – поперечный срез трубки с кальцитом (Ca) в канале; ж – колломорфно-почковидное строение гематитизированной трубочки (продольный срез) в окружении сульфидной минерализации (Py): в канале – скопления апатита (Ap) и монацита (Mnz) в кварцевой массе; з – нитевидные гематит-кварцевые наросты, прикрепленные к внутренней стенке трубки.

Фото а-г, е-з – отраженный свет (а-г, е-з – темнопольное изображение), д – СЭМ-фото.

Fig. 5. Mineralized tubular structures: a – longitudinal section of a tube with numerous cylindrical segments among partly oxidized sulfide debris; б – longitudinal section without evident segmentation in hematite-quartz (Hem+Q) mass; в – segmented hematite wall of the tube; г – the outer and inner walls of the tube with spherules in the channel; д – thin-flaked hematite of the tube wall; е – cross-section of the tube with calcite (Ca) in the channel; ж – colloform-renal structure on the surface of the tube and apatite (Ap) and monazite (Mnz) in quartz matrix of the channel; з – threadlike hematite-quartz overgrowths attached to the inner wall of the tube.

Images а-г, е-з – reflected light (а-г, е-з – dark-field image), д – SEM image.

стем морского дна, а также в докембрийских железистых формациях (Edwards et al., 2012). Известно, что *Gallionella ferruginea* продуцирует внеклеточный материал в виде спирально-закрученного «стебелька», а минерализация начинается внутри его волокон и контролируется не только органическими, но и неорганическими процессами (Anderson, Pedersen, 2003). В случае *Leptothrix ochracea* железо осаждается на слое слизи – гликокаликсе, оставляя стенку клетки свободной от минерализации (Emerson, Weiss, 2004). Ветвящиеся дендритопо-

добные нити *Leptothrix ochracea* в джасперитах могут свидетельствовать о последовательном почковании отдельных микробных клеток, приводящих к увеличению количества нитей. Идентификация нитчатых бактериоморфных форм указывает о существовании благоприятных обстановок для выживания железоокисляющих бактерий в осадках: низкая температура, близкое к нейтральному значению pH (6.0–7.6) и низкая фугитивность кислорода (Boyd, Scott, 2001). Благоприятными условиями для жизнедеятельности *Gallionella ferruginea* является

температура 5–10 °С, а формирование колоний, а, точнее, скоплений нитей, начинается при температуре 12 °С и завершается при 25 °С (Hallbeck, Pedersen, 1995).

Палочковидные структуры в форме короткой цепочки клеток сопоставимы со структурами, возникающими в результате микробной переработки базальтового стекла на дне современных океанов (Torsvik et al., 1998; Furnes et al., 2001). Экспериментальные исследования показывают, что бактерии способны полностью трансформировать базальтовое стекло и обогащать его Fe, Si, Mn, K, Ca, P и Ti (Thorseth et al., 1995; Alt, Mata, 2000). Обнаружение апатита, иллита, анатаза и карбонатов в ассоциации с палочковидными структурами указывает на полную трансформацию гиалокластиков в кремнисто-железистое вещество, которая, вероятно, была катализирована бактериями. Доказательством того, что описанные структуры изначально представляли собой мягкую, податливую материю, является их согнутая форма и отпечатки следов жизнедеятельности. Предполагается, что эти структуры идентичны *Thiobacillus ferrooxidans*, способным окислять серу, а затем и закисное железо до окисного в растворе, используя энергию реакции окисления для жизнеобеспечения (Espejo et al., 1988). Кроме того, считается, что источником существования *Thiobacillus ferrooxidans* может стать механизм окисления любых компонентов раствора (Espejo et al., 1988).

Глобулы небольшого диаметра сходной друг с другом формы, объединенные в микроколонии, имеют сходство с морфологией коккоидальных бактерий, образующих мощный гликокаликс, покрывавший эти формы при жизни (Бактериальная ..., 2021). Для этих образований типична рассеянная вкрапленность апатита и карбонатная минерализация вокруг колоний.

Трубочатые формы в госсанитах, состоящие из отдельных прозрачных цилиндрических клеток, минерализованных кремнеземом, вероятно, принадлежат гигантским (длина до первых миллиметров, диаметр до 160 мкм) сероокисляющим *Beggiatoa*-подобным бактериям (Zierenberg, Schiffman, 1990; Furnes et al., 2001). Эти бактерии подвижны, населяют местообитания богатые серой и не выделяют общего полисахаридного чехла, а каждая нить образует вокруг себя индивидуальную слизистую оболочку.

При формировании кремнисто-железистых отложений железа в осадки поступает из двух разных источников: (1) в результате окисления сульфидов

и (2) ремобилизации в процессах трансформации гиалокластов при гальмиролизе (Maslennikov et al., 2012). В большинстве случаев превращения сульфидных обломков и гиалокластов в железистое или кремнисто-железистое вещество носит псевдоморфный характер и легко идентифицируется в оксидно-железистых отложениях. При взаимодействии с насыщенной кислородом морской водой Fe^{2+} из растворенных сульфидов окисляется до Fe^{3+} , которое затем гидролизуется и осаждается с образованием плохо упорядоченных оксигидроксидов Fe^{3+} , таких как ферригидрит или гетит, которые в последующих процессах превращаются в гематит (Schwertmann, Murad, 1983; Jambor, Dutrizac, 1998). Механизмом, контролирующим скорость образования оксигидроксидов Fe^{3+} , является не быстрый гидролиз и осаждение Fe^{3+} , а окисление Fe^{2+} . Известно, что микробиологически катализированное окисление протекает быстрее, чем абиогенное (Kasama, Murakami, 2001).

