

Магнезитовые микробиалиты Кундузакского проявления в коре выветривания Халиловского ультрабазитового массива (Южный Урал)

А. Ф. Георгиевский¹, Е. А. Жегалло², А. А. Георгиевский¹, В. М. Бугина¹, П. Э. Кайлачаков³,
К. А. Георгиевская⁴, В. Е. Марков¹, Е. В. Карелина¹

¹Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6,
e-mail: georgievskiy_af@pfur.ru

²Палеонтологический институт им. А.А. Борисьяка РАН, 117647, г. Москва, ул. Профсоюзная, 123,
e-mail: ezheg@paleo.ru

³Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: KPlaton@yandex.ru

⁴Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1,
e-mail: geo.klasha@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.2025 г., принята к печати 11.04.2025 г.

Объект исследования. Ранее неизвестные микробиалитовые магнезиты Кундузакского проявления Халиловского ультрабазитового массива Южного Урала. **Цель.** На примере кремнистых, фосфатных и карбонатных биолитов рассмотреть проблему микробного породообразования и проанализировать роль в этом процессе цианобактериальной биоты. Лабораторные опыты по минерализации цианобактериальных матов успешны, однако наблюдения в природе показывают, что продуктивность цианобактерий не определяется концентрациями химических элементов в среде обитания. При одинаковых условиях одна и та же популяция цианей то ведет себя нейтрально, то активно аккумулирует минеральное вещество. Причем не всегда аккумулируемый элемент является доминирующим в среде их обитания. Таким образом, есть все основания утверждать, что проблема цианобактериального породо- и рудообразования в полной мере еще не решена и для ее окончательного закрытия требуются дополнительные исследования. **Материалы и методы.** В ходе картирования Кундузакского проявления отбирались пробы магнезитов, которые, помимо исследований в прозрачных шлифах, изучались методами ISP, сканирующей электронной микроскопии, а также с помощью фазового, структурного и флуоресцентного рентгеновского анализа. Работы выполнялись в лабораториях РУДН, ИМГРЭ, ПИН РАН, РГГРУ. **Результаты.** Выявлен богатый комплекс минерализованных бактериальных форм, являющихся принципиальной особенностью строения магнезитов. Это фрагменты цианобактериальных матов и биопленок, кокковидные и палочковидные бактерии, остатки гликокаликса, чехлы нитчатых микрофоссилий, а также микробиота неясного систематического положения. Развитие в магнезитах биоморфоз позволяет провести параллель с процессами современного магнезитонакопления, связанного с деятельностью микробиального сообщества цианобактериальных матов. Последнее обстоятельство становится неопровержимым аргументом биогенной (биолитной) природы магнезита Кундузакского проявления. **Выводы.** В отложениях доюрской коры выветривания ультрабазитов выявлены ранее не описанные в литературе микробиалитовые магнезиты. Они относятся к “аморфному” промышленному типу руд и образуют пластовую залежь, чем кардинально отличаются от соседних месторождений, где магнезит концентрируется в виде штокверковых тел. Биолитовую природу магнезитов подтверждают разнообразные бактериальные структуры, а дополнительным признаком этих пород, очевидно, являются установленные аномалии Dy, Yb и Lu. Микробиалитовые магнезиты формировались в несколько этапов. Их прогнозные ресурсы оцениваются в 130 тыс. т.

Ключевые слова: цианобактериальные маты, бактериальные сообщества, псевдоморфозы, биолиты, кора выветривания, магнезит пластовый и прожилковый

Magnesite microbialites of the Kunduzak occurrence in the weathering crust of the Khalilovsky ultrabasic massif (Southern Urals)

Для цитирования: Георгиевский А.Ф., Жегалло Е.А., Георгиевский А.А., Бугина В.М., Кайлачаков П.Э., Георгиевская К.А., Марков В.Е., Карелина Е.В. (2025) Магнезитовые микробиалиты Кундузакского проявления в коре выветривания Халиловского ультрабазитового массива (Южный Урал). *Литосфера*, 25(4), 977-1000. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-977-1000>. EDN: RQXAIV

For citation: Georgievsky A.F., Zhegallo E.A., Georgievsky A.A., Bugina V.M., Kailachakov P.E., Georgievskaya K.A., Markov V.E., Karelina E.V. (2025) Magnesite microbialites of the Kunduzak occurrence in the weathering crust of the Khalilovsky ultrabasic massif (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 25(4), 977-1000. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-4-977-1000>. EDN: RQXAIV

© А.Ф. Георгиевский, Е.А. Жегалло, А.А. Георгиевский, В.М. Бугина, П.Э. Кайлачаков, К.А. Георгиевская, В.Е. Марков, Е.В. Карелина, 2025

Aleksei F. Georgievsky¹, Elena A. Zhegalo², Aleksandr A. Georgievsky¹, Viktoriya M. Bugina¹, Platon E. Kailachakov³, Klavdiya A. Georgievskaya⁴, Vladimir E. Markov¹, Elena V. Karelina¹

¹Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 6 Miklukho-Maklay st., Moscow 117198, Russia, e-mail: georgievskiy_af@pfur.ru

²A.A. Borisyak Paleontological Institute, RAS, 123 Profsoyuznaya st., Moscow 117647, Russia, e-mail: ezheg@paleo.ru

³Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS, 35 Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia, e-mail: KPlaton@yandex.ru

⁴M.V. Lomonosov Moscow State University University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia, e-mail: geo.klasha@yandex.ru

Received 28.01.2025, accepted 11.04.2025

Research subject. Previously unknown microbialitic magnesites of the Kunduzak occurrence of the Khalilovsky ultrabasite massif of the Southern Urals. **Aim.** On the example of siliceous, phosphate and carbonate biolites, to consider the problem of microbial rock formation and to analyze the role of cyanobacterial biota in this process. Despite successful laboratory experiments on mineralization of cyanobacterial mats, observations in nature show that the productivity of cyanobacteria is not determined by the concentrations of chemical elements in the habitat. Under the same conditions one and the same population of cyanobacteria behaves neutrally or actively accumulates mineral matter. Moreover, the accumulated element is not always dominant in their habitat. Thus, there is every reason to assert that the problem of cyanobacterial rock and ore formation has not been fully solved yet, and additional studies are required for its final closure. **Materials and methods.** During the geological mapping of the Kunduzak occurrence, samples of magnesites were taken, which were studied by ISP, scanning electron microscopy, as well as by phase, structural and fluorescence X-ray analysis, in addition to studies in transparent sections. The work was carried out in the laboratories of RUDN, IMGRE, PIN RAS, and RGGRU. **Results.** A rich complex of mineralized bacterial forms, which are a fundamental feature of the structure of magnesites, was revealed. These are fragments of cyanobacterial mats and biofilms, cocciform and bacilliform bacteria, remains of glycocalyx, covers of filamentous microfossils, as well as microbiota of unclear systematic position. The development of biomorphosis in magnesites allows us to draw a parallel with the processes of modern magnesite accumulation associated with the activity of the microbial community of cyanobacterial mats. The latter circumstance becomes an irrefutable argument of biogenic (biolitic) nature of magnesite of the Kunduzak occurrence. **Conclusions.** In the sediments of the pre-Jurassic weathering crust of ultrabasites, microbialitic magnesites previously undescribed in the literature have been revealed. They belong to the "amorphous" industrial type of ores, and form a bed deposit, which cardinally differs from the neighboring deposits, where magnesite is concentrated in the form of stockwork bodies. The biolitic nature of magnesites is confirmed by a variety of bacterial structures, and an additional feature of these rocks, obviously, are the established anomalies of Dy, Yb and Lu. Microbialitic magnesites were formed in several stages. Their inferred resources are estimated at 130 thousand tons.

Keywords: cyanobacterial mats, bacterial communities, pseudomorphosis, bioliths, weathering crust, bedded and vein magnesite

ВВЕДЕНИЕ

В научной литературе термин "биолит" закрепился в начале XX в. благодаря работам крупного геолога-естествоиспытателя, одного из основоположников отечественной школы литологии, профессора Я.В. Самойлова. Развивая и дополняя идеи академика В.И. Вернадского о ведущей роли живого вещества в становлении осадочной оболочки планеты, Я.В. Самойлов выделил породные комплексы (биолиты), возникшие благодаря жизнедеятельности организмов. Помимо биогенных известняков, в группу "биолитов" им отнесены фосфориты, силициты, фитогенные породы, железомарганцевые и медно-осадочные руды. Так же, как и В.И. Вернадский, Я.В. Самойлов активно развивал идеи о рудообразующей роли организмов, способности их формировать месторождения различных полезных ископаемых и подчеркивал особую важность в этом процессе бактериальных сообществ (Самойлов, 1921, 1929). На современном этапе гео-

логических исследований представления о биогенном рудогенезе приобрели статус своеобразных аксиом, которыми руководствуются геологи в практической и научной работе. Во многом это стало возможным благодаря массовому использованию методов электронной микроскопии при изучении осадочных руд, что позволило установить в этих образованиях широкое развитие разнообразных минерализованных бактериальных комплексов (остатки цианобактерий, гифы актиномицет, кокки, фрагменты гликокаликса и др.). Сейчас не вызывает сомнения существование в природе микробиолитов алюминия, железа, марганца, фосфора, сульфидных минералов и даже урана, золота и РЗЭ (Амосов, Васин, 1993; Моисеенко и др., 1999; Жегалло, Розанов, 2002; Wawden et al., 2003; Астафьева и др., 2005; Пиневич, 2005; Блюман, 2009; Антошкина, 2011; Канаева, Канаев, 2012; Старостин, Сакия, 2015; Розанов и др., 2016; Авдонин и др., 2019; Добрецов и др., 2021; Дойникова, Петров, 2022). Их возрастной диапазон – от архея (тухоли-

ты с Au и U Витватерсранда) до современных рудных стяжений Мирового океана (зерна, конкреции, корки Fe-Mn и P, сульфидные постройки “черных курильщиков”) (Леин и др., 2000; Астафьева и др., 2005; Пиневиц, 2005; Southam et al., 2009; Антошкина, 2011; Старостин, Сакия, 2015; Розанов и др., 2016; Biondi, Lopez, 2017).

Очевидно, к своеобразным биолитам следует также отнести латеритные коры. Как показано в работах (Школьник и др., 2004; Слукин и др., 2016; Новиков и др., 2017; Георгиевский и др., 2019), их формирование происходит при непосредственном участии микробных сообществ, которые в ходе выветривания активно разрушают минералы материнских пород и синтезируют на их месте новые минеральные комплексы. Здесь важно подчеркнуть, что, несмотря на наши поверхностные знания о микробном рудообразовании, присутствует определенная закономерность в рудообразующей деятельности микроорганизмов. На начальных этапах этого процесса обычно задействованы низшие формы грибов и нитчатые прокариоты, тогда как на пике его развития главная роль в преобразовании вещества принадлежит бациллам и коккам различной морфологии (Георгиевский и др., 2019). При этом важнейшим фактором для активной деятельности отмеченной микробиоты являются обстановки свободной циркуляции вадозных вод по профилю латеритной коры выветривания. Благодаря этому создаются условия для химически неустойчивого состояния минералов, что, в свою очередь, значительно усиливает разрушительный эффект от деятельности микробиоты.

Если оценивать микроорганизмы с точки зрения эффективности накопления рудного вещества, то многие исследователи особо отмечают цианобактериальные сообщества (Розанов, Жегалло, 1989; Школьник и др., 1999; Герасименко и др., 2002; Розанов, 2002; Жегалло и др., 2002; Герасименко, 2002; Школьник и др., 2004; Антошкина, 2011; Розанов и др., 2016). Их минерализованные остатки фиксируются в магнетитовых, марганцевых, золотосносных, урановых и фосфоритовых рудах, возраст которых колеблется от архея до кайнозоя (Леин и др., 2000; Старостин, Сакия, 2015; Авдонин и др., 2019). Не вызывает сомнений, что столь широкая рудная специализация цианобиоты объясняется двумя основными причинами. Во-первых, способностью существовать в самых различных обстановках, вплоть до экстремальных, а во-вторых, “умением” не только накапливать необходимые для жизни вещества, но и нейтрализовывать токсичные соединения, формируя из них вокруг клеток защитные минеральные чехлы (Розанов, Жегалло, 1989; Жегалло и др., 2002; Герасименко, 2002; Жегалло и др., 2021). Пока не удастся достоверно “нащупать” пороговые концентрации химических элементов, которые для цианобактериальных сообществ из

жизненно необходимых превращаются в смертельно опасные. Имеющиеся результаты экспериментов заметно расходятся с природными, натурными наблюдениями. Показательными в этом отношении являются сравнительные данные о способности цианобактерий аккумулировать кремнистые, фосфатные и карбонатные минералы в естественных и искусственных (лабораторных) условиях. Важно подчеркнуть, что во всех трех случаях лабораторные опыты моделировали обстановки жизнедеятельности бактерий в средах с пересыщенными растворами, в то время как в природе эти организмы распространены намного шире, включая места обитания, где воды содержат кремний, карбонат и фосфор в мизерных количествах.

Цианобактериальный фактор и кремнеаккумуляция. Иллюстрацией сказанного служат материалы, опубликованные в работах, посвященных деятельности цианобактериальных сообществ в термальных источниках Байкальской рифтовой зоны (Сорокиной, 2008). Как установлено, видовой состав микробиоты во всех гидротермах весьма разнообразен, однако наиболее распространенными являются цианеи вида *Leptolyngbya laminosa* (*Mastigocladus laminosus*). В табл. 1 приведены основные параметры термальных вод, в которых обитают микроорганизмы.

В справочнике по геохимии В.В. Иванова (1994) указаны следующие значения растворимости аморфного кремнезема в зависимости от температурных условий среды, мг/л: 0°C – 70, 25°C – 120, 90°C – 340. В пересчете на элементный кремний это отвечает концентрациям 32.6, 55.9 и 158.4 мг/л. Близкие данные приводит К. Краускопф (1958). Таким образом, воды Байкальских термальных источников существенно не насыщены относительно кремния. Однако в трех из них (Котельниковский, Змеиный, Хакусы) (см. табл. 1) происходит его активное цианобактериальное накопление. Все это выглядит довольно странно, поскольку опять же, по данным Е.Г. Сорокиной (2008), наибольшая плотность и разнообразие микробиоты как раз характерны для вод остальных пяти источников, но именно в них кремнеаккумуляция протекает крайне вяло. При этом даже беглый анализ табл. 1, показывает, что основные характеристики геохимических параметров вод источников в целом сопоставимы и перекрывают во многом друг друга. Такая ситуация плохо поддается логичному объяснению. Результаты выполненных разными авторами лабораторных экспериментов также не проясняют избирательность биоты к кремнию, поскольку перед ними не стояла задача изучения цианобактериальных сообществ в слабоминерализованных средах (Крылов и др., 1988; Toporski et al., 2002; Benning и др., 2005). Вместо этого ставились опыты с цианобактериями по моделированию обстановок содовых озер и гейзеровых источников, пересыщен-

Таблица 1. Физико-химические условия гидротерм (Сороковикова, 2008)**Table 1.** Physico-chemical conditions of hydrotherms (Sorokovikova, 2008)

Источник воды	T, °C	pH	O ₂	(PO ₄) ⁻³	Si
			мг/л		
Котельниковский	70	9.28	0.00	0.011	71.28
Змеиный	45	9.33	0.00	0.652	22.73
Хакусы	46	8.68	3.06	0.000	7.91
Давшинский	35	8.93	2.70	0.015	25.17
Жемчуг	55	6.91	8.351	0.839	10.278
Аршан	36	6.66	0.221	0.021	7.006
Горячинский	44	7.56	0.00	0.000	17.6
Сухинский	37	6.93	0.102	0.102	21.5

ные воды которых рассматриваются как аналоги вод архейских водоемов (Заварзин, Жилина, 2000). Именно в ходе таких исследований с высокоминерализованными растворами (300–1400 мг/л Si) удалось проследить реакцию микробиоты на враждебный характер окружающей среды и непосредственно наблюдать, как цианобактерии осаждают кремнезем, строя вокруг клеток защитные трубки – чехлы из опала. Остатки последних буквально переполняют гейзеритовые породы и постройки гидротермальных источников (Жегалло и др., 2021).

