

УДК 56.012 (553.2)

DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-3-376-390

## Микрофоссилии пригидротермально-осадочных отложений Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал)

Л. В. Леонова<sup>1</sup>, Е. И. Сорока<sup>1</sup>, А. А. Галеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,  
e-mails: lvleonova@yandex.ru, elsoroka@yandex.ru

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, e-mail: akhmet.galeev@kpfu.ru

Поступила в редакцию 20.07.2021 г., принята к печати 11.01.2022 г.

**Объект исследований.** Фрамбоидальные пириты и микроконкреции сульфидного состава из углеродисто-кремнистых и рудных пород Сафьяновского месторождения. Цель работы – выделение признаков микробных образований в пригидротермально-осадочных отложениях месторождения. **Методы исследований.** Основными методами изучения являются сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и энерго-дисперсионный анализ (ЭДС). **Результаты.** В исследованных образцах (из рудных и углеродисто-кремнистых пород) были установлены сохранившиеся минерализованные диоксидом кремния чехлы, в виде пленки покрывающие фрамбоидальные пириты. Кроме того, было определено участие нитевидных микрофоссилий и фрамбоидов в строении микроконкреций. В колчеданной породе обнаружены фоссилии трубок вестиментифер и полихет, к которым приурочены фрамбоидальные пириты. **Заключение.** Проведенные исследования позволили выявить ряд признаков фоссилизированных остатков микробных сообществ в пригидротермально-осадочных породах Сафьяновского колчеданного месторождения. Поскольку прокариотные организмы являются пионерными в пригидротермальных оазисах, их продолжительное активное существование создает базу для второго трофического звена – макрофауны-фильтраторов и эндосимбиотрофов. Они, в свою очередь, обеспечивают питание следующим звеньям трофической пирамиды. Многие исследователи рассматривают микроконкреции и фрамбоидальные пириты как следы жизнедеятельности микробных сообществ, хотя единого мнения по этому вопросу еще нет.

**Ключевые слова:** пригидротермально-осадочные отложения, фрамбоиды и конкреции пирита, фоссилии вестиментифер и полихет, Сафьяновское колчеданное месторождение

### Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № АААА-А18-118052590028-9 и № АААА-А18-118053090045-8 с использованием оборудования ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП “Геоаналитик” ИГГ УрО РАН осуществляются при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680 и частично при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-05-00151А

## Microfossils in bottom-hydrothermal sediments of the Saf’yanovskoe Cu-Zn deposit (Middle Urals)

L. V. Leonova<sup>1</sup>, E. I. Soroka<sup>1</sup>, A. A. Galeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mails: lvleonova@yandex.ru; elsoroka@yandex.ru

<sup>2</sup>Kazan (Volga) Federal University, 18 Kremlin st., Kazan, 420008, e-mail: akhmet.galeev@kpfu.ru

Received 20.07.2021, accepted 11.01.2022

**Research subject.** Framboidal pyrites and sulfide micro-concretions in carbonaceous-siliceous and ore rocks of the Safyanovskoye deposit (Middle Urals). **Aim.** To identify the signs of vital activity of microbial communities in bottom-hydrothermal deposits using the example of the Safyanovskoye sulfide deposit. **The methods.** Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray analysis (EDX). **Results.** The analyzed ore and carbonaceous-siliceous rock samples showed the presence of mineralized silicon dioxide films covering framboidal pyrites. Micro-concretions were found to consist of microfossils of filamentous organisms and framboids. Pyrite samples included the re-

**Для цитирования:** Леонова Л.В., Сорока Е.И., Галеев А.А. (2022) Микрофоссилии пригидротермально-осадочных отложений Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал). *Литосфера*, 22(3), 376-390. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-376-390>

**For citation:** Leonova L.V., Soroka E.I., Galeev A.A. (2022) Microfossils in bottom-hydrothermal sediments of the Saf’yanovskoe Cu-Zn deposit (Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, 22(3), 376-390. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-3-376-390>

© Л.В. Леонова, Е.И. Сорока, А.А. Галеев, 2022

mains of tubular casts of sulfidized vestimentifera and polychaetes, associated with framboids. The possibility of using fossilized remains of microbial communities for distinguishing bottom-hydrothermal facies among pyrite deposits was confirmed. *Conclusions.* Hydrothermal-sedimentary deposits are characterized by the traces of specific microbial communities, since prokaryotic organisms were pioneers in hydrothermal oases. Their long active existence created a basis for the second trophic link, i.e. filter feeding macrofauna and endosymbiotrophs. These organisms, in turn, formed another level in the food chain of the trophic pyramid. It is believed that micro-concretions and framboidal pyrites are indicators of the vital activity of microbial communities.