Для джасперитов, формирование которых происходило в нейтральных и слабощелочных условиях гальмиролиза гиалокластитовых осадков в присутствии карбонатов, в основном, характерны нитчатые и сферические формы. Считается, что за счет метаболических процессов *Leptothrix ochracea* и *Gallionella ferruginea* при нейтральном pH среды скорость окисления Fe^{2+} минерального вещества по сравнению с абиотическим окислением увеличивается на четыре порядка (Ghiorse, 1984; Kasama, Murakami, 2001; Emerson, Moyer, 2002). Наблюдаемое разнообразие структурных типов микрофоссилий в госсанитах обеспечивается окислением Fe^{2+} как сульфидов, так и гиалокластов. При формировании госсанитов серная кислота, образующаяся из-за растворения сульфидов, вероятно, ускоряет растворение гиалокластов, содержащихся в осадке, увеличивая их пористость, доступную для микробного доступа и колонизации. Установлено, что *Thiobacillus ferrooxidans* увеличивают скорость окисления Fe^{2+} при кислом pH на шесть порядков (Singer, Stumm, 1970; Warren, Ferris, 1998). А скорость бактериального окисления Fe^{2+} , выделяющегося с поверхности пирита, до миллиона раз превышает скорость его неорганического окисления при низком pH (Singer, Stumm, 1970).

Роль бактерий в образовании аутигенных минералов заключается в реакции растворенных металлов с органическими полимерами бактериальной клетки. Клеточная стенка, окружающие слои и цитоплазма (после растворения мертвых клеток

и тканей) обеспечивают микросреду для электро-статического связывания растворенных ионов металлов (Konhauser, Ferris, 1996). В любом случае, однажды связавшись, эти металлы затем могут служить центрами зародышеобразования для осаждения аутигенных минеральных фаз (Lowenstam, 1981). Наблюдаемые ассоциации бактериоморфных структур с тонкими включениями апатита и фосфатов РЗЭ в основной массе породы или их накопление внутри стебельков и трубок предполагает, что отложение фосфатов происходило в результате высвобождения фосфора во время разложения органических соединений (Krajewski et al., 1994). Трансформацию гиалокластов в кремнисто-железистые агрегаты с выделением Ti фаз можно объяснить пассивным накоплением Ti при травлении микробами гиалокластов (Banerjee et al., 2006, 2010; Ауцрова et al., 2024). О биофильных свойствах титана известно мало, но некоторые организмы могут потреблять растворимые формы титана (Konhauser, 2006). Аутигенные карбонаты, значения изотопного состава углерода δC^{13} которых варьируют от -4.2 до -26.2 ‰ (Ауцрова et al., 2017), свидетельствуют о выделении кальция при ферментации бактериальных тел (Lowenstam, Weiner, 1989).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Морфологические и структурные особенности нитчатых, палочковидных, сферических и трубчатых форм, наличие чехлов и биопленок вокруг них, следы гликокаликса на гиалокластах следует рассматривать как доказательство бактериального присутствия и биогенного минералообразования в процессах формирования различных генетических типов кремнисто-железистых отложений. Сохранение бактериоморфных структур связано с их быстрой фоссилизацией до захоронения бактериальных тел и нахождением их клеток в окружающем чехле. Особенности бактериальных сообществ, отраженные в морфологии реликтов бактериальных тел обусловлены составом осадков и условиями окружающей среды, создаваемых их разложением: для безрудных джасперитов характерны нитчатые и сферические формы, а в госсанитах встречаются как железо-, так и сероокисляющие разновидности микрофоссилий. Следы бактериальной жизнедеятельности в кремнисто-железистых породах проявлены повсеместно, но по-разному. Акцессорные минералы в этих отложениях, вероятно, являются результатом биологически индуцированного мине-

ралообразования: микроорганизмы в кремнисто-железистых отложениях играли роль катализатора процессов разложения гиалокластитовых и сульфидно-гиалокластических осадков в зоне субмаринного выветривания с последующим формированием редких аутигенных минеральных ассоциаций.

ЛИТЕРАТУРА

- Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Котляров В.А., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В., Ларж Р. (2017) Минералы селена и индия в зоне субмаринного гипергенеза колчеданной залежи Молодежного медно-цинково-колчеданного месторождения, Южный Урал. *Доклады Академии наук*, 473(2), 190–194.
- Аюпова Н.Р., Масленников В.В. (2005) Гальмиролититы Узельгинского рудного поля. Миасс, Институт минералогии УрО РАН, 199 с.
- Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Шиловских В.В. (2022) Аутигенная титановая минерализация как отражение гальмиролиза карбонатно-сульфидно-гиалокластитовых осадков на колчеданосных полях Урала. *Литосфера*, 22(6), 847–858.
- Бактериальная палеонтология / Ред. Розанов А.Ю. (2021) М., РАН, 124 с.
- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Гурвич Е.Г. (2006) Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 527 с.
- Зайков В.В. (2006) Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. На примере колчеданосных зон Урала и Сибири. М., Наука, 429 с.
- Зайкова Е.В. (1991) Кремнистые породы офиолитовых ассоциаций (на примере Мугодзар). М., Наука, 134 с.
- Масленников В.В. (1999) Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс, Геотур, 348 с.
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р. (2007) Кремнисто-железистые породы Узельгинского колчеданосного поля (Южный Урал). *Литосфера*, 2, 106–129.
- Масленников В.В., Зайков В.В. (1991) О разрушении и окислении сульфидных холмов на дне Уральского палеоокеана. *Доклады АН СССР*, 319(6), 1434–1437.
- Al-Hanbali H., Sowerby S., Holm N.G. (2001) Biogenicity of silicified microbes from a hydrothermal system: relevance to the search for evidence of life on earth and other planets. *Earth Planetary Science Letters*, 191, 213–218. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00421-6
- Alt J.C. (1988) Hydrothermal oxide and nontronite deposits on seamounts in the Eastern Pacific. *Marine Geology*, 81, 227–239. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90029-1)
- Alt J.C., Mata P. (2000) On the role of microbes in the alteration of submarine basaltic glass: A TEM study. *Earth and Planetary Science Letters*, 181, 301–313. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00204-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00204-1)