Таким образом, существование в природе кремневых цианобиолитов не вызывает сомнений, но условия их формирования до конца остаются не раскрытыми.

Цианобактериальный фактор и фосфатонакопление. Похожая картина, но несколько иного плана проявляется при анализе взаимоотношений цианобактерий и фосфатного вещества. Генетическая связь между ними – факт бесспорный. Доказательствами служат установленные в фосфоритах разных стран фрагменты бактериальных чехлов, а также развитие в древних толщах строматолитовых и онколитовых фосфоритовых руд, запасы которых могут достигать промышленных масштабов (месторождение Джамокорта в Индии, Боксонское месторождение в Юго-Восточных Саянах) (Герасименко и др., 1999; Школьник и др., 1999; Мануковский, Беляев, 2000; Герасименко, 2002; Розанов, 2002; Жегалло, Розанов, 2002; Герасименко, 2002; Ильин, 2008; Георгиевский, Бугина, 2019). Наконец, лабораторными испытаниями показана способность цианей в сильно концентрированных и пересыщенных растворах аккумулировать фосфат в виде минеральных чехлов (Герасименко и др., 1996, 1998; Герасименко, 2002). Как установлено опытами, микробные сообщества чувствуют себя комфортно в средах с содержанием растворенного фосфора от 4 мг/л (Герасименко и др., 1996, 1998; Герасименко, 2022) до 18 мг/л (Тихомирова, Орлеанский, 1994). С увеличением его доли с 36–40 мг/л (Герасименко и др., 1996; Герасименко, 2002) до 50 мг/л (Тихомирова, Орлеанский, 1994)

количество элемента становится предельно опасным для жизни микроорганизмов. Клетками такой токсичный фосфор утилизируется сначала в форме внутренних полифосфатных валутиновых микрогранул, а затем в виде чехлов вокруг трихом цианобактерий (Гончарова, Герасименко, 1993; Тихомирова, Орлеанский, 1994). При концентрациях фосфора выше 77.42 мг/л происходит гибель клеток и их минерализация (Гончарова, Герасименко, 1993; Герасименко и др., 1996, 1998). Исходя из полученных результатов сделан вывод: для литификации цианобактериальных матов и образования строматолитов требуется более мощный подток кальция, карбонатов, фосфатов, чем есть в современных водах (Герасименко, 2002). Однако данное заключение не следует воспринимать однозначно. На Земле известны пусть и уникальные, но реально существующие обстановки, где содержания растворенных фосфатов достигают чрезвычайно высоких значений. Речь идет о содовых озерах с богатейшим миром алкалофильной биоты, основу которой составляют цианобактериальные сообщества (Герасименко и др., 1996; Jones et al., 1998; Заварзин, Жилина, 2000; Toner, Catling, 2019). Принципиальной особенностью таких водоемов является запредельная обогащенность вод фосфором с концентрациями в десятки, а то и в сотни миллиграмм на литр (Friedman et al., 1976; Заварзин, Жилина, 2000; Toner, Catling, 2019). Наглядными примерами служат щелочные озера Калифорнии и Британской Колумбии, рифтовые озера Африки. По данным американских и канадских исследователей, в отдельные засушливые сезоны содержания фосфатов здесь доходят до уровня 30–1500 г/л (Eugster, 1970; Friedman et al., 1976; Jones et al., 1977; Renaut, Long, 1989; Hirst, 2013; Toner, Catling, 2019). Это в несколько раз больше, чем в илах апвеллинговых зон океанов, где протекает современное фосфатонакопление (1.3–40.0 мг/л) (Батурин, 1978). Однако у цианобиоты такое положение вещей не вызывает никакой отрицательной реакции. Она продолжает активно развиваться, но (и это важно) ее деятельность не сопровождается накоплением фосфо-

ра. Вместо него цианеи массово аккумулируют карбонаты, строя из них крупные (в несколько метров) строматолитоподобные постройки (Kemper et al., 1991). Причины подобной ситуации вряд ли связаны с гиперсоленостью содовых озер, поскольку в той же Британской Колумбии и на п-ове Юкатан, а также в Мексике известны пресноводные (слабоминерализованные) водоемы, где цианобактериями созданы не менее внушительные карбонатные сооружения (Gischler et al., 2008). Вместе с тем сразу следует сказать, что не только механизм ранее отмеченной кремнисто-фосфатной, но и самой микробной карбонатной аккумуляции до конца остается не раскрытым.

Цианобактериальный фактор и карбонатнакопление. Результаты изучения современных строматолитов и их древних аналогов, а также многочисленные лабораторные опыты с цианобиотой позволили смоделировать основные процессы карбонатного строматолитообразования. Однако установить, какие факторы и какая микробиота контролируют накопления известкового (кальцитового, арагонитового), доломитового, хантитового, гидромагнезитового и собственно магнезитового карбонатного вещества, все еще не представляется возможным.

Очевидно, не будет большой ошибкой утверждение, что меньше всего литологи и микробиологи понимают механизм цианобактериальной седиментации магнезита и других связанных с ним магнезиальных соединений. Причин здесь несколько.

Во-первых, среди карбонатных отложений магнезиты имеют весьма ограниченное распространение и в большинстве своем представляют хорошо раскристаллизованные породы, в которых первичные структурно-текстурные признаки интенсивно затушеваны процессами перекристаллизации. Вероятно, этим объясняется весьма ограниченное число публикаций, где приводятся сведения (часто дискуссионные) о развитии в магнезитах текстур цианобактериальных матов (Valdiya, 1968; Ивлев, Пустыльников, 1982; Хайрулина и др., 1990; Кузнецов, 2004). Во-вторых, как и для доломита, учеными окончательно не решена проблема низкотемпературного синтеза магнезита. Практически все представления специалистов о кристаллизации этого минерала базируются на экспериментах, проведенных в условиях повышенных температур (90–150°C) и давлений (10 МПа) (Казаков и др., 1957; Hänchen et al., 2008; Saldi et al., 2009; Bénézeth et al., 2011; Xu et al., 2013; Santos, 2023). Что же касается низкотемпературного (хемогенного) магнезита, то его наличие зафиксировано только в отдельных опытах с параметрами, довольно далекими от реальных природных обстановок (Sayles, Fyfe, 1973; Möller, 1989; Deelman, 1999; Pokrovsky, Schott, 1999; Dos Anjos et al., 2011; Xu et al., 2013; Power et al., 2017; Deelman, 2021; Vandeginste, 2021; San-

tos, 2023). При этом остается неясным, образуется ли он в результате прямого осаждения или его появление связано с превращениями друг в друга метастабильных магнезиальных фаз, которые последовательно выпадают из растворов при изменении их физико-химических показателей (Davies, Bubella, 1973; Möller, 1989; Hänchen et al., 2008; Dos Anjos et al., 2011; Sanz-Montero et al., 2012; Deelman, 2012; Power et al., 2019; Novoselov et al., 2019; Santos, 2023). Очевидно, также не следует исключать возможность существования в природе обоих отмеченных вариантов кристаллизации магнезита. В-третьих, нет однозначного понимания роли бактериальных сообществ в его формировании. Одни геологи, в лучшем случае, рассматривают микробиоту как возможный катализатор химических трансформаций промежуточных магниевых соединений при их переходе в магнезит. Другие, с учетом данных по современным магнезитовым отложениям, расценивают деятельность цианобактериальных матов как главный фактор образования магнезита. Считается, что цианеи либо формируют в окружающих водах геохимический фон, благоприятный для осаждения минералов магнезита, либо концентрируют его в клеточных тканях, где он в дальнейшем переходит в магнезит или гидромагнезит (Renaut, 1993; Power et al., 2007, 2009, 2019; Kazmierczak et al., 2011; Shirokova et al., 2013; Щербакова, 2018; Sanz-Montero et al., 2019).

Проблема биогенных магнезитов тесно переплетается с вопросами, связанными со средой обитания микробиоты и условиями седиментации осадков. Если брать за основу современные обстановки накопления магнезитовых минералов, то картина получается довольно пестрой. Обстановки меняются от равнинных пространств до обширных горных плато, от эвапоритовых лагун и приморских озер до внутриконтинентальных пересыхающих пресноводных заболоченных водоемов, от аридных и гумидных зон до регионов с субарктическим и даже антарктическим климатом. И во всех перечисленных случаях устанавливаются признаки активной деятельности бактериальных организмов, среди которых главная роль принадлежит микробным сообществам цианобактериальных матов (Renaut, 1993; Power et al., 2007, 2009, 2019; Kazmierczak et al., 2011; Shirokova et al., 2013; Щербакова, 2018; Sanz-Montero et al., 2019; Novoselov et al., 2019).

Таким образом, как видно из изложенного выше, затронутые вопросы о роли микробиоты в кремне-, фосфато- и магнезитообразовании все еще далеки от окончательного решения. Вместе с тем актуальность этой проблемы очевидна, поскольку изучение микробного литогенеза имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Ведь знания поведения химических элементов под воздействием микроорганизмов значительно расширяют возможности поисковых работ как отмеченных

выше, так и других рудных и нерудных полезных ископаемых.

Новые данные по обстановкам микробиально-го образования магнетитов получены при изучении коры выветривания ультрабазитов Халиловского массива, расположенного в Гайском районе в Вознесенско-Присакмарской структурной зоне Южного Урала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фактическим материалом для статьи послужили данные картирования магнетитового проявления Кундузак, выявленного на севере массива в 10 км севернее станции Халилово Южно-Уральской железной дороги (рис. 1).

Отобранные пробы, помимо шлифов (поляризованный микроскоп ПОЛАМ Л213М), изучались с помощью фазового, структурного (дифрактометр

ДРОН-4) и флуоресцентного (спектрограф ДФС-8) рентгеновского анализа, также для исследования привлекались методы ISP (масс-спектрометр ELAN-6100) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (прибор CamScan-4). Аналитические работы проводились в лабораториях РУДН, ИМГРЭ, ПИН РАН, РГГРУ. Цель исследований – проанализировать существующие представления о роли цианобиоты в образовании разных осадочных полезных ископаемых, а также показать в разных ракурсах особенности кундузакского магнетита и доказать активное участие в его формировании бактериальных сообществ.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЯВЛЕНИИ КУНДУЗАК

Рассматриваемый объект площадью около 6 км² заключен между двумя шоссейными автодорогами

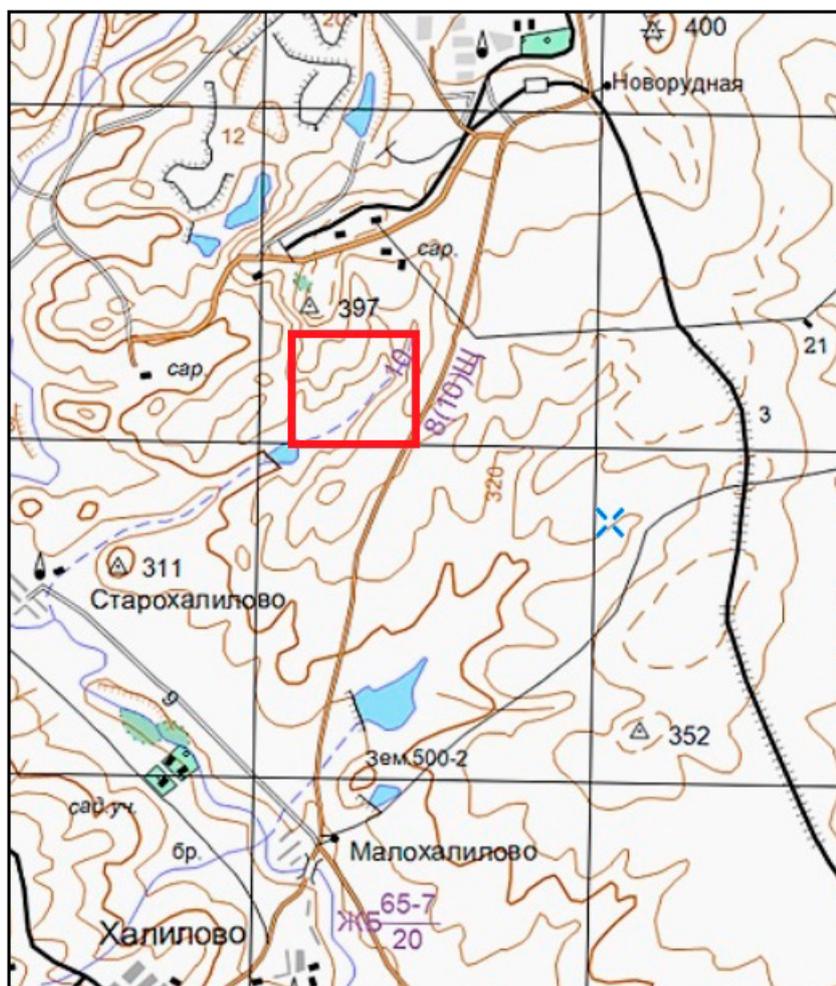


Рис. 1. Местоположение проявления магнетита Кундузак в пределах Халиловского ультрабазитового массива (Южный Урал).

Fig. 1. Location of the Kunduzak magnetite occurrence within the Khalilovskiy ultrabasic massif (Southern Urals).

(см. рис. 1), а его геологическим ограничением служат выходы серпентинитов, которые хорошо видны в бортах мелкого ручья, протекающего в юго-западном направлении.

По предварительно оцененным запасам Кундузак обладает очевидным промышленным потенциалом, несмотря на его принадлежность к инфильтрационному типу, который связан с доюрской корой выветривания и считается на Южном Урале низкопродуктивным. Принципиальное значение имеет сопоставление строения разрезов коры выветривания Халиловского массива и его Кундузакского участка (рис. 2).

На Халиловском массиве в основании коры выветривания развиты выщелоченные ультрабазиты, в пустотах и трещинах которых отлагался магнетит в виде разнообразных жил и штокверков. Выше по разрезу развиты нонтронитовые глины с никелевой минерализацией и с включениями конкреций белоснежного кахолонга. Далее следует горизонт бурых железняков, сложенный из охр, оолитовых руд, ожелезненных и силицифицированных серпентинитов. Общая мощность коры выветривания колеблется от 30 до 50 м (Никифоров, 2003; Бетехтин, 2023).

В отличие от описанного разреза на участке Кундузак из профиля коры выветривания выпадает зона нонтронитовых глин (см. рис. 2). Этот факт является показательным, так как свидетельствует о самостоятельном развитии Кундузакского тектонического блока в пределах Халиловского массива. Совершенно очевидно, что его обособленное воздымание стало причиной размыва коры выветривания, включая горизонт смектитовых глин. В результате сформировался непосредственный контакт выщелоченных гипербазитов с горизонтом бурых железняков. Иначе говоря, современный профиль коры выветривания на Кундузаке образовался благодаря повторному выветриванию сохранившихся от размыва реликтов “древнего” разреза. На такой сценарий развития геологических процессов, помимо факта выпадения из разреза глин, указывают включения магнетита, которые встречаются среди бурых железняков.

Еще одним отличием Кундузакского проявления служит линзовидно-пластовая форма рудного тела мощностью до 5 м. Подобная морфология, как известно, совершенно не свойственна магнетитовым месторождениям коры выветривания гипербазитов, включая месторождения Халиловского массива с жильно-штокверковой минерализацией. На Кундузакском проявлении такая минерализация выражена слабо ($\approx 10\%$) и в основном приурочена к подошве пластовой залежи.

Отмеченные особенности локализации магнетита обусловили развитие двух основных типов руд: пластовых и прожилковых (рис. 3).