**Keywords:** *bottom-hydrothermal sediments, framboidal pyrites, vestimentifera and polychaetes, Saf'yanovskoe Cu-Zn deposit*

#### Funding information

*The studies were carried out as part of the IGG UB RAS state assignment (state registration № AAAA-A18-118052590028-9 and № AAAA-A18-118053090045-8) using the facilities of the "Geoanalitik" analytical centre of the IGG UB RAS. The upgrading and development of the "Geoanalitik" analytical centre is financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement № 075-15-2021-680 and partially with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 20-05-00151A)*

#### Acknowledgements

The authors express gratitude to the chief geologist N.V. Leshchev and the staff of "Saf'yanmed" for their help in conducting field work, as well as to N.P. Safina for providing research samples.

## ВВЕДЕНИЕ

Благодаря активному изучению "черных курильщиков" современных океанов, в последнее время ведущая роль в формировании древних колчеданных месторождений отдается именно пригидротермально-осадочным процессам (Масленников, Зайков, 2006; Масленников 2006). Поэтому изучение генезиса рудовмещающих толщ и рудных пород требует детального литолого-палеонтологического подхода. О наиболее раннем пригидротермально-осадочном накоплении рудного вещества на Сафьяновском месторождении (Средний Урал) свидетельствуют установленные здесь донные, придонные гидротермальные рудные, а также гидротермально-биогенные фации (Масленников, 2006, Сафина, Масленников, 2009; Масленников и др., 2016). Маркером биогенно-гидротермальных условий являются минерализованные остатки макробиоты *in situ*. Также в зонах разгрузки газонасыщенных флюидов активно развиваются хемоавтотрофные группы макробиоты. Источниками энергии для них являются восстановленные минеральные соединения ( $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $S$ ,  $S_2O_3^{2-}$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ) (Леин и др., 2000). В придонном слое около современных черных курильщиков формируется субстрат, состоящий из донного осадка и тонкодисперсного рудного вещества, которое выпадает при смешении высокоминерализованных гидротермальных вод (горячие, восстановленные кислоты) с придонными океанскими водами