- Anderson C.R., Pedersen K. (2003) In situ growth of Gallionella biofilms and partitioning of lanthanides and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides. *Geobiology*, 1, 169–178. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4669.2003.00013.x>
- Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Artemyev D.A., Melekestseva I.Yu., Belogub E.V. (2024) The fate of “immobile” Ti in hyaloclastites: an evidence from silica-iron-rich sedimentary rocks of the Urals Paleozoic massive sulfide deposits. *Minerals* 14(9), 939. <https://doi.org/10.3390/min14090939>
- Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Tessalina S.G., Shilovsky O.P., Sadykov S.A., Hollis S.P., Danyushevsky L.V., Safina N.P., Statsenko E.O. (2017) Tube fossils from gossanites of the Urals VHMS deposits, Russia: authigenic mineral assemblages and trace element distributions. *Ore Geology Reviews*, 85, 107–130. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.003>
- Banerjee N.R., Furnes H., Muehlenbachs K., Staudigel H., de Wit M. (2006) Preservation of 3.4–3.5 Ga microbial biomarkers in pillow lavas and hyaloclastites from the Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 241, 707–722. doi:10.1016/j.epsl.2005.11.011
- Banerjee N.R., Izawa M.R.M., Sapers H.M., Whitehouse M.J. (2010) Geochemical biosignatures preserved in microbially altered basaltic glass. *Surface and Interface Analysis*, 43, 452–457. <https://doi.org/10.1002/sia.3577>
- Binns R.A., Scott S. D., Bogdanov Y.A., Lisitzin A.P., Gordeev V.V., Gurvich E.G., Finlayson E.J., Boyd T., Dotter L.E., Wheller G.E., Muravyev K.G. (1993) Hydrothermal oxide and gold rich sulfate deposits of Franklin Seamount, western Woodlark Basin, Papua New Guinea. *Economic Geology*, 88, 2122–2153.
- Boyd T., Scott S.D. (2001) Microbial and hydrothermal aspects of ferric oxyhydroxides and ferrosic hydroxides: the example of Franklin Seamount, Western Woodlark Basin, Papua New Guinea. *Geochemical Transactions*, 7. doi: 10.1039/b105277m.
- Constantinou G., Govett G.J.S. (1973) Geology, geochemistry, and genesis of Cyprus sulfide deposits. *Economic Geology*, 68, 843–858.
- Davidson G.J., Stolz A.J., Eggins S.M. (2001) Geochemical anatomy of silica iron exhalites: evidence for hydrothermal oxyanion cycling in response to vent fluid redox and thermal evolution (Mt. Windsor Subprovince, Australia). *Economic Geology*, 96, 1201–1226. DOI: 10.2113/gsecongeo.96.5.1201
- Dekov V.M., Petersen S., Garbe-Schonberg C.D., Kamenov G.D., Perner M., Kuzmann E., Schmidt M. (2010) Fe-Si-oxyhydroxide deposits at a slow-spreading centre with thickened oceanic crust: the Lilliput hydrothermal field (9°33'S, Mid-Atlantic Ridge). *Chemical Geology*, 278, 186–200. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2010.09.012
- Duhig N.C., Davidson G.J., Stolz J. (1992) Microbial involvement in the formation of Cambrian sea-floor silica-iron oxide deposits, Australia. *Geology*, 20, 511–514.
- Edwards C.T., Pufahl P.K., Hiatt E.E., Kurtis K.T. (2012) Paleoenvironmental and taphonomic controls on the occurrence of Paleoproterozoic microbial communities in the 1.88 Ga Ferriman Group, Labrador Trough, Canada. *Precambrian Research*, 212–213, 91–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.020>.
- Edwards K., Rogers D., Wirsen C.O., McCollom T.M. (2003) Isolation and characterization of novel psychrophilic, neutrophilic, Fe-oxidizing, chemolithautotrophic α and γ proteobacteria from the deep sea. *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 2906–2913. DOI: 10.1128/AEM.69.5.2906-2913.2003
- Emerson D., Moyer C.L. (2002) Neutrophilic Fe-oxidizing bacteria are abundant and play a major role in Fe-oxide deposition at the Loihi Seamount Hydrothermal Vents and Play a Major Role in Fe Oxide Deposition. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(6), 3085–3093. doi: 10.1128/AEM.68.6.3085-3093.2002.
- Emerson D., Weiss J.V. (2004) Bacterial Iron Oxidation in Circumneutral Freshwater Habitats: Findings from the Field and the Laboratory. *Geomicrobiology*, 21(6), 405–414.
- Espejo R.T., Escobar B., Jedlicki E., Uribe P., Badilla-Ohlbau A. (1988) Oxidation of ferrous iron and elemental sulfur by Thiobacillus Ferrooxidans. *Applied and Environmental Microbiology*, 54, 1694–1699.
- Fisk M.R., Storie-Lombardi M.C., Douglas S., Popa R., McDonald G., Di Meo-Savoie C. (2003) Evidence of biological activity in Hawaiian subsurface basalts. *Geochemistry, Geophysics Geosystems*, 4(4). doi: 10.1029/2003GC000387.
- Fortin D., Ferris F.G., Scott S.D. (1998) Formation of Fe-silicates and Fe-oxides on bacterial surfaces in samples collected near hydrothermal vents on the Southern Explorer Ridge in the northeast Pacific Ocean. *American Mineralogist* 83, 1399–1408. doi: 10.2138/am-1998-11-1229
- Furnes H., Muehlenbachs K., Tumyr O., Torsvik T., Xenophontos C. (2001) Biogenic alteration of volcanic glass from Troodos ophiolite, Cyprus. *Journal of the Geological Society* 158, 75–8
- Ghiorse W.C. (1984) Biology of iron- and manganese-depositing bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 38, 515–550. doi: 10.1146/annurev.mi.38.100184.002503
- Goodfellow W.D., Franklin J.M. (1993) Geology, mineralogy, and chemistry of sediment-hosted clastic massive sulfides in shallow cores, Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge. *Economic Geology*, 88, 2037–2068. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2037>
- Grenne T., Slack J.F. (2003) Bedded jaspers of the Ordovician Lokken ophiolite, Norway: seafloor deposition and diagenetic maturation of hydrothermal plume-derived silica-iron gels. *Mineralium Deposita*, 38, 625–639. doi: 10.1007/s00126-003-0346-3
- Grenne T., Slack J.F. (2005) Geochemistry of jasper beds from the Ordovician Løkken Ophiolite, Norway: origin of proximal and distal siliceous exhalites. *Economic Geology*, 100, 1511–1527. doi: 10.2113/100.8.1511