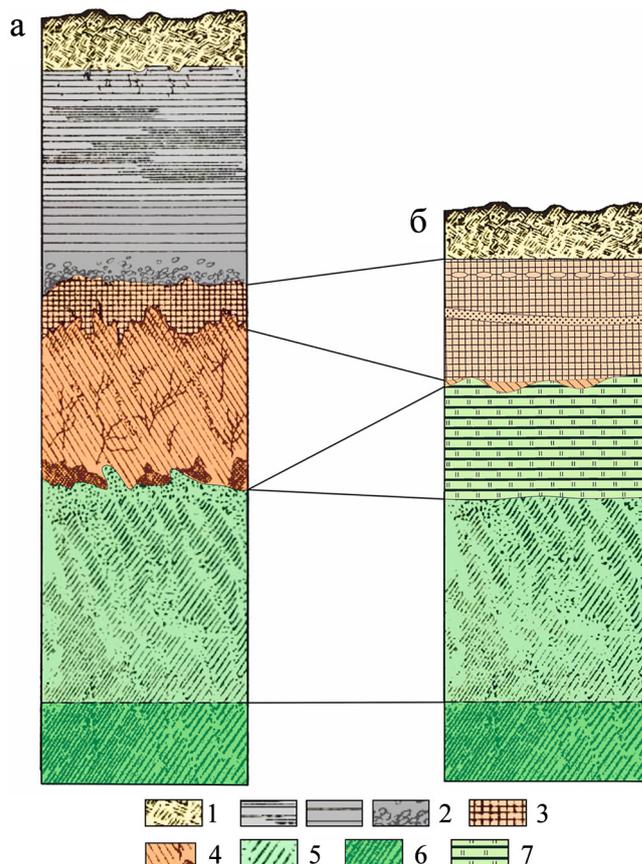


Рис. 2. Строение коры выветривания Халиловского массива (а) (Бетехтин, 2023) и участка Кундузак (б).

1 – современная почва; 2 – песчано-глинистые осадочные породы мезозойского возраста, прикрывающие древнюю кору выветривания; 3 – самый верхний слой древней коры выветривания, сложенный железистыми охрами; 4 – зона нонтронитизации с гидросиликатами никеля и гидроокислами марганца; 5 – зона развития прожилкового магнетита; 6 – первичные породы серпентиниты; 7 – магнетитовое тело.

Fig. 2. Structure of the weathering crust of the Khalilovskiy massif (a) (Betekhtin, 2023) and the Kunduzak site (b).

1 – modern soil; 2 – sandy-clay sedimentary rocks of Mesozoic age covering the ancient weathering crust; 3 – the uppermost layer of the ancient weathering crust, composed of ferruginous ochres; 4 – nontronitization zone with nickel hydrosilicates and manganese hydroxides; 5 – development zone of veined magnesite; 6 – primary rocks serpentinites; 7 – magnesite the body.

Общим признаком для них является фарфоровидный облик выделений магнетита, нередко с почкообразным метаколлоидным строением у пластовых (массивных) руд (см. рис. 3). Последнее обстоятельство, вероятно, служит признаком осаждения минерала из коллоидных растворов.

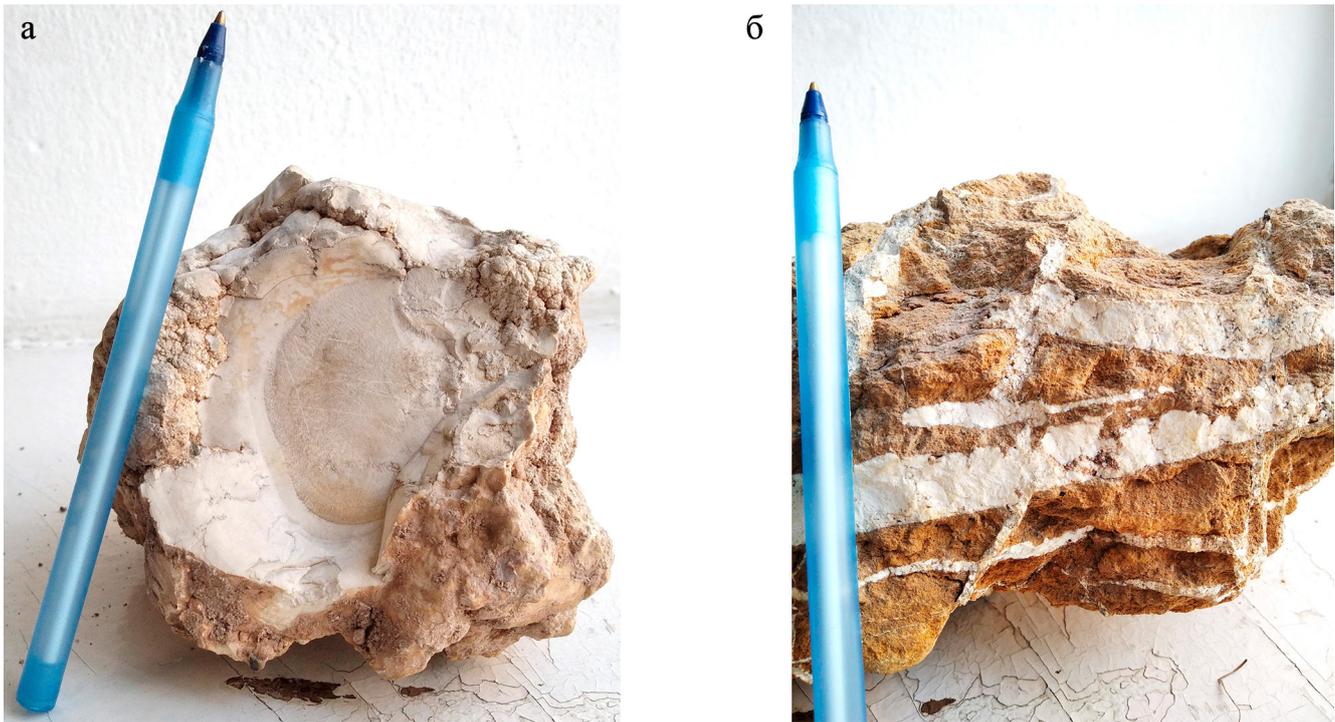


Рис. 3. Пластовый (массивный) (а) и прожилковый (б) типы руд Кундузакского проявления.

Fig. 3. Massive (a) and veined (б) types of ores of the Kunduzak occurrence.

Результаты изучения вещественного состава магнезитов

Выделенные разновидности магнезитов, за исключением форм их обособления (жилвные, пластовые) и текстурных особенностей, представляют собой близкие образования. В незагрязненных пробах это белые, прочные, монолитные породы с раковистым изломом и скрытокристаллическим (“аморфным”) строением, типичным для магнезитов всего Халиловского массива (см. рис. 3).

Вместе с тем, несмотря на внешнее сходство, есть и определенные различия в этих минеральных образованиях. Прежде всего, это касается твердости двух разновидностей магнезитов. Твердость пластового магнезита по шкале Мооса составляет 6 единиц, прожилкового – 4.5. Обычно повышенную твердость магнезита связывают с присутствием в нем кремнистых минералов. Однако в нашем случае, судя по химическому составу (табл. 2), образцы пластового магнезита практически мономинеральны. Учитывая это, причины повышенной твердости, очевидно, надо искать в “аморфном” строении проб. Результаты СЭМ показывают, что так называемая аморфная масса магнезитов представляет собой субмикроразделенный агрегат, раскристаллизация которого заметно различается в двух типах руд. Как видно на рис. 4, при одинаковых увеличениях в

прожилковых разностях размер кристаллических частиц составляет 25 мкм, тогда как в пластовом магнезите их размер в большинстве случаев не превышает 5 мкм. Буровикам хорошо известна связь между структурными характеристиками пород и их прочностью и твердостью. По В.С. Федорову, прочность и твердость горных пород выше, когда размер составляющих их зерен меньше (Федоров, 1951; Нескоромных, 2012). Таким образом, если верить буровикам, причина различия твердости магнезита руд проявления Кундузак обусловлена особенностями субмикроскопического их строения. Помимо сказанного, здесь следует еще отметить характер плотности магнезитов. Она пусть незначительно, но все же больше в пластовых рудах (3.15 г/см^3) относительно прожилковых (3.0 г/см^3). Этот факт, очевидно, также можно связать с отмеченным структурным (размерным) различием зерен в двух минеральных агрегатах магнезитов.

Параметры элементарной ячейки в обоих случаях близки и составляют для пластового магнезита: $a = 4.637 \text{ \AA}$, $c = 15.028 \text{ \AA}$, для прожилкового – $a = 4.633 \text{ \AA}$, $c = 15.004 \text{ \AA}$. Несколько занижены показатели у прожилкового магнезита, возможно, в связи с наличием дефектов в кристаллической решетке минерала (Окишев, 2007).

Показатель преломления скрытокристаллических агрегатов магнезита $n = 1.608$.

Таблица 2. Сравнение химического состава магнезитовых руд проявления Кундузак и Халиловского массива, мас. %

Table 2. Comparison of the chemical composition of the magnesite ores of the Kunduzak and Khalilovskiy massif, wt %

Магнезиты	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	K ₂ O	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
Пластовые*	47.1	0.13	0.36	0.01	0.01	0.37	0.02	0.11
Прожилковые*	45.9	0.07	2.95	0.01	0.01	0.43	0.01	0.09
Халиловский**	43.3–47.4	0.1–0.8	0.2–4.7	–	–	0.5–4.6	–	–

*Данные авторов (средние значения из 10 проб).

**По (Пальгова, 2015).

Примечание. Теоретический состав магнезита: MgO – 47.6 мас. %, CO₂ – 52.4 мас. % (Бетехтин, 2023). Прочерки – значения не определялись.

*Authors' data (average values from 10 samples).

**According to (Pal'gova, 2015).

Note. Theoretical composition of magnesite: MgO – 47.6 wt %, CO₂ – 52.4 wt % (Betehtin, 2023). Dashes – the values were not determined.

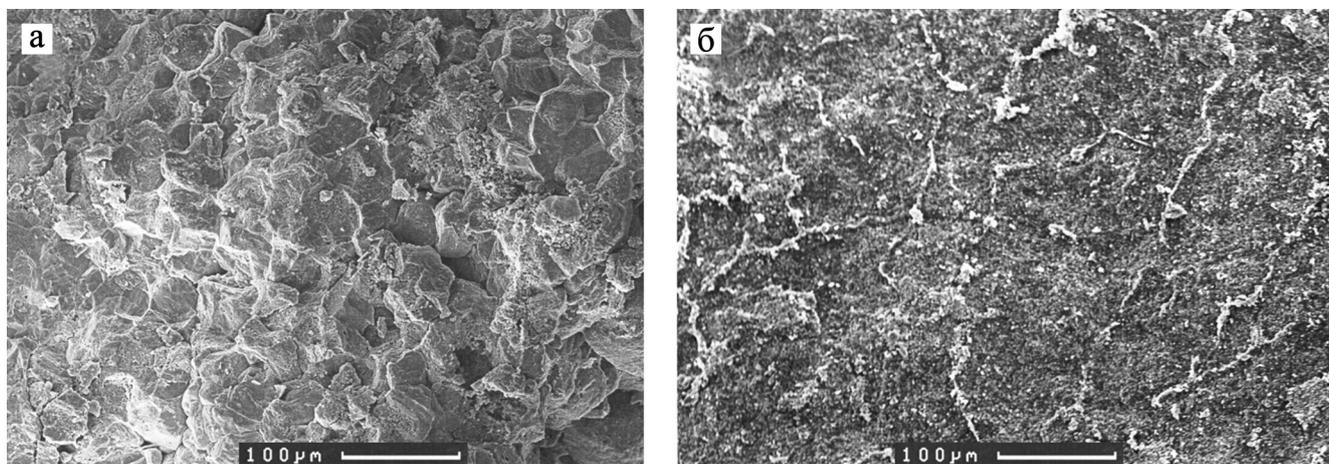


Рис. 4. Структура прожилкового (а) и пластового (б) магнезита по данным сканирующей электронной микроскопии.

Fig. 4. The structure of veined (a) and massive magnesite (b) according to scanning electron microscopy.

Химический состав руд приведен в табл. 2. Как видно из нее, содержания основных компонентов в магнезитах проявления Кундузак в целом укладываются в средние значения по магнезитовым рудам Халиловского массива. В то же время, если сопоставлять между собой разновидности кундузакских руд, то пластовый их тип по качеству заметно лучше прожилкового магнезита. В первом случае это практически мономинеральные образования, в то время как прожилковые руды явно загрязнены и содержат в повышенных количествах посторонние примеси, главными из которых, очевидно, являются минералы кремния.

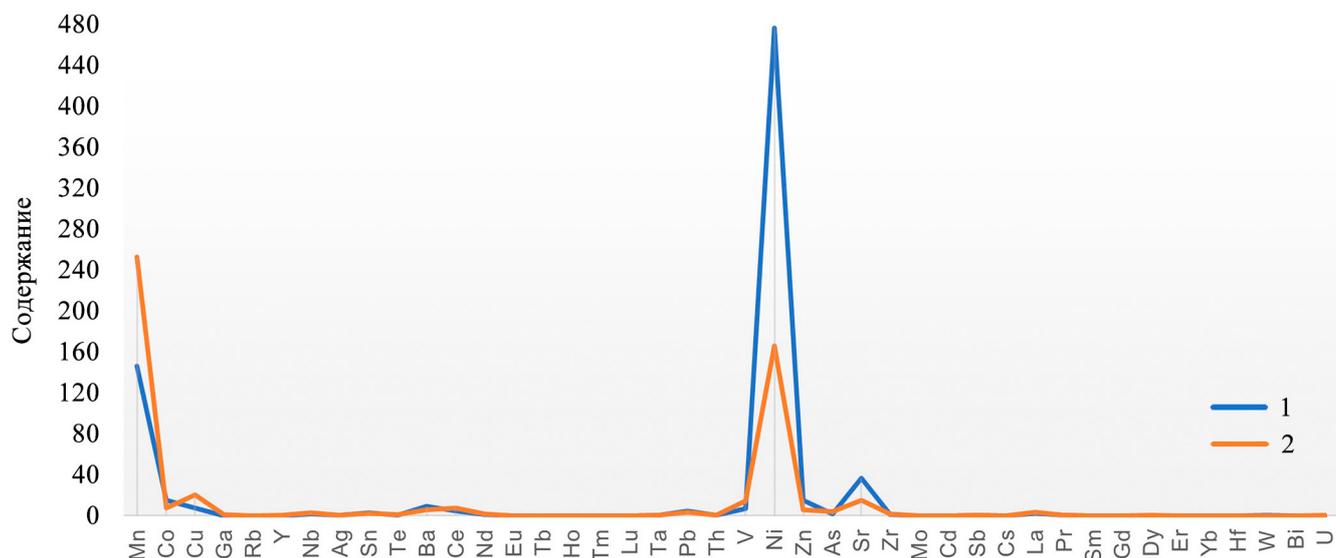
Состав микроэлементов магнезитов приведен в табл. 3. Для понимания соотношений элементов в этих образованиях на рис. 5 показан график их вариаций. Как видно из таблицы и графика, на общем сглаженном фоне содержания эле-

ментов магнезиты наиболее ярко отличаются по концентрациям Ni, Mn и, в какой-то степени, Sr (см. рис. 5).

Совершенно очевидно, что установленные содержания в магнезитах Ni – это отголоски ранее существовавших на проявлении Кундузак никеленосных кор выветривания серпентинизированных гипербазитов. Причем, высокие концентрации элемента в прожилковых рудах относительно пластовых, можно трактовать как признак их формирования на начальных этапах корообразования, когда циркуляция никеленосных магниевых растворов по трещинам пород происходила наиболее активно. Что касается пластовых руд, пониженные содержания в них никеля, очевидно, связаны с повторным формированием коры выветривания, но уже серпентинитов, истощенных предыдущим корообразованием.