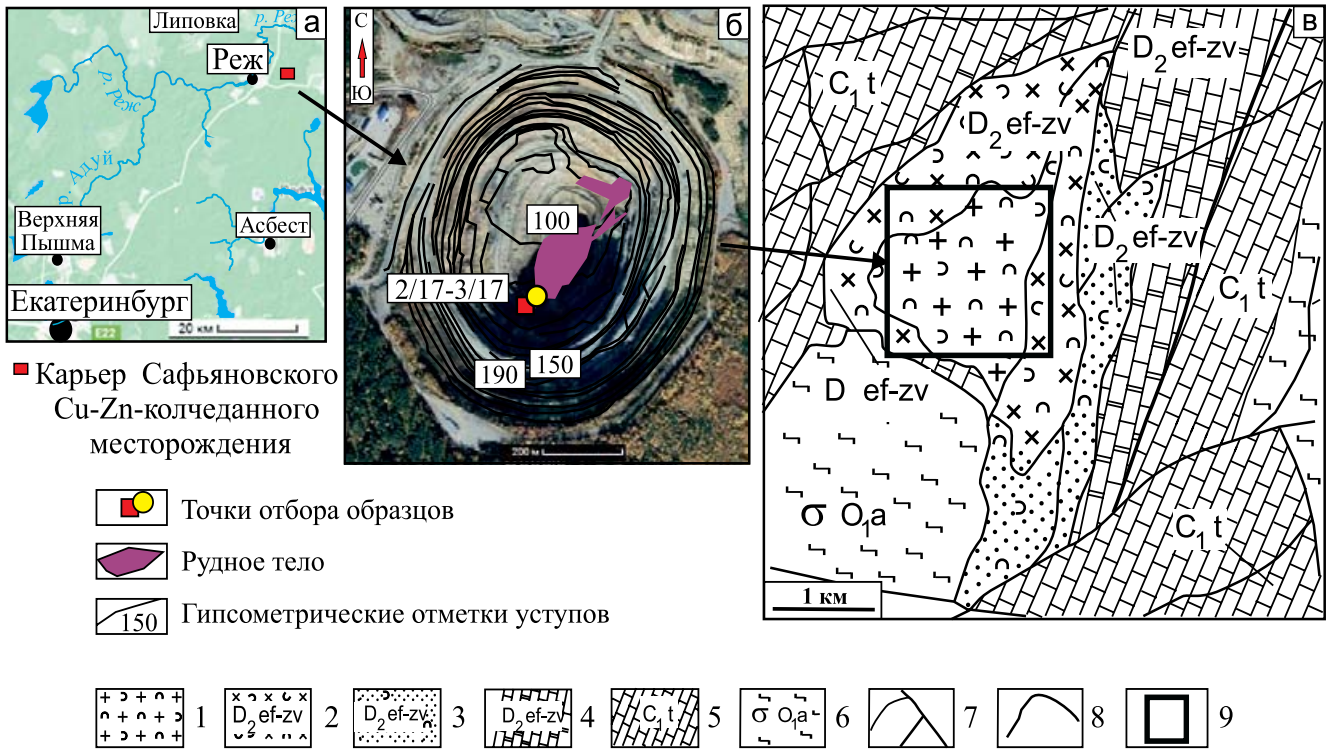
(холодные, окисленные,  $pH = 7.5-8.5$ ). На палеоматериале невозможно определить, сформировались ли микробиальные образования на дне совместно с бентосной макрофауной, или с оседающим рудным веществом из более высоких слоев воды, поэтому мы относим их к пригидротермально-осадочной фации в широком смысле понимания термина. Непосредственно клетки бактерий не сохраняются как фоссилии, однако продукты микробиальной жизнедеятельности (внеклеточные биополимеры, биопленки, некоторые метаболиты) способны к минерализации и формированию биохемогенно-микробиальных образований (Заварзин, 1993; Орлеанский и др., 2007), генезис которых на палеоматериале нередко интерпретируется как хемогенный.

Целью данной работы является выделение признаков микробиальных образований в пригидротермально-осадочных отложениях на примере Сафьяновского колчеданного месторождения.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сафьяновское медно-цинково-колчеданное месторождение (рис. 1) расположено в 9 км к северо-востоку от г. Реж в пределах Восточно-Уральской мегазоны Среднего Урала.

Вулканическая часть Алапаевско-Режевской зоны, к которой приурочен Режевской рудный район, представлена аллохтонными структурами (Коровко, Двоглазов, 1991). Месторождение является типичным представителем дацит-риолит-чернослан-



**Рис. 1.** Географическое положение (а), космоснимок карьера (б), геологическая карта Сафьяновского рудного поля, по (Шереметьев, 1990; Коровко и др., 1999) (в).

1 – риодациты, андезиты, туфы среднего-кислого состава с прослоями углеродисто-кремнистых пород; 2 – вулканогенно-осадочные породы: туфы, туфопесчаники с прослоями известняков; 3 – песчаники, алевропесчаники; 4 – известняки, битуминозные известняки; 5 – известняки; 6 – серпентиниты; 7 – разломы; 8 – геологические границы; 9 – Сафьяновское рудное поле.

**Fig. 1.** Geographical location (a), geological map of the Saf'yanovskoe ore field by (Sheremet'ev, 1990; Korovko et al., 1999) (v) and the Saf'yanovskii mining quarry scheme (б).

1 – andesites, rhyodacites, rhyolites, tuffs, carbonaceous-siliceous rocks; 2 – volcanic-sedimentary rock: tuffs, sandstones with layers of limestones; 3 – sandstones, siltstones; 4 – limestones, bituminous organic detrital limestones; 5 – limestones; 6 – serpentinites 7 – the main faults; 8 – geological borders; 9 – quarry contour.