- Halbach M, Koschinsky A, Halbach P. (2001) Report on the discovery of *Gallionella ferruginea* from an active hydrothermal field in the deep sea. *InterRidge News*, 10, 18–20
- Hallbeck L., Pedersen K. (1995) Benefits associated with the stalk of *Gallionella ferruginea*, evaluated by comparison of a stalkforming and non-stalk-forming strain and biofilm studies in situ. *Microbiol Ecology*, 30, 257–268. DOI: 10.1007/BF00171933
- Hanert H.H. (2002) Bacterial and chemical iron oxide deposition in a shallow bay on Palaea Kameni, Santorini, Greece: microscopy, electron probe microanalysis, and photometry of in situ experiments. *Geomicrobiology Journal*, 19, 317–342. DOI: 10.1080/01490450290098405
- Hannington M.D., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S. (1998) Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits. In Herzig P.M. et al. (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 158, 389–415.
- Hein J.R., Clague D.A., Koski R.A., Embley R.W., Duhnam R.E. (2008) Metalliferous sediment and a silica-hematite deposit within the Blanco Fracture Zone, Northeast Pacific. *Marine Georesources & Geotechnology*, 26, 317–339. DOI: 10.1080/10641190802430986
- Hekinian R., Hoffert M., Larque P., Chemine J.L., Stoffers P., Bideau D. (1993) Hydrothermal Fe and Si oxyhydroxide deposits from South Pacific intraplate volcanoes and East Pacific Rise axial and off-axial regions. *Economic Geology*, 88, 2099–2121.
- Herzig P.M., Hannington M.D., Scott S.D., Malio-tis G., Rona P.A., Thompson G. (1991) Gold-rich sea-floor gossans in the Troodos Ophiolite and on the Mid-Atlantic Ridge. *Economic Geology*, 86, 1747–1755. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.86.8.1747>
- Holm N.G. (1987). Possible biological origin of banded iron-formations from hydrothermal solutions. *Original of life and evolution of the biosphere*, 17, 229–250.
- Iizasa K., Kawasaki K., Maeda K., Matsumoto T., Saito N., Hirai K. (1998) Hydrothermal sulfide-bearing Fe-Si oxyhydroxide deposits from the Coriolis Troughs, Vanuatu backarc, southwestern Pacific. *Marine Geology*, 145, 1–21. DOI: 10.1016/s0025-3227(97)00112-6
- Jambor J.L., Dutrizac J.E. (1998) Occurrence and constitution of natural and synthetic ferrihydrite, a widespread iron oxyhydroxide. *Chemical Reviews*, 98 (7), 2549–2585.
- Juniper S.K., Fouquet Y. (1988) Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites. *Canadian Mineralogy*, 26, 859–869.
- Kalogeropoulos S.I., Scott S.D. (1983) Mineralogy and geochemistry of tuffaceous exhalites (tetsusekiei) of the Fukazawa mine, Hokuroku district, Japan. *Economic Geology Monograph*, 5, 412–432.
- Kalogeropoulos S.I., Scott S.D. (1989) Mineralogy and geochemistry of an Archean tuffaceous exhalite: the Main Contact Tuff, Millenbach mine area, Noranda, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26, 88–105.
- Kasama T., Murakami T. (2001). The effect of microorganisms on Fe precipitation rates at neutral pH. *Chemical Geology*, 180, 117–128. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00309-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00309-6)
- Kennedy C.B., Scott S.D., Ferris F.G. (2003) Characterization of bacteriogenic iron oxide deposits from Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge, north-east Pacific Ocean. *Geomicrobiology*, J.20, 199–214. <https://doi.org/10.1080/01490450303873>
- Köhler B., Singer A., Stoffers P. (1994) Biogenic nontronite from marine white smoker chimneys. *Clays and Clay Minerals*, 42, 698–701.
- Konhauser K. (2006). Introduction to Geomicrobiology. Maldon, Oxford, Carlton, Blackwell Publishing, 425 p.
- Konhauser K.O., Ferris F.G. (1996) Diversity of iron and silica precipitation by microbial mats in hydrothermal waters, Iceland: Implications for Precambrian iron formations. *Geology*, 24(4), 323–326.
- Krajewski K.P., Cappellen P.V., Trichet J., Kuhn O., Lucas J., Martín-Algarra A., Prevot L., Tewari V.C., Gaspar L., Knight R.I. (1994) Biological processes and apatite formation in sedimentary environments. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 87, 701–746.
- Little C.T.S., Glynn S.E.J., Mills R.A. (2004) Four-Hundred-and-Ninety-million year record of bacteriogenic iron oxide precipitation at sea-floor hydrothermal vent. *Geomicrobiology Journal*, 21, 415–429. doi: 10.1080/01490450490485845
- Lowenstam H.A. (1981) Minerals formed by organisms. *Science*, 211, 1126–1131.
- Lowenstam H.A., Weiner S. (1989). On Biomineralization. New York, Oxford University Press, 324 p.
- Lupton J.E., Delaney J.E., Johnson H.P., Tivey M.K. (1985) Entrainment and vertical transport of deep-ocean water by buoyant hydrothermal plumes. *Nature*, 316, 621–623.
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R. (2012) Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geology Reviews*, 47, 5–41. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.03.008>
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G. (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 9(3), 150. <https://doi.org/10.3390/min9030150>
- Maslennikov V.V., Cherkashov G.A., Firstova A.V., Ayupova N.R., Beltenev V.E., Melekestseva I.Yu., Artemyev D.A., Tseluyko A.S., Blinov I.A. (2023) Trace element assemblages of pseudomorphic iron oxyhydroxides of the Pobeda-1 hydrothermal field, 17°08.7' N, Mid-Atlantic Ridge: the development of a halmyrolysis model from LA-ICP-MS data. *Minerals*, 12(19). DOI: 10.3390/min13010004
- Mills R.F., Elderfield H. (1995) Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge. *Geochimica*