Таблица 3. Содержание микропримесей в магнезитах проявления Кундузак, г/т**Table 3.** The content of trace impurities in magnesites of the Kunduzak occurrence, ppm

Элемент	Магнезиты						
	Пластовые			Прожилковые			
Co	7.37	Mo	0.023	Co	15.1	Mo	0.00
Ag	0.744	Sb	0.257	Ag	0.664	Sb	0.21
V	14.3	Te	0.752	V	6.89	Te	0.569
Cu	20.3	Zr	1.82	Cu	7.64	Zr	1.32
Pb	3.11	Cd	0.021	Pb	4.45	Cd	0.013
Zn	5.83	Cs	0.01	Zn	15.1	Cs	0.00
As	3.72	Sn	2.14	As	1.79	Sn	3.0
Mn	253	Ta	0.293	Mn	146	Ta	0.191
Ni	166	Nb	2.73	Ni	477	Nb	1.44
Ga	0.81	Hf	0.046	Ga	0.024	Hf	0.055
Rb	0.047	W	0.133	Rb	0.00	W	0.658
Sr	14.8	Bi	0.007	Sr	36.8	Bi	0.005
Ba	5.58	Th	0.407	Ba	9.46	Th	0.266
Y	0.216	U	0.33	Y	0.154	U	0.037

**Рис. 5.** Содержание микроэлементов в магнезитах проявления Кундузак, г/т.

1 – прожилковые, 2 – пластовые.

Fig. 5. The content of trace elements in magnesites of the Kunduzak occurrence, ppm.

1 – veined, 2 – stratified.

Похожая картина намечается и для стронция. Его содержание в магнезитах (см. табл. 3) сопоставимо с кларковыми концентрациями (КК) в ультрабазитах (КК = 1.48–3.68) (Войткевич и др., 1977; Иванов, 1994). Это дает основание предполагать, что стронций в магнезитах, как и никель, связан с двумя этапами выветривания серпентинизированных ультрабазитов и механизм накопления этих элементов проходил по описанному выше сценарию.

Присутствие марганца, а также других микропримесей, чьи концентрации в пластовых магнезитах заметно выше, чем в прожилковых разностях (см. табл. 3, рис. 5), скорее всего, отражает участие микробиоты в магнезитообразовании. Доказательной базой сказанного служат изложенные ниже материалы, а возможности бактериальных комплексов в накоплении элементов показаны в работах (Амосов, Васин, 1993; Моисеенко и др., 1999; Жегалло, 2002; Розанов, 2002; Bawden et al., 2003;

Астафьева и др., 2005; Блюман, 2009; Антошкина, 2011; Канаева, Канаев, 2012; Старостин, Сакия, 2015; Авдонин и др., 2019; Добрецов, 2021; Дойникова, Петров, 2022).

Редкоземельные элементы (РЗЭ) в магнетитах проявления Кундузак

Комплекс редкоземельных примесей приведен в табл. 4. Их соотношения, нормированные по хондриту (Evensen et al., 1978), показаны на рис. 6.

Как видно из таблицы, магнетиты характеризуются мизерными содержаниями лантаноидов (8.4–13.6 г/т), но это все же почти в два раза больше, чем в кристаллических магнетитовых рудах Южно-Уральской провинции (Крупенин, 2005). Кроме того, между собой магнетиты Кундузакского проявления заметно различаются по редким землям. Так, прожилковый тип руд, несмотря на наличие посторонних примесей, характеризуется существенно заниженной суммой РЗЭ (8.37 г/т) относительно пластовых разностей магнетита (13.36 г/т). Причина,

Таблица 4. Содержание редких земель в магнетитах Кундузакского проявления, г/т

Table 4. The content of rare earths in magnetites of the Kunduzak occurrence, ppm

Элемент	Магнетиты	
	Пластовые	Прожилковые
La	3.57	2.24
Ce	7.21	4.47
Pr	0.640	0.419
Nd	1.71	1.10
Sm	0.142	0.078
Eu	0.022	0.013
Gd	0.00	0.037
Tb	0.001	0.004
Dy	0.249	0.003
Ho	0.005	0.004
Er	0.004	0.002
Tm	0.002	0.002
Yb	0.046	0.021
Lu	0.009	0.004
Σ	13.361	8.37

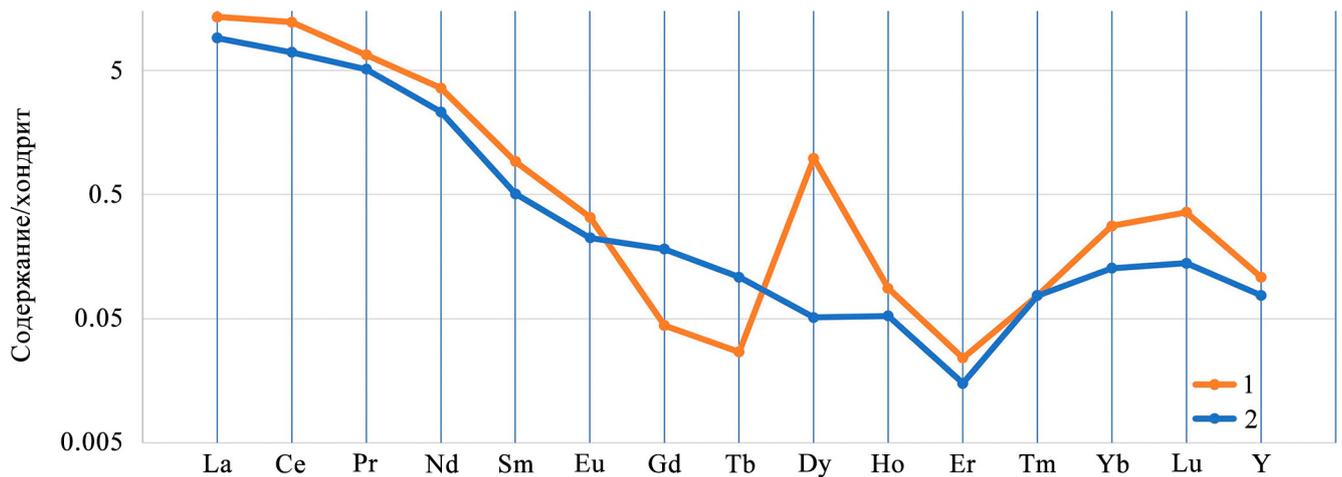


Рис. 6. Нормированное по хондриту (Evensen et al., 1978) распределение редкоземельных элементов в магнетитах проявления Кундузак.

1 – прожилковые, 2 – пластовые.

Fig. 6. Chondrite-normalized (Evensen et al., 1978) distribution of rare earth elements in magnetites of the Kunduzak occurrence.

1 – veined, 2 – stratified.

скорее всего, кроется в характере корообразования на проявлении Кундузак, где выветривание, как это было показано ранее, протекало прерывисто, в два этапа. На первом этапе по гипербазитам формировался профиль с магнезитовой прожилковой минерализацией и с горизонтом никеленосных нотронитовых глин. На втором этапе выветривание, после разрушения профиля, затронуло гипербазиты с выделениями магнезита. Растворение последних приводило к обогащению циркулирующих в коре выветривания магнезиевых растворов редкоземельными элементами, которые накапливались при формировании пластовых руд. К сказанному следует добавить роль несколько повышенных содержаний гидроокислов железа и марганца (см. табл. 2). По данным Г.Н. Батурина (1978), они тоже могут являться активными концентраторами редкоземельных элементов.

При анализе нормированного графика состава РЗЭ (см. рис. 6) видно, что, за исключением аномалии Dy в пластовых рудах, морфология спектров двух типов магнезитов в целом сопоставима. Кроме того, в обоих случаях наблюдается четко выраженная тенденция доминирования легких элементов над тяжелыми, о чем свидетельствуют резкие наклоны спектров в сторону тяжелых примесей при отношении $La/Yb = 77.6$ и 106.7 (ЛРЗЭ > ТРЗЭ). Наконец, следует отметить дифференцированность спектра пластовых магнезитов на фоне сглаженного характера распределения нормированных элементов в прожилковых рудах. Указанная особенность связана с развитием в спектре пластового магнезита слабых положительных аномалий Ce и Eu ($Ce/Ce^* = 1.2$; $Eu/Eu^* = 0.8$)¹, а также резкой, с положительными значениями, аномалией диспрозия. Помимо этого, в спектре дополнительно намечаются менее заметные пологие аномалии Yb и Lu (см. рис. 6).

Элементы Dy, Yb и Lu из-за своих геохимических свойств считаются малоинформативными и на диаграммах, как правило, не выражены аномалиями. В нашем варианте все наоборот: четкие или заметные аномалии являются важной особенностью спектров этих элементов. Пока не представляется возможным установить причины их появления. Анализ собранных авторами материалов по распределению РЗЭ в различных породах (более 250 публикаций) позволил установить лишь единичные случаи, где проявлены Dy, Yb и Lu аномалии, но, к сожалению, их особенности и генетическая суть в публикациях не рассматриваются. К отмеченным породам относятся коры выветривания уральских гипербазитов, а также разновозрастные и в разной степени метаморфизованные строматолитовые известняки и доломиты из различных ре-

гионов мира (Илалова, 2017; Zeng et al., 2019; Левицкий и др., 2019; Zhou et al., 2023). Резкие петрографо-генетические различия указанных образований не позволяют дать логичное объяснение таким аномалиям. Вероятно, причины их появления многофакторные. Возможно, одной из них является сходство химического состава поровых вод осадков (для строматолитовых комплексов) и грунтовых растворов, циркулировавших по профилю коры выветривания. Что касается слабых аномалий Ce ($Ce/Ce^* = 1.2$) и Eu ($Eu/Eu^* = 0.8$), то первая, скорее всего, отражает восстановительные условия формирования пластового магнезита, а вторая – наследуется им от гипербазитов, при выветривании которых он образовался (Балашов, 1976; Шатров, Войцеховский, 2013; Маслов, 2016).

В практике геохимических исследований для реконструкций обстановок прошлого принято использовать различные геохимические коэффициенты. Для магнезитов проявления Кундузак, генетически связанного с корами выветривания, большинство из таких коэффициентов малоинформативны, так как служат индикаторами условий седиментации в Мировом океане, а также указывают на влияние глубинного вещества на осадочный процесс в его акватории (Маслов, 2016). Исключение составляет отношение $\sum Ce/\sum Y$, которое по существующим представлениям отражает климатические обстановки прошлых эпох (Шатров, 2007). В табл. 5 приведены значения этого параметра для магнезитов проявления Кундузак и указаны климатические условия их формирования.

Результаты изучения магнезитов проявления Кундузак методами СЭМ

Исследования проводились в Палеонтологическом институте РАН с использованием электронного микроскопа марки CamScan-4, оснащенного микроанализатором системы LINK-860.

Представления о внутреннем строении магнезитов базируются на основе анализа пяти образцов, особенности которых характеризуют 120 электронно-микроскопических снимков. Наиболее детально изучен пластовый тип магнезитов (обр. 4) и менее – прожилковый (обр. 1). Принципиально важной чертой ультрамикроскопического строения пластового магнезита является развитие фоссилизированных бактериальных структур. С морфологических позиций биоморфозы представлены фрагментами минерализованных цианобактериальных матов и биопленок, кокковидными и палочковидными бактериями, остатками гликокаликса, чехлами нитчатых микрофоссилий, а также микробиотой неясного систематического положения. Магнезитовый их состав подтверждается энергодисперсионными спектрами (ЭДС), сделанными в ходе электронно-микроскопических исследований.

¹ $Ce/Ce^* = 2Ce/Ce_{cl}$; $(La/La_{cl} + Nd/Nd_{cl})$; $Eu/Eu^* = 2Eu/Eu_{cl}$; $(Sm/Sm_{cl} + Gd/Gd_{cl})$.

Таблица 5. Параметры климатического коэффициента ($\Sigma Ce/\Sigma Y$) (Шатров, 2007) и его значения для магнезитов проявления Кундузак

Table 5. Parameters of the climatic coefficient ($\Sigma Ce/\Sigma Y$) (Shatrov, 2007) and its value for magnesites in Kunduzak occurrence

Магнезиты	$\Sigma Ce/\Sigma Y$		
	<2.5 (климат аридный)	2.5–4.0 (климат семигумидный)	>4.0 (климат гумидный)
Пластовые	–	3.5	–
Прожилковые	–	–	5.2

Фрагменты цианобактериальных матов часто встречаются во всех изученных образцах пластовых магнезитов и являются постоянными структурными элементами их строения. Это минерализованные чешуи-корки толщиной в несколько десятков микрон, с ажурным переплетением чехлов нитчатых цианей (рис. 7а). Более четкая картина устройства мата проявляется при его увеличении. Как видно на рис. 7б, чехлы представляют собой сложно изогнутые пустотелые трубочки диаметром 2–3 мкм, из сплетения которых образуется биогенная структура типа “мозговой ткани”. При детализации такой структуры “трубчатое” строение мата проявляется еще более отчетливо (рис. 7в).

Помимо цианей, строителями мата также являются палочковидные и кокковидные бактерии, которые чаще всего массово развиваются в пониженных его участках (рис. 7г).

Палочковидные бактерии – это укороченные цилиндрические клетки вытянуто-овальной формы с закругленными окончаниями. Палочки прямые либо слабоизогнутые. Длина их до 5 мкм при толщине менее 2 мкм. В местах скопления они формируют многоярусные пленки из плотно прижатых микроорганизмов, так что окружающий их гликокаликс практически не виден (см. рис. 7г).

Кокковидные бактерии представляют собой микроскопические, в доли микрона, клетки шарообразной или яйцевидной формы с четкими или расплывчатыми ограничениями. Обычно кокки наблюдаются в сообществе с другими микроорганизмами, но могут образовывать самостоятельные крупные скопления, заключенные в вещество гликокаликса (см. рис. 7г).

Биопленки сопровождают цианобактериальные маты, а также самостоятельно развиваются в пористых и трещиноватых зонах. По морфологическим особенностям среди них различаются простые и сложные образования. Первые сложены однородным бесструктурным веществом коллоидогенной природы с выраженными трещинками синерезиса (рис. 7д). По своим признакам это минерализованная слизь из полисахаридов (внеклеточное полимерное вещество (ВПВ)), которая выделяется бактериями для защиты от внешних воздействий. Такие пленки обволакивают клетки, выполняя роль своеобразного гликокаликса. Учитывая отсутствие

у них признаков раскристаллизации, можно полагать, что они формировались на заключительных стадиях микробиального процесса.

Минерализованные биопленки сложного строения (рис. 7е), вероятно, отражают начальный этап становления мата. Они образуют тонкие покровы, и их особенности раскрываются при использовании больших увеличений.

Подобно матам, пленки включают кокки и палочки, а также бактерии неясного систематического положения. Последние представлены укороченными воронкообразными трубочками, большая часть из которых сильно сплюснута под воздействием процессов уплотнения магнезитов (рис. 7ж). Диаметр “устьев” “воронки” 1.2–2.5 мкм. В отличие от “зрелых” матов, “заселенность” биопленок неравномерная: от буквально “спрессованных” бактериальных клеток (см. рис. 7ж), до участков, где микробиота свободно погружена в вещество гликокаликса (рис. 7з).