цевой ассоциации (Масленников, 2006). Вопрос о геологическом возрасте месторождения в настоящее время остается дискуссионным. Так, вулканогенные породы рудовмещающего комплекса определены как базальт-риолитовая формация среднего девона (Коровко и др., 1999) или базальт-андезит-дацит-риолитовой формация нижнего-среднего девона (Смирнов, 2012). По последним данным U-Pb датировок цирконов ( $422.8 \pm 3.7$  и  $422.8 \pm 2.0$  млн лет) из рудовмещающих вулканогенных пород, в их составе имеются вулканыты пржидольского яруса верхнего силура (Притчин и др, 2021). Возраст вулканогенно-осадочных пород и известняков по фаунистическим находкам определен как ранне-среднедевонский (Пучков и др., 1990; Амон, Коровко, 1992; Коровко и др., 1999; Чувашов и др., 2011; Анфимов и др., 2015).

В соответствии с реконструкцией геодинамической обстановки (Koroteev et al., 1997), формирование месторождения происходило в задуговом палеобассейне либо в пределах фрагментов островодужных образований силурийской Зауральской палеодуги (Притчин и др, 2021).

На месторождении выделены сплошные (медные и медно-цинковые), прожилково-штокверковые рудные столбы, а также вкрапленные медные и медно-цинковые руды. Кроме того, в состав рудовмещающей толщи входят углеродисто-кремнистые образования (Ярославцева и др., 2012), изучение которых остается актуальным, поскольку они содержат микрофоссилии фораминифер (Анфимов и др., 2015) с фрамбоидальными пиритами, менее изменены гидротермальными процессами, по сравнению с колчеданными породами, и явля-



**Рис. 2.** Фото образцов фоссилий бентосной макрофауны, характерной для ископаемых аналогов “черных курильщиков”.

а – образец пирита из шахты Сафьяновского месторождения (Саф 7/18), в котором были обнаружены сульфидизированные трубчатые образования, интерпретируемые как трубки вестиментифер; б – кристаллический флюорит зеленого цвета; в – сульфидизированная трубка вестиментиферы с сохранившейся складкой (месторождение Яман-Касы); г – сульфидизированные трубки червей полихет (месторождение Яман-Касы); д – пиритовая конкреция из пород, вскрытых на верхних уступах Сафьяновского месторождения; е, ж – конкреции из пород месторождения Яман-Касы.

**Fig. 2.** Photos of fossils of benthic macrofauna which is characterized to fossil analogues of “black smokers”.

а – pyrite sample from the Saf'yanovskoe deposit (Saf 7/18) in which sulfidized tubular forms interpreted as vestimentifer tubes have been found; б – crystalline green fluorite; в – sulfidized vestimentifer tube with preserved fold (Yaman-Kasy deposit); г – sulfidized tubes of polychaete worms (Yaman-Kasy deposit); д – pyrite nodule of the rocks exposed on the Saf'yanovskoe quarry upper ledges; е, ж – nodules from the rocks of Yaman-Kasy deposit.

ются перспективными для микропалеонтологического изучения.

Сафьяновское месторождение отрабатывалось карьером, а в настоящее время добыча ведется шахтным способом. На скеле одного из рудных

образцов (Саф 7/18), отобранных в шахте с глубины 270 м от поверхности (горизонт –60 м, счет от забоя карьера), обнаружены трубчатые образования, интерпретируемые как фоссилии вестиментифер (рис. 2а). В этом же образце присутствуют

кристаллы зеленого флюорита (рис. 2б), что свидетельствует о наложенных гидротермальных процессах. Ранее было установлено, что в колломорфных пиритовых рудах месторождения флюорит ассоциирует с галенитом, сфалеритом, халькопиритом и блеклыми рудами, которые, как и барит, заполняют межзерновое пространство между кристаллами (Сафина и др., 2021).

Для вестиментифер – группы морских беспозвоночных аннелид (класс погонофоры) – характерны мягкие хитиновые трубки, способные минерализоваться и сохраняться в пригидротермально-осадочных отложениях. Обнаруженные нами фрагменты фоссилий имеют диаметр 1–2 см и отчетливо видимую стенку. На одном из участков (см. рис. 2а) трубка смята складкой, что указывает на первоначально мягкий субстрат стенок трубок и их минерализацию уже после захоронения. Подобную складку смятия демонстрирует один из образцов коллекции (см. рис. 2в), собранной Л.В. Леоновой на месторождении Яман-Касы (Южный Урал) по совету В.В. Масленникова в качестве эталонной фауны ископаемых оазисов черных курильщиков.