- Cosmochimica Acta*, 59(17), 3511–3524. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00224-N](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00224-N).
- Perner M., Seifert R., Weber S., Koshinskiy A., Shmidt K., Strauss H., Peters M., Haase K., Imhoff J.F. (2007) Microbial CO₂ fixation and sulfur cycling associated with low-temperature emissions at the Lilliput hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge (9 degrees S). *Environmental Microbiology* 9(5), 1186–1201. DOI:10.1111/j.1462-2920.2007.01241.x
- Phoenix V.R., Konhauser K.O. (2008) Benefits of bacterial biomineralization. *Geobiology*, 6, 303–308. DOI: 10.1111/j.1472-4669.2008.00147.x.
- Revan M.K., Genç Yu., Delibaş O., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Zimitoğlu O. (2019) Mineralogy and geochemistry of metalliferous sedimentary rocks from the Upper Cretaceous VMS deposits of the Eastern Pontides (NE Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28, 299–327. doi: 10.3906/yer-1805-31.
- Robertson A.H.F., Boyle J.F. (1983). Tectonic setting and origin of metalliferous sediments in the Mesozoic Tethyan ocean: In Rona P., et al. (Eds.) In: *Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centres*: NATO Adv. Res. Inst., 595–664.
- Sagemann J., Bale S.J., Briggs D.E.G., Parkes R.J. (1999) Controls on the formation of authigenic minerals in association with decaying organic matter: an experimental approach. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 63, 1083–1095.
- Schwertmann U., Murad E. (1983) Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. *Clays Clay Minerals*, 31(4), 277–284.
- Singer P.C., Stumm W. (1970) Acid Mine Drainage: The Rate-Determining Step. *Science*, 167, 1121–1123. <http://dx.doi.org/10.1126/science.167.3921.112>.
- Slack J.F., Foose M.P., Flohr M.J.K., Scully M.V., Belkin H.E. (2003) Exhalative and subseafloor replacement processes in the formation of the Bald Mountain massive sulfide deposit, northern Maine. In: Goodfellow W.D., van Staal C.R., McCutcheon S.R., Thomas M.D. (eds) *Volcanogenic massive sulfide deposits of the Bathurst district, New Brunswick, and northern Maine*. *Economic Geology Monograph*, 11, 513–547.
- Thorseth I.H., Furnes H., Tumor O. (1995) Textural and chemical effects of bacterial activity on basaltic glass: an experimental approach. *Chemical Geology*, 119, 139–160. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00098-S
- Torsvik T., Furnes H., Muehlenbachs K., Thorseth I., Tumor H.O. (1998) Evidence for microbial activity at the glass-alteration interface in oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 162, 165–176. DOI: 10.1016/S0012-821X(98)00164-2
- Warren L.A., Ferris F.G. (1998) Continuum between sorption and precipitation of Fe(III) on microbial surfaces. *Environmental Science & Technology*, 32, 2331–2337.
- Westall F., de Wit M.J., Dann J., van der Gaast S., de Ronde C.E.J., Gerneke D. (2001) Early Archean fossil bacteria and biofilms in hydrothermally-influenced sediments from the Barberton greenstone belt, South Africa. *Precambrian Research*, 106, 93–116. DOI: 10.1016/S0301-9268(00)00127-3
- Yang B., Zeng Zh., Qi H., Wang X., Ma Y., Rong K. (2015) Constraints on Biotic and Abiotic Role in the Formation of Fe-Si Oxides from the PACMANUS Hydrothermal Field. *Ocean Science journal*, 50(4), 751–761. <http://dx.doi.org/10.1007/s12601-015-0067-4>.
- Zierenberg R.A., Schiffman P. (1990) Microbial control of silver mineralization at a sea-floor hydrothermal site on the northern Gorda Ridge. *Nature*, 348, 155–157.

REFERENCE

Al-Hanbali H., Sowerby S., Holm N.G. (2001) Biogenicity of silicified microbes from a hydrothermal system: relevance to the search for evidence of life on earth and other planets. *Earth Planetary Science Letters*, 191, 213–218. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00421-6

Alt J.C. (1988) Hydrothermal oxide and nontronite deposits on seamounts in the Eastern Pacific. *Marine Geology*, 81, 227–239. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90029-1)

Alt J.C., Mata P. (2000) On the role of microbes in the alteration of submarine basaltic glass: A TEM study. *Earth and Planetary Science Letters*, 181, 301–313. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00204-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00204-1)

Anderson C.R., Pedersen K. (2003) In situ growth of *Gallionella* biofilms and partitioning of lanthanides and actinides between biological material and ferric oxyhydroxides. *Geobiology*, 1, 169–178. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4669.2003.00013.x>

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Artemyev D.A., Melekestseva I.Yu., Belogub E.V. (2024) The fate of “immobile” Ti in hyaloclastites: an evidence from silica-iron-rich sedimentary rocks of the Urals Paleozoic massive sulfide deposits. *Minerals* 14(9), 939. <https://doi.org/10.3390/min14090939>

Ayupova N.R., Maslennikov V.V. (2005) *Halmyrolitites of the Uzelga ore field*. Miass, Institute of Mineralogy UB RAS, 199 p. (in Russian)

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Maslennikova S.P., Danyushevsky L.V., Large R. (2017) Se and In minerals in the submarine oxidation zone of the massive sulfide orebody of the Molodezhnoe copper-zinc massive sulfide deposit, Southern Urals. *Doklady Earth Sciences* 473(1), 318–322.