Помимо отмеченной, выделяется еще один тип микробиоты, не связанный с биопленками и матами. Он представлен сообществом нитчатых бактерий (цианей и микромицетов), которые заселяли поры магнезитов (рис. 7и). От цианей сохранились минерализованные разветвленные чехлы. Судя по их сечениям (1.5–4.5 мкм), они окружали как единичные, так и собранные в жгуты трихомы (рис. 7к), пересекавшие поровое пространство в разных направлениях. Актиномицеты фиксируются на стенках пор в виде своеобразного войлока из переплетенных нитей мицелия толщиной 0.1–0.2 мкм (рис. 7л). Следует отметить, что такие заполненные микробиотой поры при своем формировании разрушали как матрицу породы, так и заключенные в ней биопленки. Этот факт свидетельствует о длительности и многоэтапности развития микробного процесса. Сказанное подтверждается присутствием в магнезитах биоморфов разной степени сохранности: от практически неизмененных до превращенных перекристаллизацией в темные реликты (рис. 7м). Завершая характеристику биоты магнезитов, следует остановиться на ее роли в их формировании. В связи с этим принципиальное значение приобретают данные по современному накоплению магнезиальных карбонатных минералов (гидромагнезита, хантита, дипингита, магнезита),

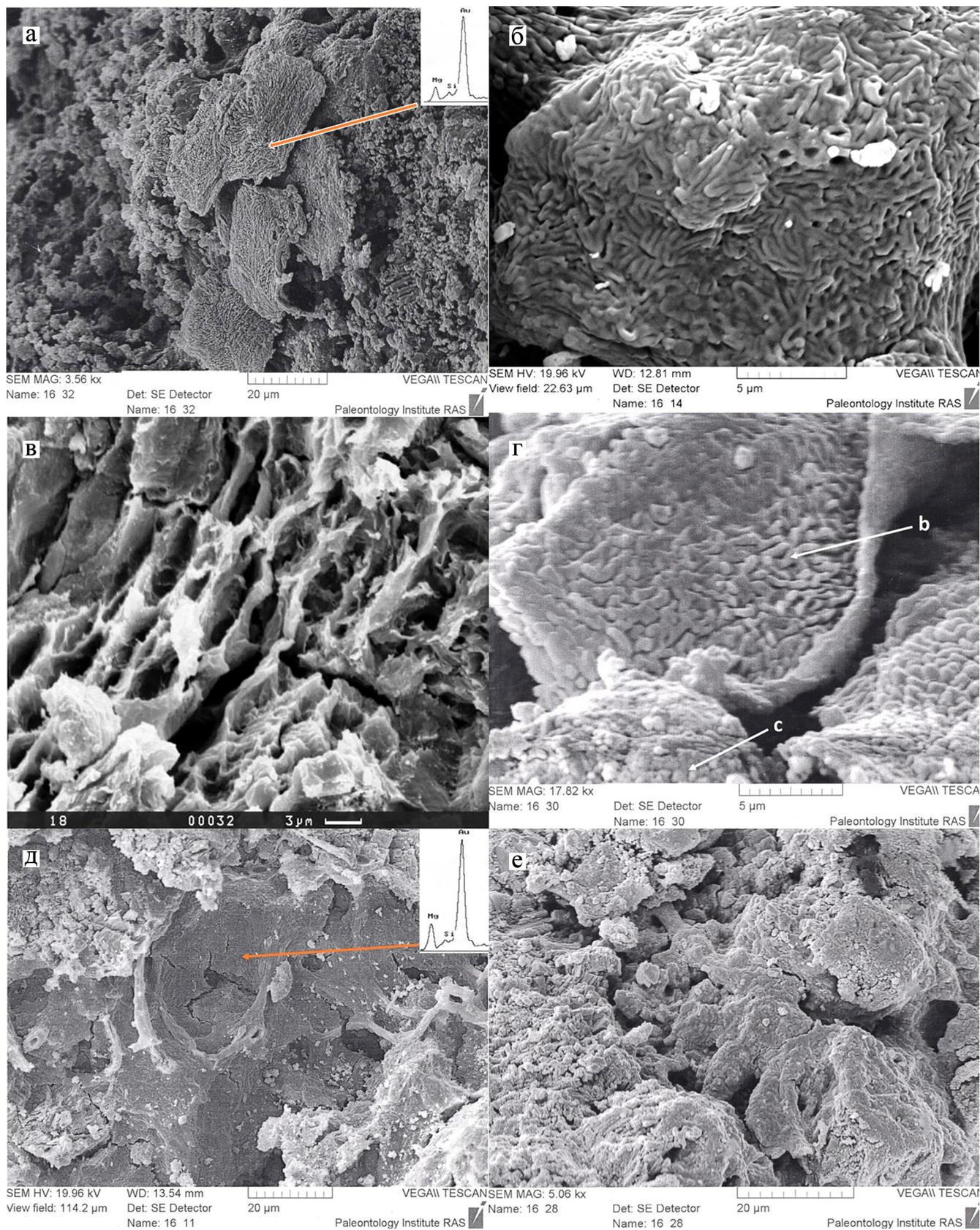


Рис. 7а–е. Микробные структуры в магнезитах проявления Кундузак.

Fig. 7а–е. Microbial structures in magnesites of Kunduzak occurrence.

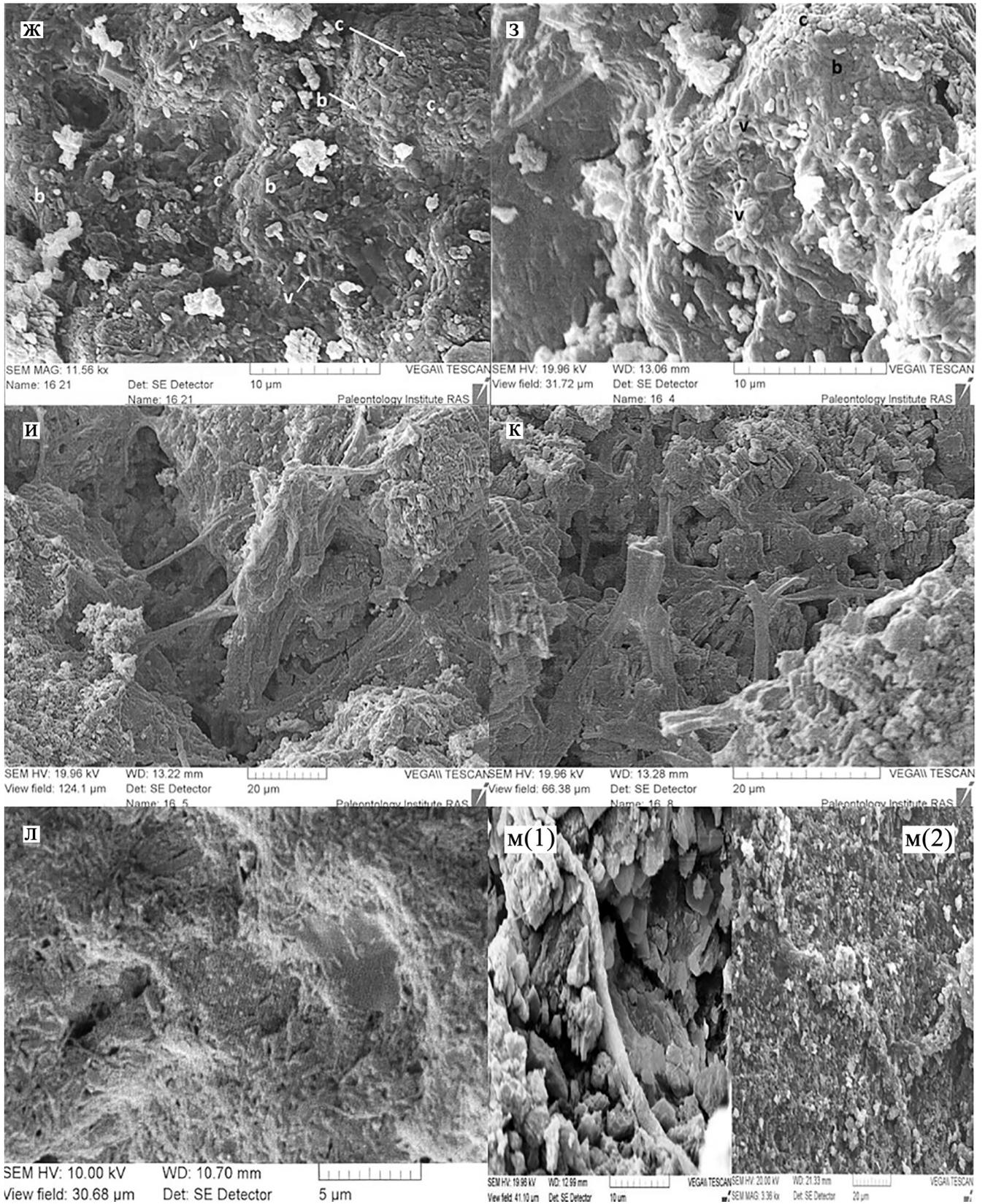


Рис. 7ж–м. Микробиальные структуры в магнетитах проявления Кундузак.

Fig. 7ж–м. Microbial structures in magnetites of Kunduzak occurrence.

Рис. 7. Микробные структуры в магнезитах проявления Кундузак.

- а. Минерализованный фрагмент цианобактериального мата. Хорошо видно ажурное переплетение чехлов нитчатых цианей. В правом верхнем углу фрагмент ЭДС, подтверждающий магнезитовый состав биоморфной структуры.
- б. То же при больших увеличениях. Структура типа “мозговой ткани” цианобактериального мата из переплетенных трубчатых чехлов цианей.
- в. То же, более детально.
- г. Скопление в понижениях поверхности мата биоморфоз палочковидных (в центре) и кокковидных (внизу снимка) бактериальных клеток.
- д. Биопленка простого строения из минерализованной слизи ВПВ. Хорошо выражены трещины и пустоты синерезиса, которые образовались при коагуляции полисахаридового вещества слизи. В правом верхнем углу фрагмент ЭДС, подтверждающий магнезитовый состав пленки.
- е. Внешний облик минерализованной биопленки сложного строения при относительно небольших увеличениях электронно-микроскопического снимка.
- ж. То же. Внутреннее строение пленки из “спрессованных” бактериальных клеток разной морфологии: палочки (b), кокки (c), а также бактерий неясного систематического положения в виде деформированных воронкообразных форм (v). В центре снимка – скопления биоморфоз со следами клеточного деления (?).
- з. Минерализованная биопленка сложного строения из различных псевдоморфоз, погруженных в вещество гликокаликса.
- и. Поровое пространство магнезита, заполненное минерализованным сообществом нитчатых бактерий.
- к. Разного диаметра минерализованные чехлы цианей в порах магнезита.
- л. Развитые на стеках пор минерализованные остатки актиномицетов со сложным переплетением нитей мицелия.
- м. Минерализованные нитчатые бактерии хорошей (m1) и плохой (m2) сохранности, перекристаллизованные до состояния теневых реликтов.

Fig. 7. Microbial structures in magnesites of Kunduzak occurrence.

- a. Mineralized fragment of cyanobacterial mat. The delicate weave of the filamentous blue-green algae covers is clearly visible. In the upper right corner is a fragment of the energy dispersive spectrum (EDS), confirming the magnesite composition of the biomorphic structure.
- b. The same, at higher magnifications. A “brain tissue”- like cyanobacterial mat structure made of intertwined tubular blue-green algae covers.
- v. The same, more detailed.
- г. Accumulation of rod-shaped (in the center) and coccoid (at the bottom of the image) bacterial cells in the depressions of the mat surface.
- д. A biofilm of simple structure made of mineralized extracellular polymer substance mucus. Cracks and voids of syneresis, which were formed during coagulation of the polysaccharide substance of mucus, are well expressed. In the upper right corner is a fragment of the energy dispersive spectrum (EDS) confirming the magnesite composition of the film.
- е. The appearance of a mineralized biofilm of complex structure at relatively small magnifications of an electron microscopic image.
- ж. The same. Internal structure of the film of “compressed” bacterial cells of different morphology: bacilli (b), cocci (c), and bacteria of unclear systematic position – deformed funnel-shaped forms (v). In the center of the image are clusters of biomorphoses with traces of cell division (?).
- з. Mineralized biofilm of complex structure from various pseudomorphoses immersed in the substance of the glycoalyx.
- и. Pore space of magnesite filled with mineralized community of filamentous bacteria.
- к. Mineralized covers of different diameters of blue-green algae in the pores of magnesite
- л. Mineralized remains of actinomycetes with complex interlacing of mycelium threads developed on pore stacks.
- м. Mineralized filamentous bacteria of good (m1) and poor preservation (m2), recrystallized to the state of shadow relics.

в образовании которых активное участие принимают цианобактериальные сообщества (оз. Салда, Турция; лагуна Куронг, Австралия; Персидский залив; оз. Лас-Эрос, Испания; Плайя, Британская Колумбия, Канада; Пуэбла, Мексика) (Балашов, 1976; Войткевич и др., 1977; Шатров, 2007; Илалова, 2017; Zeng et al., 2019; Левицкий и др., 2019; Zhou et al., 2023). В ходе развития матов специалисты фиксируют целый ряд факторов, благоприятных для магнезитообразования. К таким факторам относятся способность микробиоты формировать внутри мата микросреду с меняющимися значениями pH (в сторону роста) и Eh, провоцируя тем самым выпадение магнезита; участие бактерий в качестве катализатора химических реакций, в ходе которых образуется магнезит; аккумуляция бактериальными клетками магнезитовых частиц; диагне-

нетическая фоссилизация цианобактериальных матов магнезитовым веществом.

Таким образом, на примере современного магнезитообразования подтверждается способность биоты формировать крупные скопления магнезита.

Этот факт становится ключевым для понимания биогенной (биолитной) природы магнезита проявления Кундузак. Прямым доказательством сказанного служат описанные выше разнообразные структуры биоморфоз, главными из которых являются минерализованные остатки цианобактериальных матов. Их фрагменты, несмотря на интенсивную перекристаллизацию матрицы пород, наблюдаются во всех изученных образцах. Это, в свою очередь, указывает не на случайность этих образований, а на реальную (породообразующую) роль микробиоты в формировании магнезитов.

ВЫВОДЫ

1. Роль микробиоты в пороодо- и рудонакоплении вот уже более века активно обсуждается в отечественной и зарубежной литературе. По мере изучения этого вопроса все новые полезные ископаемые попадают в поле зрения геологов, палеонтологов и биологов. Благодаря работам В.И. Вернадского, Я.В. Самойлова, Н.И. Андрусова, А.Г. Вологдина в практику научных и геологических исследований прочно вошло и закрепилось понятие “биолиты” – природные образования, возникновение которых обязано деятельности макро- и микроорганизмов. На сегодняшний день по разным оценкам известно около 300 минералов биогенного происхождения, включая минералы редкоземельных, благородных и радиоактивных элементов. Бесспорно, роль бактерий в минералообразовании наиболее полно изучена для кремнистых, фосфатных и карбонатных минералов. Во всех отмеченных случаях не только выполнены детальные вещественно-морфологические исследования бактериальных остатков, но проведены успешные опыты по фоссиллизации живой биоты. В результате этих работ усилиями ученых Палеонтологического института РАН и Института микробиологии РАН, появилось новое научное направление “бактериальная палеонтология”. Вместе с тем, несмотря на достигнутые успехи, многие вопросы рудной микробиальной деятельности все еще остаются без ответа. Поэтому новые данные по этой проблеме имеют важное научное и практическое значение. В частности, установлен ранее неизвестный тип микробиалитных образований, связанных с магнетитами коры выветривания серпентизированных ультрабазитов.

2. Магнетитовые микробиолиты относятся к “аморфному” промышленному типу магнетитовых руд и выявлены на Кундузакском проявлении Халиловского ультрабазитового массива Южного Урала. Важная черта проявления – пластовый характер рудной залежи, этим оно принципиально отличается от соседних месторождений, где магнетит образует штокерковые тела. По результатам электронной микроскопии принципиально важным структурным элементом строения магнетитовых пород является богатый комплекс минерализованных бактериальных форм, а именно: фрагменты цианобактериальных матов и биопленок, кокковидные и палочковидные бактерии, остатки гликокаликса, чехлы нитчатых микрофоссилий, а также микробиота неясного систематического положения. Развитие в магнетитах подобных элементов позволяет проводить параллель с процессами современного магнетитонакопления, неразрывно связанного с деятельностью микробиального сообщества цианобактериальных матов. Последнее обстоятельство становится неопровержимым аргументом биогенной (микробиалитной) природы маг-

нетита Кундузакского проявления. Можно предположить, что установленные в этих породах аномалии Dy, Yb и Lu являются своеобразными индикаторами магнетитовых биолитов.

3. В истории образования биолитовых магнетитов проявления Кундузак выделяются следующие основные этапы.

1) Формирование доюрской коры выветривания на площади Халиловского гипербазитового массива с нонтронитовыми глинами и магнетитовым штокверком под ними. 2) Воздымание Кундузакского тектонического блока; размыв верхних горизонтов коры выветривания с выходом на поверхность магнетитового штокверка. 3) Стабилизация тектонического режима и повторное выветривание гипербазитов с магнетитовым штокверком. 4) Растворение магнетита; фильтрация бикарбонатов магния в нижние горизонты коры выветривания. 5) Массовое осаждение магнетита бактериями в зоне застойных грунтовых вод. Через клеточные мембраны микроорганизмы поглощали воду и питательные вещества, не пропуская магний. В результате в межклеточном пространстве наступало пересыщение раствора по отношению к магнетиту и его отложение на поверхности бактериальных клеток в виде защитных чехлов. 6) Проникновение растворов во внутренние части клеток и их минерализация. 7) Перекристаллизация магнетитовых пород с образованием реликтовых биоморфных структур.