В комплексе оруденелых остатков бентосной макрофауны месторождения Яман-Касы, сопутствующих вестиментиферам, также были найдены фоссилии полихет (см. рис. 2г), двустворчатых моллюсков, колпачковых гастропод и беззамковых брахиопод.

На одном из верхних уступов Сафьяновского карьера в глыбе колчеданной руды нами была найдена конкреция пирита (см. рис. 2д). Аналогичные колчеданные конкреции встречаются и на месторождении Яман-Касы (см. рис. 2е, ж).

Яман-Касинские фаунистические остатки, благодаря многочисленности и прекрасной сохранности, ранее были хорошо изучены (Кузнецов и др., 1993; Зайков и др., 1995; Шпанская и др., 1999; Масленников и др., 2016). Учитывая морфологическое сходство (размеры около 2 см, стенки не скульптурированные, мягкие, способные сминаться) и уверенную диагностику яман-касинских вестиментифер, нашу находку мы также относим к этой группе животных.

На Сафьяновском месторождении информации о находках фоссилий вестиментифер пока нет, однако в карьере среди пород сульфидного состава В.В. Масленниковым были установлены и изучены сульфидизированные остатки трубчатых червей-полихет, которые, как и вестиментиферы, встречаются в экосистемах типа черных курильщиков и маркируют гидротермально-биогенную фацию (Масленников, 2006; Сафина и др., 2009; Масленников и др., 2016). Находки минерализованных трубок червей-полихет также обнаружены нами в обр. Саф 7/18 колчеданной породы из шахты. Они отличаются от вестиментифер значительно меньшим диаметром трубок и многослойным строением стенок на поперечном и продольном срезе

(рис. 3а–д). Других представителей макрофауны пока не обнаружено.