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Shilovskikh V.V. (2022) Authigenic titanium mineralization as a reflection of halmyrolysis of carbonate-sulfide-hyaloclastite sediments in the pyrite-bearing fields of the Urals. *Litosfera (Lithosphere)*, 22(6), 847–858 (in Russian).

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Tsalina S.G., Shilovsky O.P., Sadykov S.A., Hollis S.P., Danyushevsky L.V., Safina N.P., Statsenko E.O. (2017) Tube fossils from

gossanites of the Urals VHMS deposits, Russia: authigenic mineral assemblages and trace element distributions. *Ore Geology Reviews*, 85, 107–130. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.003>

Bacterial paleontology (2021). Ed. Rozanov A.Yu. Moscow, Russian Academy of Science, 124 p. (in Russian)

Banerjee N.R., Furnes H., Muehlenbachs K., Staudigel H., de Wit M. (2006) Preservation of 3.4–3.5 Ga microbial biomarkers in pillow lavas and hyaloclastites from the Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 241, 707–722. doi:10.1016/j.epsl.2005.11.011

Banerjee N.R., Izawa M.R.M., Sapers H.M., Whitehouse M.J. (2010) Geochemical biosignatures preserved in microbially altered basaltic glass. *Surface and Interface Analysis*, 43, 452–457. <https://doi.org/10.1002/sia.3577>

Binns R.A., Scott S. D., Bogdanov Y.A., Lisitzin A.P., Gordeev V.V., Gurchich E.G., Finlayson E.J., Boyd T., Dotter L.E., Wheller G.E., Muravyev K.G. (1993) Hydrothermal oxide and gold rich sulfate deposits of Franklin Seamount, western Woodlark Basin, Papua New Guinea. *Economic Geology*, 88, 2122–2153.

Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurchich E.G. (2006) Hydrothermal ore genesis of the ocean floor. Moscow, Nauka, 527 p. (in Russian)

Boyd T., Scott S.D. (2001) Microbial and hydrothermal aspects of ferric oxyhydroxides and ferrosic hydroxides: the example of Franklin Seamount, Western Woodlark Basin, Papua New Guinea. *Geochemical Transactions*, 7. doi: 10.1039/b105277m.

Constantinou G., Govett G.J.S. (1973) Geology, geochemistry, and genesis of Cyprus sulfide deposits. *Economic Geology*, 68, 843–858.

Davidson G.J., Stolz A.J., Eggins S.M. (2001) Geochemical anatomy of silica iron exhalites: evidence for hydrothermal oxyanion cycling in response to vent fluid redox and thermal evolution (Mt. Windsor Subprovince, Australia). *Economic Geology*, 96, 1201–1226. DOI: 10.2113/gsecongeo.96.5.1201

Dekov V.M., Petersen S., Garbe-Schonberg C.D., Kamenov G.D., Perner M., Kuzmann E., Schmidt M. (2010) Fe-Si-oxyhydroxide deposits at a slow-spreading centre with thickened oceanic crust: the Lilliput hydrothermal field (9°33'S, Mid-Atlantic Ridge). *Chemical Geology*, 278, 186–200. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2010.09.012

Duhig N.C., Davidson G.J., Stolz J. (1992) Microbial involvement in the formation of Cambrian sea-floor silica-iron oxide deposits, Australia. *Geology*, 20, 511–514.

Edwards C.T., Pufahl P.K., Hiatt E.E., Kurtis K.T. (2012) Paleoenvironmental and taphonomic controls on the occurrence of Paleoproterozoic microbial communities in the 1.88 Ga Ferriman Group, Labrador Trough, Canada. *Precambrian Research*, 212–213, 91–106. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.020>.

Edwards K., Rogers D., Wirsén C.O., McCollom T.M. (2003) Isolation and characterization of novel psychrophilic, neutrophilic, Fe-oxidizing, chemolithoautotrophic α and γ proteobacteria from the deep sea. *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 2906–2913. DOI: 10.1128/AEM.69.5.2906-2913.2003

Emerson D., Moyer C.L. (2002) Neutrophilic Fe-oxidizing bacteria are abundant and play a major role in Fe-oxide deposition at the Loihi Seamount Hydrothermal Vents and Play a Major Role in Fe Oxide Deposition. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(6), 3085–3093. DOI: 10.1128/AEM.68.6.3085-3093.2002.

Emerson D., Weiss J.V. (2004) Bacterial Iron Oxidation in Circumneutral Freshwater Habitats: Findings from the Field and the Laboratory. *Geomicrobiology*, 21(6), 405–414.

Espejo R.T., Escobar B., Jedlicki E., Uribe P., Badilla-Ohlbau A. (1988) Oxidation of ferrous iron and elemental sulfur by *Thiobacillus Ferrooxidans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 54, 1694–1699.

Fisk M.R., Storrie-Lombardi M/C., Douglas S., Popa R., McDonald G., Di Meo-Savoie C. (2003) Evidence of biological activity in Hawaiian subsurface basalts. *Geochemistry, Geophysics Geosystems*, 4(4). DOI: 10.1029/2003GC000387.

Fortin D., Ferris F.G., Scott S.D. (1998) Formation of Fe-silicates and Fe-oxides on bacterial surfaces in samples collected near hydrothermal vents on the Southern Explorer Ridge in the northeast Pacific Ocean. *American Mineralogist* 83, 1399–1408. DOI: 10.2138/am-1998-11-1229

Furnes H., Muehlenbachs K., Tumyr O., Torsvik T., Xenophontos C. (2001) Biogenic alteration of volcanic glass from Troodos ophiolite, Cyprus. *Journal of the Geological Society* 158, 75–84.