В результате перечисленных процессов сформировалась пластовая залежь, прогнозные ресурсы которой оцениваются в 130 тыс. т. Возникает вопрос: насколько выявленные магнетитовые биолиты могут быть характерными для Халиловского массива? Как показывают архивные материалы, в пределах данного региона коры выветривания представлены двумя типами: с полным (нонтронито-глинисто-железистым) и сокращенным (железисто-гидроокисным) профилем. Первый тип развит в понижениях рельефа, второй – на его возвышенных участках. Нетрудно заметить, что последний случай по основным особенностям сопоставим с Кундузакским проявлением. Это позволяет прогнозировать на площади Халиловского массива развитие магнетитовых биолитов, подобных проявлению Кундузак.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдонин В.В., Жегалло Е.А., Сергеева Н.Е. (2019) Бактериальная природа оксидных железомарганцевых руд Мирового океана. М.: ГЕОС, 284 с.
Амосов Р.А., Васин С.Л. (1993) Золотые микрофоссилии. *Руды и металлы*, (3-6), 101-107.
Антошкина А.И. (2011) Бактериальное породообразование – реальность современных методов исследований. *Учен. Зап. Казан. ун-та*, 153(4), 114-126.
Астафьева М.М., Викерс-Рич П., Вилде А., Роза-

- нов А.Ю., Хувер Р. (2005) О возможности биогенно-го образования среднепротерозойских полиметаллических руд месторождения Мак-Артур-Ривер в Северной Австралии. *Палеонтол. журн.*, (6), 3-7.
- Балашов Ю. А. (1976) Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 268 с.
- Батулин Г.Н. (1978) Фосфориты на дне океана. М.: Наука, 231 с.
- Бетехтин А.Г. (2023) Курс минералогии. М.: КДУ, 736 с.
- Блюман А.А. (2009) Биогенное и гидробиогенное золото линейной коры выветривания. *Регион. геол. и металлогения*, (37), 94-106.
- Войткевич Г.В., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. (1977) Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 184 с.
- Георгиевский А.Ф., Бугина В.М. (2019) Афанитовый генетический тип промышленных фосфоритов и условия их формирования в Окино-Хубсугульском бассейне. М.: РУДН, 294 с.
- Георгиевский А.Ф., Жегалло Е.А., Бугина В.М. (2019) Микробиота бокситов месторождения Ева (Гвинея-Бисау). *Литология и полез. ископаемые*, (6), 557-567.
- Герасименко Л.М. (2002) Актуалистическая палеонтология цианобактериальных сообществ. Дисс. ... докт. биол. наук. М.: Ин-т микробиол. РАН, 70 с.
- Герасименко Л.М., Гончарова И.В., Жегалло Е.А., Заварзин Г.А., Зайцева Л.В., Тихомирова Н.С., Орлеанский В.К., Розанов А.Ю., Ушатинская Г.Т. (1996) Процесс минерализации (фосфатизации) нитчатых цианобактерий. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 208-214.
- Герасименко Л.М., Гончарова И.В., Зайцева Л.В. (1998) Влияние содержания фосфора в среде на рост и минерализацию цианобактерий. *Микробиология*, **67**(2), 254-259.
- Герасименко Л.М., Дубинин А.В., Заварзин Г.А. (1996) Алкалофильные цианобактерии содовых озер Тувы и их экофизиология. *Микробиология*, **65**(6), 844-849.
- Герасименко Л.М., Заварзин Г.А., Розанов А.Ю., Ушатинская Г.Т. (1999) Роль цианобактерий в образовании фосфатных минералов. *Журн. общ. биол.*, **60**(4), 415-430.
- Герасименко Л.М., Ушатинская Г.Т. (2002) Цианобактерии, цианобактериальные сообщества, маты, биопленки. *Бактериальная палеонтология*. М.: ПИН РАН, 36-47.
- Герасименко Л.М., Ушатинская Г.Т. (2002) Эксперименты по фоссилизации. Фосфатизация. *Бактериальная палеонтология*. М.: ПИН РАН, 59-66.
- Гончарова И.В., Герасименко Л.М. (1993) Динамика потребления неорганического фосфора клетками *Microcoleus chthonoplastes*. *Микробиология*, **62**(4), 1048-1055.
- Добрецов Н.Л., Жмодик С.М., Лазарева Е.В., Брянская А.В., Пономарчук В.А., Сарыг-оол Б.Ю., Кириченко И.С., Толстов А.В., Карманов Н.С. (2021) Структурно-морфологические признаки участия микроорганизмов в формировании богатых Nb-REE-руд Томторского месторождения (Россия). *Докл. РАН. Науки о Земле*, **496**(2), 154-157 <https://doi.org/10.31857/S2686739721020055>
- Дойникова О.А., Петров В.А. (2022) Рудоформирующий биогенный фактор образования месторождений урана песчаникового типа. *Геология руд. месторождений*, **64**(4), 406-420. <https://doi.org/10.31857/S0016777022040025>
- Еганов Э.А. (1988) Фосфоритообразование и строматолиты. Новосибирск: ИГИГ, 89 с.
- Жегалло Е.А., Зайцева Л.В., Карпов Г.А., Самылина О.С. (2021) Современная фоссилизация и гейзериты Камчатки. *Бактериальная палеонтология*. М.: ПИН РАН, 27-37.
- Жегалло Е.А., Розанов А.Ю. (2002) Редкоземельно-ниобиевые руды Томтора *Бактериальная палеонтология*. М.: ПИН РАН, 111-115.
- Жегалло Е.А., Розанов А.Ю., Ушатинская Г.Т. (2002) Фосфориты. *Бактериальная палеонтология*. М.: ПИН РАН, 97-102.
- Заварзин Г.А., Жилина Т.Н. (2000) Содовые озера – природная модель древней биосферы континентов. *Природа*, (2), 45-55.
- Иванов В.В. (1994) Экологическая геохимия элементов. Кн. 1, 2. М.: Недра, 302 с.
- Ивлев Н.Ф., Пустыльников А.М. (1982) Магнетит в вендско-нижнекембрийских соленосных отложениях юга Сибирской платформы. *Геология и геофизика*, (1), 136-141.
- Илалова Р.К. (2017) Континентальное выветривания в мезозое: особенности минерального состава профилей и распределения редкоземельных элементов. *Горн. информ.-аналит. бюлл.*, (10), 226-237.
- Ильин А.В. (2008) Древние (эдиакарские) фосфориты. *Тр. ГИН РАН*, вып. 587. М.: GEOS, 160 с.
- Казаков А.В., Тихомирова М.М., Плотникова В.И. (1957) Система карбонатных равновесий (доломит, магнетит). *Тр. ИГН*, вып. 152, геол. сер., (64), 13-58.
- Канаева З.К., Канаев А.Т. (2012) Микробиоценозы хемолитотрофных бактерий растворов подземного выщелачивания уранового месторождения Карамурун. *Фундамент. исследования*, **5**(1), 153-157.
- Краускопф К. (1958) Осадочные месторождения редких металлов. *Проблемы рудных месторождений*. М.: Ин. л-ра, 375-478.
- Крупенин М.Т. (2005) Применение РЗЭ для генетической интерпретации образований месторождений кристаллического магнетита Северной Евразии. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 152, 215-222.
- Крылов И.Н., Тихомирова Н.С., Орлеанский В.К. (1988) К образованию кремнистых микрофоссилий. *Палеонтол. журн.*, (3), 249-259.
- Кузнецов В.Г. (2004) Связь эволюции цианофитов и стратиграфического размещения магнетитов. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (4), 30-35.
- Левицкий В.И., Резницкий Л.З., Левицкий И.В. (2019) Геохимия карбонатных пород раннедокембрийских фанерозойских метаморфических комплексов Восточной Сибири, Северо-Запада Сибири, Памира. *Геохимия*, **64**(4), 409-426. <https://doi.org/10.31857/S0016-7525644409-426>
- Леин А.Ю., Москалев Л.И., Богданов Ю.А., Сагалева А.М. (2000) Гидротермальные системы океана и жизнь. *Природа*, (5), 47-55.
- Мануковский С.В., Беляев В.И. (2000) К вопросу о бактериально-водорослевой природе некоторых типов фосфоритов желваковых фосфоритов и фосфоритоносных россыпях. *Вестн. Воронеж. ун-та. Геол.*, **5**(10), 41-47.
- Маслов А.В. (2016) Фосфориты неопротерозоя-кемб-

- рия и палеоокеанография: данные по распределению редкоземельных элементов. *Тр. ИГТ УрО РАН*, вып. 163, 102-107.
- Моисеенко В.Г., Куимова Н.Г., Макеева Т.Б., Павлова Л.М. (1999) Образование биогенного золота микелиальными грибами. *Докл. РАН*, **364**(4), 535-537.
- Нескоромных В.В. (2012) Проектирование скважин на твердые полезные ископаемые. Красноярск: СФУ, 294 с.
- Никифоров А.В. (2003) Отчет о разведке Халиловского месторождения аморфного магнетита в Гайском районе Оренбургской области в 1999–2002 гг. Орск, 315 с.
- Новиков В.М., Бортников Н.С., Боева Н.М., Жухлистов А.П., Жегалло Е.А., Соболева С.В., Новакова А.А. (2017) Биогенные наноминералы оксидов железа в корках выветривания базальтов континентальных окраин Восточной Азии на примере Дальнего Востока России и Вьетнама. Ст. 3. Магнетит. *Вестн. ВГУ. Сер.: Геология*, (2), 61-65.
- Окишев К.Ю. (2007) Кристаллохимия и дефекты кристаллического строения. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 97 с.
- Пальгова А.Ю. (2015) Обзор мировых запасов магнетитового сырья. *Молодой ученый*, **3**(83), 193-196.
- Пиневич А.В. (2005) Микробиология железа и марганца. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 374 с.
- Розанов А.Ю. (2002) Ископаемые бактерии, осадконакопление и рудогенез. *Бактериальная палеонтология*. М.: ПИН РАН, 107-114.
- Розанов А.Ю., Астафьева М.М., Зайцева Л.В., Алфинова Н.А., Фелицын С.Б. (2016) Цианобактерии (?) в железистых кварцитах Курской магнитной аномалии. *Докл. АН*, **470**(3), 1-3. <https://doi.org/10.7868/S0869565216270293>
- Розанов А.Ю., Жегалло Е.А. (1989) К проблеме генезиса древних фосфоритов Азии. *Литология и полез. ископаемые*, (3), 67-82.
- Самойлов Я.В. (1921) Агрономические руды. М.: Госиздат, 23 с.
- Самойлов Я.В. (1921) Биолиты как орудие постижения жизни прежних геологических эпох. *Природа*, (1-3), 25-44.
- Самойлов Я.В. (1929) Биолиты. Посмертный сборник статей. Л.: Научхимтехиздат, 140 с.
- Слукин А.Д., Боева Н.М., Жегалло Е.А., Зайцева Л.В. (2016) Биоминералы латеритных бокситов – новые данные по результатам электронно-микроскопического изучения. *Новые данные о минералах*, вып. 51, 52-61.
- Слукин А.Д., Бортников Н.С., Новиков В. М., Жегалло Е.А., Боева Н.М., Школьник Э.Л. (2013) Биоминералы латеритных кор выветривания как продукты жизнедеятельности ископаемых организмов. *Органическая минералогия*. Черноголовка: ИПФХ РАН, 139-142.
- Сорокикова Е.Г. (2008) Цианобактерии термальных источников Байкальской рифтовой зоны и их роль в осаждении кремнезема как модельных объектов для исследования микрофоссилий. Дисс. ... канд. биол. наук. Иркутск: Многолог. ин-т СО РАН, 18 с.
- Старостин В.И., Сакия Д.Р. (2015) Эволюция взглядов на происхождение золоторудного месторождения Витватерсранд. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол.*, (2), 32-38.
- Тихомирова Н.С., Орлеанский В.К. (1994) Моделирование фосфатоосаждения в лабораторных культурах цианобактерий. *Литология и полез. ископаемые*, (1), 135-140.
- Федоров В. С. (1951) Научные основы режимов бурения. М.; Л.: Гостоптехиздат, 248 с.
- Хайруллина Г.З., Шевелев А.И., Крутиков В.Ф., Урашин М.А., Русина Л.П. (1990) Теневые строматолитовые структуры магнетитов – результаты процессов перекристаллизации. *Минералогическая кристаллография, кристаллогенез, кристаллосинтез*. (Информ. мат. материалы). Сыктывкар: УрО РАН, 70-71.
- Шатров В.А. (2007) Лантаноиды как индикаторы обстановок осадкообразования (на основе анализа опорных разрезов протерозоя и фанерозоя Восточно-Европейской платформы). Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ВГУ, 36 с.
- Шатров В.А., Войцеховский Г.В. (2013) Лантаноиды и высокоподвижные элементы в осадочных и метасадочных образованиях как показатели тектонической активности фундамента в платформенных условиях. *Геохимия*, (3), 245-255.
- Школьник Э.Л., Жегалло Е.А., Богатырев Б.А., Бугельский Ю.Ю., Слукин А.Д., Новиков В.М., Еганов Э.А., Георгиевский А.Ф., Жуков В.В., Мыскин В.И., Одский Б.Н. (2004) Биоморфные структуры в бокситах (по результатам электронно-микроскопического изучения). М.: Эслан, 3-13.
- Школьник Э.Л., Тан Тяньфу, Еганов Э.А., Розанов А.Ю., Батулин Г.Н., Жегалло Е.А., Сюэ Яосун, Юй Цюньлю, Джел К., Пайнер Д., Медрано М. (1999) Природа фосфатных зерен и фосфоритов крупнейших бассейнов мира. Владивосток: Дальнаука, 207 с.
- Щербакова Т.А. (2018) Магнетитообразование в кайнозойских осадочных комплексах. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Казань: КФУ, 266 с.
- Bawden T.M., Einaudi M.T., Bostick V.C., Meibom A., Wooden J., Norby J.W., Chamberlain C.P. (2003) Extreme 34S depletions in ZnS at the Mike gold deposit, Carlin Trend, Nevada: Evidence for bacteriogenic supergene sphalerite. *Geology*, **31**(10), 913. <https://doi.org/10.1130/g19831.1>
- Bénézech P., Saldi G.D., Dandurand J.L., Schott J. (2011) Experimental Determination of the Solubility Product of Magnesite at 50 to 200°C. *Chem. Geol.*, **286**(1-2), 21-31. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2011.04.016>
- Benning L.G., Phoenix V.R., Mountain B.W., Lappin-Scott H. (2005) Biosilicification: the role of cyanobacteria in silica sinter deposition. (Eds G. Gadd, K. Semple). *Microorganisms and Earth Systems*. Society for General Microbiology Symposia. Cambridge University Press, 131-150. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754852.008>
- Biondi J.C., Lopez M. (2017). Urucum neoproterozoic–Cambrian manganese deposits (MS, Brazil): biogenic participation in the ore genesis, geology, geochemistry, and depositional environment. *Ore Geol. Rev.*, **91**, 335-386. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.09.018>
- Davies P.J., Bubela B. (1973) The transformation of nesquehonte into hydromagnesite. *Chem. Geol.*, **12**(4), 289-300. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(73\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(73)90006-5)
- Deelman J.C. (2021) Magnesite, dolomite and carbonate groups. [Research Report] (formerly). *Technische Uni-*

- versiteit Eindhoven. <https://hal.science/hal-03412979v2>
- Deelman J.C. (1999) Low-temperature nucleation of magnesite and dolomite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte*, 289-302.
- Deelman J.C. (2012) Are bacteria capable of precipitating magnesite? *Periodico di Mineralogia*, **81**, 225-235. <https://doi.org/10.2451/2012PM0013>
- Dos Anjos A.P.A., Sifeddine A., Sanders C.J. et al. (2011) Synthesis of magnesite at low temperature. *Carbonates Evaporites*, **26**, 213-215. <https://doi.org/10.1007/s13146-011-0063-4>
- Evensen N.M., Hamilton P.J., O’Nions R.K. (1978) Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 1199-1212.
- Eugster P. (1970) Chemistry and origin of the brines of Lake Magadi, Kenya. *Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **3**, 213-235.
- Friedman I., Smith G.I., Hardcastle K.G. (1976) Studies of quaternary saline lakes-II. Isotopic and compositional changes during desiccation of the brines in Owens Lake, California, 1969-1971. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**(5), 501-511. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(76\)90218-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90218-0)
- Gischler E., Gibson M.A., Oschmann W. (2008) Giant Holocene Freshwater Microbialites, Laguna Bacalar, Quintana Roo, Mexico. *Sedimentol.*, **55**, 1293-1309. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00946.x>
- Hänchen M., Prigiobbe V., Baciocchi R., Mazzotti M. (2008) Precipitation in the Mg-carbonate system – effects of temperature and CO₂. *Chem. Engin. Sci.*, **63**(4), 1012-1028. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.09.0>
- Hirst J.F. (2013) Sedimentology, diagenesis and hydrochemistry of the saline, alkaline lakes on the Cariboo Plateau, Interior British Columbia, Canada. PhD thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Jones B.E., Grant W.D., Duckworth A.W., Owenson G.G. (1998) Microbial diversity of soda lakes. *Extremophiles*, **2**(3), 191-200. <https://doi.org/10.1007/s007920050060>
- Jones B.F., Eugster H.P., Rettig S.L. (1977) Hydrochemistry of the Lake Magadi basin, Kenya. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**(1), 53-72. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(77\)90186-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(77)90186-7)
- Kazmierczak J., Kempe S., Kremer B., Lopez-Garcia P., Moreira D., Tavera R. (2011) Hydrochemistry and microbialites of the alkaline crater lake Alchichica. *Mexico Facies*, **57**, 543-570.
- Kempe S., Kazmierczak J., Landmann G. et al. (1991) Largest known microbialites discovered in Lake Van, Turkey. *Nature*, **349**, 605-608. <https://doi.org/10.1038/349605a0>
- Möller P. (1989) Nucleation processes of magnesite. (Ed. P. Möller). *Magnesite*, 287-292. Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-carbonates. Berlin, Stuttgart, Borntraeger, 300 p.
- Novoselov A., Konstantinov A., Lim A., Goetschl K., Loiko S., Mavromatis V., Pokrovsky O. (2019) Mg-Rich Authigenic Carbonates in Coastal Facies of the Vtoroe Zasechnoe Lake (Southwest Siberia): First Assessment and Possible Mechanisms of Formation. *Minerals*, **9**(12), 763. <https://doi.org/10.3390/min9120763>
- Pokrovsky O.S., Schott J. (1999) Processes at the Magnesium-Bearing Carbonates/Solution Interface. II. Kinetics and Mechanism of Magnesite Dissolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(6), 881-897. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00013-7)
- Power I.M., Harrison A.L., Dipple G.M., Wilson S., Barker S.L.L., Fallon S.J. (2019) Magnesite formation in playa environments near Atlin, British Columbia, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **255**, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.04.008>
- Power I.M., Kenward P.A., Dipple G.M., Raudsepp M. (2017) Room Temperature Magnesite Precipitation. *Cryst. Growth Des.*, **17**(11), 5652-5659. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.7b003>
- Power I., Wilson S., Thom J., Dipple G., Gabites J., Southam G. (2009) The hydromagnesite playas of Atlin, British Columbia, Canada: A biogeochemical model for CO₂ sequestration. *Chem. Geol.*, **260**(3-4), 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.012>
- Power I.M., Wilson S., Thom J.M., Dipple G.M., Southam G. (2007) Biologically induced mineralization of dypingite by cyanobacteria from an alkaline wetland near Atlin, British Columbia, Canada. *Geochem. Trans.*, **8**(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-8-13>. PMID: 18053262; PMCID: PMC2213640
- Renaut R.W. (1993) Morphology, distribution, and preservation potential of microbial mats in the hydromagnesite-magnesite playas of the Cariboo Plateau, British-Columbia, Canada. *Hydrobiologia*, **267**, 75-98. <https://doi.org/10.1007/BF00018792>
- Renaut R.W., Long P.R. (1989) Sedimentology of the saline lakes of the Cariboo Plateau, Interior British Columbia, Canada. *Sediment. Geol.*, **64**(4), 239-264. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(89\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0037-0738(89)90051-1)
- Saldi G.D., Jordan G., Schott J., Oelkers E.H. (2009) Magnesite growth rates as a function of temperature and saturation state. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**(19), 5646-5657. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.06.035>
- Santos H. (2023) Mechanisms of Mg carbonates precipitation and implications for CO₂ capture and utilization/storage. University of Oulu, Fibre and Particle Engineering Research Unit. <https://doi.org/10.23729/75e78ff4-9f77-4d7a-93e2-983ccb7e1bfd>
- Sanz-Montero M.E., Cabestrero Ó, Sánchez-Román M. (2019) Microbial Mg-rich Carbonates in an Extreme Alkaline Lake (Las Eras, Central Spain). *Front Microbiol.*, **7**(10), 148. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00148>. PMID: 30800103; PMCID: PMC6376964
- Sanz-Montero M., Rodríguez-Aranda J. (2012) Magnesite formation by microbial activity: Evidence from a Miocene hypersaline lake. *Sediment. Geol.*, **263-264**, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.08.004>
- Sayles F.L., Fyfe W.S. (1973) The Crystallization of Magnesite from Aqueous Solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**(1), 87-99. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90246-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90246-9)
- Shirokova L.S., Mavromatis V., Bundeleva I.A. et al. (2013) Using Mg Isotopes to Trace Cyanobacterially Mediated Magnesium Carbonate Precipitation in Alkaline Lakes. *Aquat. Geochem.*, **19**, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10498-012-9174-3>
- Southam G., Lengke M., Fairbrother L., Reith F. (2009) The Biogeochemistry of Gold. *Elements*, **5**(5), 303-307. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.303>
- Toner J.D., Catling D.C. (2020) A carbonate-rich lake solution to the phosphate problem of the origin of life. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **117**(2), 883-888. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916109117>
- Toporski J.K., Steele A., Westall F., Thomas-Keprta K.L.,

- McKay D.S. (2002) The simulated silicification of bacteria – new clues to the modes and timing of bacterial preservation and implications for the search for extraterrestrial microfossils. *Astrobiology*, **2**(1), 1-26. <https://doi.org/10.1089/153110702753621312>. PMID: 12449852
- Valdiya K.S. (1968) Origin of the magnesite deposits of southern Pithoragarh, Kumaun Himalaya, India. *Econ. Geol.*, **63**(8), 924-934. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.63.8.924>
- Vandeginste V. (2021) Effect of PH Cycling and Zinc Ions on Calcium and Magnesium Carbonate Formation in Saline Fluids at Low Temperature. *Minerals*, **11**(7), 723. <https://doi.org/10.3390/Min11070723>
- Xu J., Yan C., Zhang F., Konishi H., Xu H., Teng H.H. (2013) Testing the cation-hydration effect on the crystallization of Ca-Mg-CO₃ systems. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **110**(44), 17750-5. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307612110>
- Zeng L.Q., Yi H.S., Xia G.Q. et al. (2019) Palaeoenvironmental setting of lacustrine stromatolites in the Miocene Wudaoliang Group, northern Tibetan Plateau. *J. Palaeogeogr.*, **8**(18), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s42501-019-0033-7>
- Zhou H., Gao D., Huang L., Zhu G., Zhang T., Liu J., Zhai X., Xiong R., Wang S., Zhang Y. (2023) Characteristics and genesis of dolomite in the lower Cambrian Xiaerbulake Formation of the western Tarim Basin, China. *Front. Earth Sci.*, **10**, 1075941. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1075941>

REFERENCES

- Amosov R.A., Vasin S.L. (1993) Gold microfossils. *Ores and Metals*, **36**, 101-107. (In Russ.)
- Antoshkina A.I. (2011) Bacterial rock formation – the reality of modern research methods. *Uchen. Zap. Kazan. Universiteta*, **153**(4), 114-126. (In Russ.)
- Astaf'eva M.M., Vickers-Rich P., Vilde A., Rozanov A.Y., Khuver R. (2005) On the possibility of biogenic formation of Middle Proterozoic polymetallic ores from the McArthur River deposit in Northern Australia. *Paleontol. Zhurnal*, **6**, 3-7. (In Russ.)
- Avdonin V.V., Zhegallo E.A., Sergeeva N.E. (2019) Bacterial nature of oxide ferromanganese ores of the World Ocean. Moscow, GEOS Publ., 284 p. (In Russ.)
- Balashov Y.A. (1976) Geochemistry of rare earth elements. Moscow, Nauka Publ., 268 p. (In Russ.)
- Baturin G.N. (1978) Phosphorites on the ocean floor. Moscow, Nauka Publ., 231 p. (In Russ.)
- Bawden T.M., Einaudi M.T., Bostick B.C., Meibom A., Wooden J., Norby J.W., Chamberlain C.P. (2003) Extreme 34S depletions in ZnS at the Mike gold deposit, Carlin Trend, Nevada: Evidence for bacteriogenic supergene sphalerite. *Geology*, **31**(10), 913. <https://doi.org/10.1130/g19831.1>
- Bénézech P., Saldi G.D., Dandurand J.L., Schott J. (2011) Experimental Determination of the Solubility Product of Magnesite at 50 to 200°C. *Chem. Geol.*, **286**(1-2), 21-31. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2011.04.016>
- Benning L.G., Phoenix V.R., Mountain B.W., Lappin-Scott H. (2005) Biosilicification: the role of cyanobacteria in silica sinter deposition. (Eds G. Gadd, K. Semple). *Micro-Organisms and Earth Systems*. Society for General Microbiology Symposia. Cambridge University Press, 131-150. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754852.008>
- Betekhtin A.G. (2023) Course of Mineralogy. Moscow, KDU Publ., 736 p. (In Russ.)
- Biondi J.C., Lopez M. (2017) Urucum neoproterozoic–Cambrian manganese deposits (MS, Brazil): biogenic participation in the ore genesis, geology, geochemistry, and depositional environment. *Ore Geol. Rev.*, **91**, 335-386. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.09.018>
- Blyuman A.A. (2009) Biogenic and hydrobiogenic gold of linear weathering crust. *Region. Geol. Metallogeniya*, **37**, 94-106. (In Russ.)
- Davies P.J., Bubela B. (1973) The transformation of nesquehonicite into hydromagnesite. *Chem. Geol.*, **12**(4), 289-300. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(73\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(73)90006-5)
- Deelman J.C. (2021) Magnesite, dolomite and carbonate groups. [Research Report] (formerly) Technische Universiteit Eindhoven. <https://hal.science/hal-03412979v2>
- Deelman J.C. (1999) Low-temperature nucleation of magnesite and dolomite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte*, 289-302.
- Deelman J.C. (2012) Are bacteria capable of precipitating magnesite? *Periodico di Mineralogia*, **81**, 225-235. <https://doi.org/10.2451/2012PM0013>
- Dobretsov N.L., Zhmodik S.M., Lazareva E.V., Bryanskaya A.V., Ponomarchuk V.A., Sarygool B.Y., Kirichenko I.S., Tolstov A.V., Karmanov N.S. (2021) Structural and morphological signs of microorganism participation in the formation of Nb-REE-rich ores of the Tomtor deposit (Russia). *Dokl. Earth Sci.*, **496**(2), 154-157. (In Russ.)
- Doinikova O.A., Petrov V.A. (2022) Ore-forming biogenic factor in the formation of sandstone-type uranium deposits. *Geol. Ore Depos.*, **64**(4), 406-420. (In Russ.)
- Dos Anjos A.P.A., Sifeddine A., Sanders C.J. et al. (2011) Synthesis of magnesite at low temperature. *Carbonates Evaporites*, **26**, 213-215. <https://doi.org/10.1007/s13146-011-0063-4>
- Eganov E.A. (1988) Phosphorite formation and stromatolites. Novosibirsk, IGIG Publ., 89 p. (In Russ.)
- Eugster P. (1970) Chemistry and origin of the brines of Lake Magadi, Kenya. *Mineral. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **3**, 213-235.
- Evensen N.M., Hamilton P.J., O'Nions R.K. (1978) Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 1199-1212.
- Fedorov V.S. (1951) Scientific bases of drilling modes. Moscow; Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 248 p. (In Russ.)
- Friedman I., Smith G.I., Hardcastle K.G. (1976) Studies of quaternary saline lakes-II. Isotopic and compositional changes during desiccation of the brines in Owens Lake, California, 1969–1971. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**(5), 501-511. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(76\)90218-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90218-0)
- Georgievskii A.F., Bugina V.M. (2019) Aphanitic genetic type of industrial phosphorites and conditions of their formation in the Okino-Khubsugul basin. Moscow, RUDN Publ., 294 p. (In Russ.)
- Georgievskii A.F., Zhegallo E.A., Bugina V.M. (2019) Microbiota of bauxites from the Ewa deposit (Guinea-Bissau). *Litol. Polez. Iskop.*, (6), 557-567. (In Russ.)
- Gerasimenko L.M. (2002) Actualistic paleontology of cyanobacterial communities. Doct. ... biol. sci. diss. Moscow, Institute of Microbiology, RAS, 70 p. (In Russ.)