Ghiorse W.C. (1984) Biology of iron- and manganese-depositing bacteria. *Annual Review of Microbiology*, 38, 515–550. DOI: 10.1146/annurev.mi.38.100184.002503.

Goodfellow W.D., Franklin J.M. (1993) Geology, mineralogy, and chemistry of sediment-hosted clastic massive sulfides in shallow cores, Middle Valley, Northern Juan de Fuca Ridge. *Economic Geology*, 88, 2037–2068. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.88.8.2037>

Grenne T., Slack J.F. (2003) Bedded jaspers of the Ordovician Lokken ophiolite, Norway: seafloor deposition and diagenetic maturation of hydrothermal plume-derived silica-iron gels. *Mineralium Deposita*, 38, 625–639. DOI: 10.1007/s00126-003-0346-3

Grenne T., Slack J.F. (2005) Geochemistry of jasper beds from the Ordovician Lokken Ophiolite, Norway: origin of proximal and distal siliceous exhalites. *Economic Geology*, 100, 1511–1527. DOI: 10.2113/100.8.1511

Halbach M., Koschinsky A., Halbach P. (2001). Report on the discovery of *Gallionella ferruginea* from an active hydrothermal field in the deep sea. *InterRidge News*, 10, 18–20

Hallbeck L., Pedersen K. (1995) Benefits associated with the stalk of *Gallionella ferruginea*, evaluated by

- comparison of a stalkforming and non-stalk-forming strain and biofilm studies in situ. *Microbiol Ecology*, 30, 257–268. DOI: 10.1007/BF00171933
- Hanert H.H. (2002) Bacterial and chemical iron oxide deposition in a shallow bay on Palaea Kameni, Santorini, Greece: microscopy, electron probe microanalysis, and photometry of in situ experiments. *Geomicrobiology Journal*, 19, 317–342. DOI: 10.1080/01490450290098405
- Hannington M.D., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S. (1998) Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits. In Herzig P.M. et al. (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*: 158, 389–415.
- Hein J.R., Clague D.A., Koski R.A., Embley R.W., Duhnam R.E. (2008) Metalliferous sediment and a silica-hematite deposit within the Blanco Fracture Zone, Northeast Pacific. *Marine Georesources & Geotechnology*, 26, 317–339. DOI: 10.1080/10641190802430986
- Hekinian R., Hoffert M., Larque P., Chemine J.L., Stoffers P., Bideau D. (1993) Hydrothermal Fe and Si oxyhydroxide deposits from South Pacific intraplate volcanoes and East Pacific Rise axial and off-axial regions. *Economic Geology*, 88, 2099–2121.
- Herzig P.M., Hannington M.D., Scott S.D., Malio-tis G., Rona P.A., Thompson G. (1991) Gold-rich sea-floor gossans in the Troodos Ophiolite and on the Mid-Atlantic Ridge. *Economic Geology*, 86, 1747–1755. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.86.8.1747>.
- Holm N.G. (1987). Possible biological origin of banded iron-formations from hydrothermal solutions. *Original of life and evolution of the biosphere*, 17, 229–250.
- Iizasa K., Kawasaki K., Maeda K., Matsumoto T., Saito N., Hirai K. (1998) Hydrothermal sulfide-bearing Fe-Si oxyhydroxide deposits from the Coriolis Troughs, Vanuatu backarc, southwestern Pacific. *Marine Geology*, 145, 1–21. [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(97\)00112-6](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(97)00112-6)
- Jambor J.L., Dutrizac J.E. (1998) Occurrence and constitution of natural and synthetic ferrihydrite, a widespread iron oxyhydroxide. *Chemical Reviews*, 98 (7), 2549–2585.
- Juniper S.K., Fouquet Y. (1988) Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites. *The Canadian Mineralogy*, 26, 859–869.
- Kalogeropoulos S.I., Scott S.D. (1983) Mineralogy and geochemistry of tuffaceous exhalites (tetsusekiei) of the Fukazawa mine, Hokuroku district, Japan. *Economic Geology Monograph*, 5, 412–432.
- Kalogeropoulos S.I., Scott S.D. (1989) Mineralogy and geochemistry of an Archean tuffaceous exhalite: the Main Contact Tuff, Millenbach mine area, Noranda, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26, 88–105.
- Kasama T., Murakami T. (2001). The effect of microorganisms on Fe precipitation rates at neutral pH. *Chemical Geology*, 180, 117–128. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(01\)00309-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00309-6)
- Kennedy C.B., Scott S.D., Ferris F.G. (2003) Characterization of bacteriogenic iron oxide deposits from Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge, north-east Pacific Ocean. *Geomicrobiology*, J.20, 199–214. <https://doi.org/10.1080/01490450303873>
- Köhler B., Singer A., Stoffers P. (1994) Biogenic nontronite from marine white smoker chimneys. *Clays and Clay Minerals*, 42, 698–701.
- Konhauser K. (2006). Introduction to Geomicrobiology. Maldon, Oxford, Carlton, Blackwell Publishing. 425 p.
- Konhauser K.O., Ferris F.G. (1996) Diversity of iron and silica precipitation by microbial mats in hydrothermal waters, Iceland: Implications for Precambrian iron formations. *Geology*, 24(4), 323–326.
- Krajewski K.P., Cappellen P.V., Trichet J., Kuhn O., LuCas J., Martín-Algarra A., Prevot L., Tewari V.C., Gaspar L., Knight R.I. (1994) Biological processes and apatite formation in sedimentary environments. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 87, 701–746.
- Little C.T.S., Glynn S.E.J., Mills R.A. (2004) Four-Hundred-and-Ninety-million year record of bacteriogenic iron oxide precipitation at sea-floor hydrothermal vent. *Geomicrobiology Journal*, 21, 415–429. doi: 10.1080/01490450490485845
- Lowenstam H.A. (1981) Minerals formed by organisms. *Science*, 211, 1126–1131.
- Lowenstam H.A., Weiner S. (1989). *On Biomineralization*. New York, Oxford University Press, 324 p.
- Lupton J.E., Delaney J.E., Johnson H.P., Tivey M.K. (1985) Entrainment and vertical transport of deep-ocean water by buoyant hydrothermal plumes. *Nature*, 316, 621–623.
- Maslennikov V.V. (1999) *Sedimentogenesis, halmyrolysis and ecology of massive sulfide paleohydrothermal fields (on the example of the Southern Urals)*. Miass, Geotur, 348 p. (in Russian)
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R. (2007) Siliceous-ferruginous rocks of the Uzelginsky massive sulfide field (Southern Urals). *Lithosphere*, 2, 106–129 (in Russian)
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R. (2012) Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geology Reviews*, 47, 5–41. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.03.008>
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G. (2019) Mineralogical features of orediagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 9(3), 150. <https://doi.org/10.3390/min9030150>
- Maslennikov V.V., Cherkashov G.A., Firstova A.V., Ayupova N.R., Beltenev V.E., Melekestseva I.Yu., Artemyev D.A., Tseluyko A.S., Blinov I.A. (2023) Trace element assemblages of pseudomorphic iron oxyhydroxides of the Pobeda-1 hydrothermal field, 17°08.7' N, Mid-Atlantic Ridge: the development of a halmyrolysis model from LA-ICP-MS data. *Minerals*, 12(19). DOI: 10.3390/min13010004