- Gerasimenko L.M., Dubinin A.V., Zavarzin G.A. (1996) Alkaliphilic cyanobacteria of soda lakes of Tuva and their ecophysiology. *Microbiology*, **65**(6), 844-849. (In Russ.)
- Gerasimenko L.M., Goncharova I.V., Zaitseva L.V. (1998) Effect of phosphorus content in the medium on growth and mineralization of cyanobacteria. *Microbiologiya*, **67**(2), 254-259. (In Russ.)
- Gerasimenko L.M., Goncharova I.V., Zhegallo E.A., Zavarzin G.A., Zaitseva L.V., Tikhomirova N.S., Orleanskii V.K., Rozanov A.Y., Ushatinskaya G.T. (1996) Process of mineralization (phosphatization) of filamentous cyanobacteria. *Litol. Polez. Iskop.*, (2), 208-214. (In Russ.)
- Gerasimenko L.M., Ushatinskaya G.T. (2002) Cyanobacteria, cyanobacterial communities, mats, biofilms. *Bacterial Paleontology*. Moscow, PIN RAN Publ., 36-47. (In Russ.)
- Gerasimenko L.M., Ushatinskaya G.T. (2002) Experiments on fossilization. Phosphatization. *Bacterial paleontology*. Moscow, PIN RAN Publ., 59-66. (In Russ.)
- Gerasimenko L.M., Zavarzin G.A., Rozanov A.Y., Ushatinskaya G.T. (1999) The role of cyanobacteria in the formation of phosphate minerals. *Zhurnal Obshchei Biologii*, **60**(4), 415-430. (In Russ.)
- Gischler E., Gibson M.A., Oschmann W. (2008) Giant Holocene Freshwater Microbialites, Laguna Bacalar, Quintana Roo, Mexico. *Sedimentology*, **55**, 1293-1309. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00946.x>
- Goncharova I.V., Gerasimenko L.M. (1993) Dynamics of inorganic phosphorus consumption by Microcoleus chthonoplastes cells. *Microbiologiya*, **62**(4), 1048-1055. (In Russ.)
- Hänchen M., Prigiobbe V., Baciocchi R., Mazzotti M. (2008) Precipitation in the Mg-carbonate system-effects of temperature and CO₂. *Chem. Engin. Sci.*, **63**(4), 1012-1028. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.09.0>
- Hirst J.F. (2013) Sedimentology, diagenesis and hydrochemistry of the saline, alkaline lakes on the Cariboo Plateau, Interior British Columbia, Canada. PhD thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Ialova R.K. (2017) Continental weathering in the Mesozoic: features of mineral composition of profiles and distribution of rare earth elements. *Gornyi Informatsionno-analiticheskii Byulleten'*, **10**, 226-237. (In Russ.)
- Il'in A.V. (2008) Ancient (Ediacaran) phosphorites. *Tr. IGG RAN*, vyp. 587. Moscow, GEOS Publ., 160 p. (In Russ.)
- Ivanov V.V. (1994) Ecological geochemistry of elements. B. 1, 2. Moscow, Nedra Publ., 302 p. (In Russ.)
- Ivlev N.F., Pustyl'nikov A.M. (1982) Magnesite in Vendian-Lower Cambrian saline sediments of the south of the Siberian Platform. *Geol. Geophys.*, (1), 136-141. (In Russ.)
- Jones B.E., Grant W.D., Duckworth A.W., Owenson G.G. (1998) Microbial diversity of soda lakes. *Extremophiles*, **2**(3), 191-200. <https://doi.org/10.1007/s007920050060>
- Jones B.F., Eugster H.P., Rettig S.L. (1977) Hydrochemistry of the Lake Magadi basin, Kenya. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**(1), 53-72. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(77\)90186-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(77)90186-7)
- Kanaeva Z.K., Kanaev A.T. (2012) Microbiocenosis of chemolithotrophic bacteria of in-situ leaching solutions of the Karamurun uranium deposit. *Fundamental'nye Issledovaniya*, **5**(1), 153-157. (In Russ.)
- Kazakov A.V., Tikhomirova M.M., Plotnikova V.I. (1957) System of carbonate equilibria (dolomite, magnesite). *Tr. IGG RAN*, vyp. 152, Geol. Ser., (64), 13-58. (In Russ.)
- Kazmierczak J., Kempe S., Kremer B., Lopez-Garcia P., Moreira D., Tavera R. (2011) Hydrochemistry and microbialites of the alkaline crater lake Alchichica. *Mexico Facies*, **57**, 543-570.
- Kempe S., Kazmierczak J., Landmann G. et al. (1991) Largest known microbialites discovered in Lake Van, Turkey. *Nature*, **349**, 605-608. <https://doi.org/10.1038/349605a0>
- Khairullina G.Z., Shevelev A.I., Krutikov V.F., Urasin M.A., Rusina L.P. (1990) Shadow stromatolite structures of magnesites – results of recrystallization processes. *Mineralogical crystallography, crystallogenes, crystallogenes*. (Information materials). Syktyvkar, UrO RAN Publ., 70-71. (In Russ.)
- Krauskopf K. (1958) Sedimentary deposits of rare metals. *Problems of ore deposits*. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 375-478. (In Russ.)
- Krupenin M.T. (2005) Application of REE for genetic interpretation of formations of crystalline magnesite deposits in Northern Eurasia. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 152, 215-222. (In Russ.)
- Krylov I.N., Tikhomirova N.S., Orleanskii V.K. (1988) Toward the formation of siliceous microfossils. *Paleontol. Zhurnal*, (3), 249-259. (In Russ.)
- Kuznetsov V.G. (2004) Relation of cyanophyte evolution and stratigraphic placement of magnesites. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geologiya i Razvedka*, (4), 30-35. (In Russ.)
- Lein A.Y., Moskalev L.I., Bogdanov Y.A., Sagalevich A.M. (2000) Ocean hydrothermal systems and life. *Priroda*, (5), 47-55. (In Russ.)
- Levitskii V.I., Reznitskii L.Z., Levitskii I.V. (2019) Geochemistry of carbonate rocks of Early Precambrian Phanerozoic metamorphic complexes of Eastern Siberia, Northwest Siberia, and Pamir. *Geochimiya*, **64**(4), 409-426. (In Russ.)
- Manukovskii S.V., Belyaev V.I. (2000) To the question of bacterial-algal nature of some types of phosphorites of yolk phosphorites and phosphorite-bearing placers. *Vestnik Voronezh. Universiteta. Geologiya*, **5**(10), 41-47. (In Russ.)
- Maslov A.V. (2016) Neoproterozoic-Cambrian phosphorites and paleoceanography: data on the distribution of rare-earth elements. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 163, 102-107. (In Russ.)
- Moiseenko V.G., Kuimova N.G., Makeeva T.B., Pavlova L.M. (1999) Formation of biogenic gold by mycelial fungi. *Dokl. Earth Sci.*, **364**(4), 535-537. (In Russ.)
- Möller P. (1989) Nucleation processes of magnesite. (Ed. P. Möller). *Magnesite*, 287-292. Geology, mineralogy, geochemistry, formation of Mg-carbonates. Berlin, Stuttgart, Borntraeger, 300 p.
- Neskoromnykh V.V. (2012) Designing wells for solid minerals. Krasnoyarsk, SFU Publ., 294 p. (In Russ.)
- Nikiforov A.V. (2003) Report on exploration of Khalilovskoye deposit of amorphous magnesite in the Gaisky district of the Orenburg region in 1999–2002. Orsk, 315 p. (In Russ.)
- Novikov V.M., Bortnikov N.S., Boeva N.M., Zhukhlisov A.P., Zhegallo E.A., Soboleva S.V., Novakova A.A. (2017) Biogenic iron oxide nanominerals in the weathering crusts of basalts of continental margins of East Asia on the example of the Russian Far East and Vietnam. Article 3. Magnetite. *Vestnik VGU. Ser.: Geol.*, (2), 61-65. (In Russ.)

- Novoselov A.K., Lim A., Goetschl A., Loiko K., Mavromatis S.V., Pokrovsky O. (2019) Mg-Rich Authigenic Carbonates in Coastal Facies of the Vtoroe Zasechnoe Lake (Southwest Siberia): First Assessment and Possible Mechanisms of Formation. *Minerals*, **9**(12), 763. <https://doi.org/10.3390/min9120763>
- Okishev K.Y. (2007) Crystallochemistry and defects of crystal structure. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 97 p. (In Russ.)
- Pal'gova A.Y. (2015) Review of the world reserves of magnesia raw materials. *Molodoi Uchenyi*, **3**(83), 193-196. (In Russ.)
- Pinevich A.V. (2005) Microbiology of iron and manganese. St.Petersburg, St.Petersburg University Publ., 374 p. (In Russ.)
- Pokrovsky O.S., Schott J. (1999) Processes at the Magnesium-Bearing Carbonates/Solution Interface. II. Kinetics and Mechanism of Magnesite Dissolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(6), 881-897. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00013-7)
- Power I.M., Harrison A.L., Dipple G.M., Shaun S.W., Barker L.L., Fallon S.J. (2019). Magnesite formation in playa environments near Atlin, British Columbia, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **255**, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.04.008>
- Power I.M., Kenward P.A., Dipple G.M., Raudsepp M. (2017) Room Temperature Magnesite Precipitation. *Cryst. Growth Des.*, **17**(11), 5652-5659. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.7b003>
- Power I., Wilson S., Thom J., Dipple G., Gabites J., Southam G. (2009) The hydromagnesite playas of Atlin, British Columbia, Canada: A biogeochemical model for CO₂ sequestration. *Chem. Geol.*, **260**(3-4), 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.01.012>
- Power I.M., Wilson S., Thom J.M., Dipple G.M., Southam G. (2007) Biologically induced mineralization of dyspingite by cyanobacteria from an alkaline wetland near Atlin, British Columbia, Canada. *Geochem. Trans.*, **8**(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-8-13>. PMID: 18053262; PMCID: PMC2213640
- Renaut R.W. (1993) Morphology, distribution, and preservation potential of microbial mats in the hydromagnesite-magnesite playas of the Cariboo Plateau, British Columbia, Canada. *Hydrobiologia*, **267**, 75-98. <https://doi.org/10.1007/BF00018792>
- Renaut R.W., Long P.R. (1989) Sedimentology of the saline lakes of the Cariboo Plateau, Interior British Columbia, Canada. *Sediment. Geol.*, **64**(4), 239-264. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(89\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0037-0738(89)90051-1)
- Rozanov A.Y. (2002) Fossil bacteria, sedimentation and oreogenesis. *Bacterial Paleontology*. Moscow, PIN RAN Publ., 107-114. (In Russ.)
- Rozanov A.Y., Astaf'eva M.M., Zaitseva L.V., Alfimova N.A., Felitsyn S.B. (2016) Cyanobacteria (?) in ferruginous quartzites of the Kursk Magnetic Anomaly. *Dokl. Earth Sci.*, **470**(3), 1-3. (In Russ.)
- Rozanov A.Y., Zhegallo E.A. (1989) To the problem of genesis of ancient phosphorites of Asia. *Litol. Polez. Iskop.*, **3**(3), 67-82. (In Russ.)
- Saldi G.D., Jordan G., Schott J., Oelkers E.H. (2009) Magnesite growth rates as a function of temperature and saturation state. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**(19), 5646-5657. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.06.035>
- Samoilov Y.V. (1921) Agronomic ores. Moscow, Gosizdat Publ., 23 p. (In Russ.)
- Samoilov Y.V. (1921) Bioliths as an instrument of comprehension of life of former geologic epochs. *Priroda*, (1-3), 25-44. (In Russ.)
- Samoilov Y.V. (1929) Bioliths. Posthumous collection of articles. Leningrad, Nauchkhimtekhnizdat Publ., 140 p. (In Russ.)
- Santos H. (2023) Mechanisms of Mg carbonates precipitation and implications for CO₂ capture and utilization/storage. University of Oulu, Fibre and Particle Engineering Research Unit. <https://doi.org/10.23729/75e78ff4-9f77-4d7a-93e2-983ccb7e1bfd>
- Sanz-Montero M.E., Cabestrero Ó., Sánchez-Román M. (2019) Microbial Mg-rich Carbonates in an Extreme Alkaline Lake (Las Eras, Central Spain). *Front Microbiol.*, **7**(10), 148. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00148>. PMID: 30800103; PMCID: PMC6376964
- Sanz-Montero M., Rodríguez-Aranda J. (2012) Magnesite formation by microbial activity: Evidence from a Miocene hypersaline lake. *Sediment. Geol.*, **263-264**, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2011.08.004>
- Sayles F.L., Fyfe W.S. (1973) The Crystallization of Magnesite from Aqueous Solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**(1), 87-99. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90246-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90246-9)
- Scherbakova T.A. (2018) Magnesite formation in Cenozoic sedimentary complexes. Doct. geol. and min. sci. diss. Kazan, KFU Publ., 266 p. (In Russ.)
- Shatrov V.A. (2007) Lanthanides as indicators of sedimentation settings (based on the analysis of reference sections of the Proterozoic and Phanerozoic of the East European Platform). Doct. geol. and min. sci. diss. Moscow, VSU Publ., 36 p. (In Russ.)
- Shatrov V.A., Voitsekhovskiy G.V. (2013) Lanthanides and highly mobile elements in sedimentary and meta-sedimentary formations as indicators of basement tectonic activity in platform conditions. *Geochemistry*, **3**(3), 245-255.
- Shirokova L.S., Mavromatis V., Bundeleva I.A. et al. (2013) Using Mg Isotopes to Trace Cyanobacterially Mediated Magnesium Carbonate Precipitation in Alkaline Lakes. *Aquat. Geochem.*, **19**, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10498-012-9174-3>
- Shkol'nik E.L., Tang Tianfu, Eganov E.A., Rozanov A.Y., Baturin G.N., Zhegallo E.A., Xue Yaosong, Yu Qunliu, Jel K., Piner D., Medrano M. (1999) The nature of phosphate grains and phosphorites of the largest basins of the world. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 207 p. (In Russ.)
- Shkol'nik E.L., Zhegallo E.A., Bogatyrev B.A., Bugel'skii Y.Y., Slukin A.D., Novikov V.M., Eganov E.A., Georgievskii A.F., Zhukov V.V., Myskin V.I., Odokii B.N. (2004) Biomorph structures in bauxites (based on the results of electron-microscopic study). Moscow, Eslan Publ., 3-13. (In Russ.)
- Slukin A.D., Boeva N.M., Zhegallo E.A., Zaitseva L.V. (2016) Biominerals of lateritic bauxites – new data based on the results of electron microscopic study. *Novye Dannye o Mineralakh*, vyp. 51, 52-61. (In Russ.)
- Slukin A.D., Bortnikov N.S., Novikov V.M., Zhegallo E.A., Boeva N.M., Shkol'nik E.L. (2013) Biominerals of lateritic weathering crusts as products of life activity of fossil organisms. *Organic Mineralogy*. Chernogolovka, IPFKh RAN Publ., 139-142. (In Russ.)
- Sorokovikova E.G. (2008) Cyanobacteria from thermal

- springs of the Baikal rift zone and their role in silica deposition as model objects for the study of microfossils. Cand. biol. sci. diss. Irkutsk, Limnological Institute, SB RAS, 18 p. (In Russ.)
- Southam G., Lengke M., Fairbrother L., Reith F. (2009) The Biogeochemistry of Gold. *Elements*, **5**(5), 303-307. <https://doi.org/10.2113/gselements.5.5.303>
- Starostin V.I., Sakia D.R. (2015) Evolution of views on the origin of the Witwatersrand gold deposit. *Vestn. Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geol.*, (2), 32-38. (In Russ.)
- Tikhomirova N.S., Orleanskii V.K. (1994) Modeling of phosphate deposition in laboratory cultures of cyanobacteria. *Litol. Polez. Iskop.*, (1), 135-140. (In Russ.)
- Toner J.D., Catling D.C. (2020) A carbonate-rich lake solution to the phosphate problem of the origin of life. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **117**(2), 883-888. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916109117>
- Toporski J.K., Steele A., Westall F., Thomas-Keprta K.L., McKay D.S. (2002) The simulated silicification of bacteria – new clues to the modes and timing of bacterial preservation and implications for the search for extraterrestrial microfossils. *Astrobiology*, **2**(1), 1-26. <https://doi.org/10.1089/153110702753621312>. PMID: 12449852
- Valdiya K.S. (1968) Origin of the magnesite deposits of southern Pithoragarh, Kumaun Himalaya, India. *Econ. Geol.*, **63**(8), 924-934. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.63.8.924>
- Voitkevich G.V., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S., Prokhorov V.G. (1977) Brief reference book on geochemistry. Moscow, Nedra Publ., 184 p. (In Russ.)
- Vandeginste V. (2021) Effect of PH Cycling and Zinc Ions on Calcium and Magnesium Carbonate Formation in Saline Fluids at Low Temperature. *Minerals*, **11**(7), 723. <https://doi.org/10.3390/MIN11070723>
- Xu J., Yan C., Zhang F., Konishi H., Xu H., Teng H.H. (2013) Testing the cation-hydration effect on the crystallization of Ca-Mg-CO₃ systems. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **110**(44), 17750-5. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307612110>
- Zavarzin G.A., Zhilina T.N. (2000) Soda lakes – a natural model of the ancient biosphere of the continents. *Priroda*, (2), 45-55. (In Russ.)
- Zeng L.Q., Yi H.S., Xia G.Q. et al. (2019) Palaeoenvironmental setting of lacustrine stromatolites in the Miocene Wudaoliang Group, northern Tibetan Plateau. *J. Palaeogeogr.*, **8**(18), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s42501-019-0033-7>
- Zhegallo E.A., Rozanov A.Y. (2002) Tomtor rare-earth-niobium ores. *Bacterial paleontology*. Moscow, PIN RAN Publ., 111-115. (In Russ.)
- Zhegallo E.A., Rozanov A.Yu., Ushatinskaya G.T. (2002) Phosphorites. *Bacterial paleontology*. Moscow, PIN RAN Publ., 97-102. (In Russ.)
- Zhegallo E.A., Zaitseva L.V., Karpov G.A., Samylina O.S. (2021) Modern fossilization and geysirites of Kamchatka. *Bacterial paleontology*. Moscow, PIN RAN Publ., 27-37. (In Russ.)
- Zhou H., Gao D., Huang L., Zhu G., Zhang T., Liu J., Zhai X., Xiong R., Wang S., Zhang Y. (2023) Characteristics and genesis of dolomite in the lower Cambrian Xiaoerbulake Formation of the western Tarim Basin, China. *Front. Earth Sci.*, **10**, 1075941. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1075941>