- Maslennikov V.V., Zaykov V.V. (1991) On the destruction and oxidation of sulfide hills on the bottom of the Ural paleocean. *Doklady AN SSSR*, 319(6), 1434–1437 (in Russian)
- Mills R.F., Elderfield H. (1995) Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 59(17), 3511–3524. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00224-N](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00224-N).
- Perner M., Seifert R., Weber S., Koschinsky A., Schmidt K. (2007) Microbial CO₂ fixation and sulfur cycling associated with low-temperature emissions at the Lilliput hydrothermal field, southern Mid-Atlantic Ridge (9 degrees S). *Environmental Microbiology*, 9(5):1186–201 DOI: 10.1111/j.1462-2920.2007.01241.x
- Phoenix V.R., Konhauser K.O. (2008) Benefits of bacterial biomineralization. *Geobiology*, 6, 303–308. DOI: 10.1111/j.1472-4669.2008.00147.x.
- Revan M.K., Genç Yu., Delibaş O., Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Zimitoğlu O. (2019) Mineralogy and geochemistry of metalliferous sedimentary rocks from the Upper Cretaceous VMS deposits of the Eastern Pontides (NE Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 28, 299–327. doi: 10.3906/yer-1805-31.
- Robertson A.H.F., Boyle J.F. (1983). Tectonic setting and origin of metalliferous sediments in the Mesozoic Tethyan ocean: In Rona P., et al. (Eds.) In: *Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centres*. NATO Adv. Res. Inst., p. 595–664.
- Sagemann J., Bale S.J., Briggs D.E.G., Parkes R.J. (1999) Controls on the formation of authigenic minerals in association with decaying organic matter: an experimental approach. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 63, 1083–1095.
- Schwertmann U., Murad E. (1983) Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. *Clays Clay Minerals*, 31(4), 277–284.
- Singer P.C., Stumm W. (1970) Acid Mine Drainage: The Rate-Determining Step. *Science*, 167, 1121–1123. <http://dx.doi.org/10.1126/science.167.3921.112>.
- Slack J.F., Foose M.P., Flohr M.J.K., Scully M.V., Belkin H.E. (2003) Exhalative and seafloor replacement processes in the formation of the Bald Mountain massive sulfide deposit, northern Maine. In: Goodfellow WD, van Staal CR, McCutcheon SR, Thomas MD (eds) *Volcanogenic massive sulfide deposits of the Bathurst district, New Brunswick, and northern Maine. Economic Geology Monograph*, 11, 513–547.
- Thorseth I.H., Furnes H., Tumor O. (1995) Textural and chemical effects of bacterial activity on basaltic glass: an experimental approach. *Chemical Geology*, 119, 139–160. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00098-S
- Torsvik T., Furnes H., Muehlenbachs K., Thorseth I., Tumor H.O. (1998) Evidence for microbial activity at the glass-alteration interface in oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 162, 165–176. DOI: 10.1016/S0012-821X(98)00164-2
- Warren L.A., Ferris F.G. (1998) Continuum between sorption and precipitation of Fe(III) on microbial surfaces. *Environmental Science & Technology*, 32, 2331–2337.
- Westall F., de Wit M.J., Dann J., van der Gaast S., de Ronde C.E.J., Gerneke D. (2001) Early Archean fossil bacteria and biofilms in hydrothermally-influenced sediments from the Barberton greenstone belt, South Africa. *Precambrian Research*, 106, 93–116. DOI: 10.1016/S0301-9268(00)00127-3
- Yang B., Zeng Zh., Qi H., Wang X., Ma Y., Rong K. (2015) Constraints on Biotic and Abiotic Role in the Formation of Fe-Si Oxides from the PACMANUS Hydrothermal Field. *Ocean Science journal*, 50(4), 751–761. <http://dx.doi.org/10.1007/s12601-015-0067-4>.
- Zaykov V.V. (2006) Volcanism and sulfide mounds of the paleoceanic structures: by the example of Urals and Siberia massive sulfide bearing zones. Moscow, Nauka, 429 p. (in Russian)
- Zaykova E.V. (1991) Siliceous rocks of ophiolite associations (on the example of Mugodzhar). Moscow, Nauka, 134 p. (in Russian)
- Zierenberg R.A., Schiffman P. (1990) Microbial control of silver mineralization at a sea-floor hydrothermal site on the northern Gorda Ridge. *Nature*, 348, 155–157.

Информация об авторе

Аюпова Нурия Радитовна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Челябинская обл., Россия; aupova@mineralogy.ru

Information about the author

Nuriya R. Ayupova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; aupova@mineralogy.ru