### Методы и результаты исследований микрофоссилий Сафьяновского месторождения

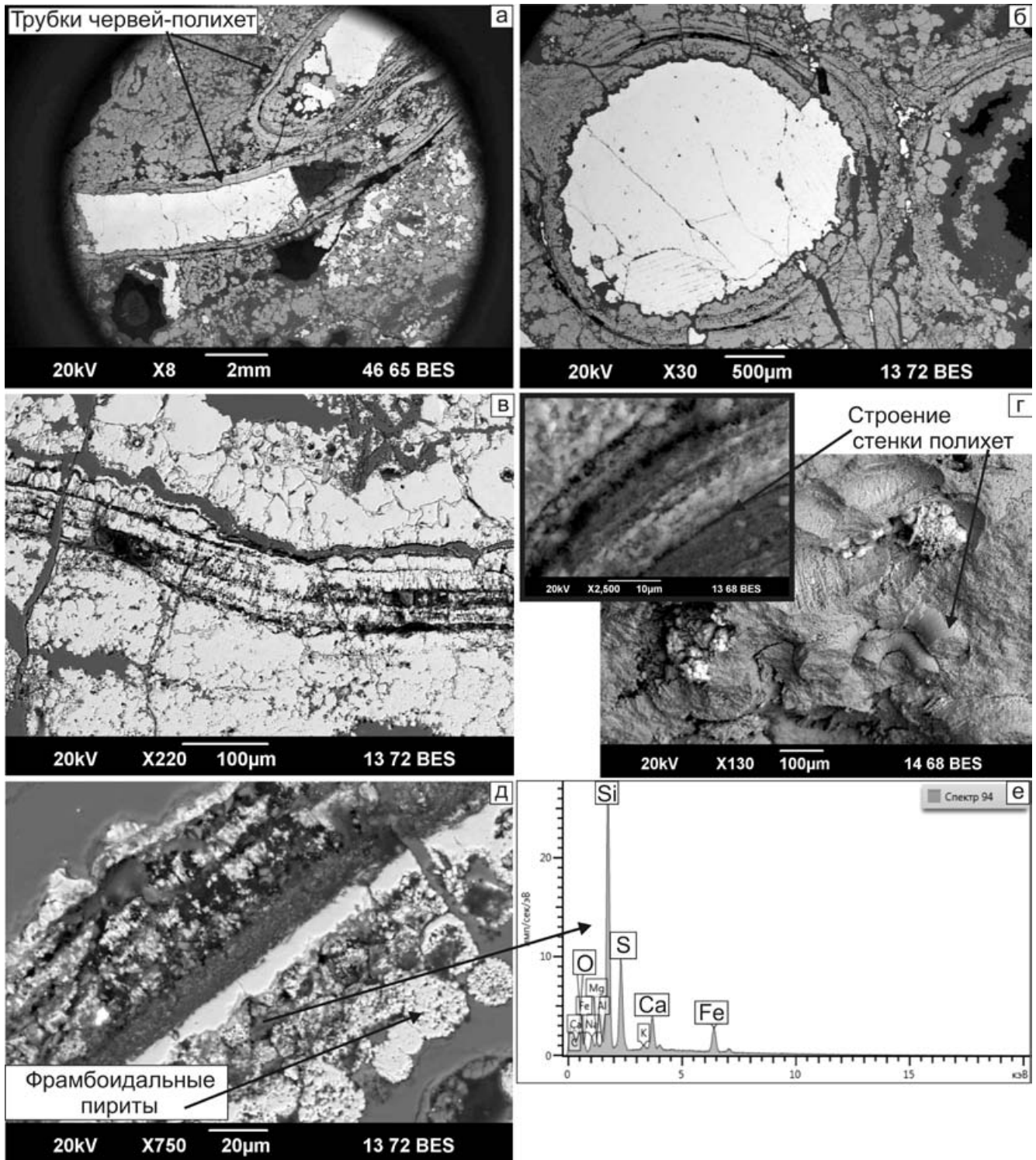
Полированные шлифы, сделанные из штуфа Саф 7/18 с сульфидизированными остатками макрофоссилий, и шашка с образцом углеродистокремнистой породы, предоставленная нам Н.П. Сафиной, изучались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (JSM-6390LV JEOL) с ЭДС-спектрометром INCA Energy 450 X-max 80, напыление углеродом).

#### Макрофоссилии – трубки полихет

По результатам исследования полированных шлифов из образца Саф 7/18 Сафьяновского месторождения можно отметить, что стенки трубок червей-полихет (см. рис. 3а, б), несмотря на замещение сульфидными минералами, сохранили первоначальную многослойную структуру стенок (см. рис. 3в). В качестве примера на рис. 3г приводится СЭМ фото трубок полихет из верхнемиоценового биогермного комплекса карбонатных отложений со следами метанового сипа (мыс Казантип, Керченский п-ов, Крым) (Antoshkina et al., 2020). На врезке (см. рис. 3г) видно многослойное строение стенок, характерное для этих морских трубокочелюв.

Среди полихет – обитателей черных курильщиков известны экстремальные “помпейские черви”, формировавшие из внеклеточного белка коллагена многослойные трубки, на которых селились бактериальные эпibiонты-обрастатели (Демина, Галкин, 2010), элементоотлагающие прокариоты, способствующие минерализации коллагена трубок. У менее термофильных, но широко распространенных серпулид трубки карбонатные (кальцитовые). А полихеты-сабеллиды строили трубки из материала, в состав которого включены частицы грунта, скрепленные выделениями кожных желез.

Первичный состав и таксономическую принадлежность (до рода) изучаемых трубок полихет установить проблематично, так как сейчас это биоморфозы замещения, однако, на СЭМ фото (см. рис. 3в, д) видно, что состав стенки многослойный и неоднородный. ЭДС-спектры подтверждают сложный элементный состав (см. рис. 3е), где, кроме сульфида железа, можно отметить диоксид кремния, а также присутствие кальция и незначительное количество магния, калия и алюминия. С внутренней стороны трубки наблюдается обрастание фрамбоидальными пиритами (см. рис. 3д). Аналогичное многослойное строение стенок и ассоциация с фрамбоидальными пиритами отмечены В.В. Масленниковым при изучении трубок полихет (Масленников и др., 2016).



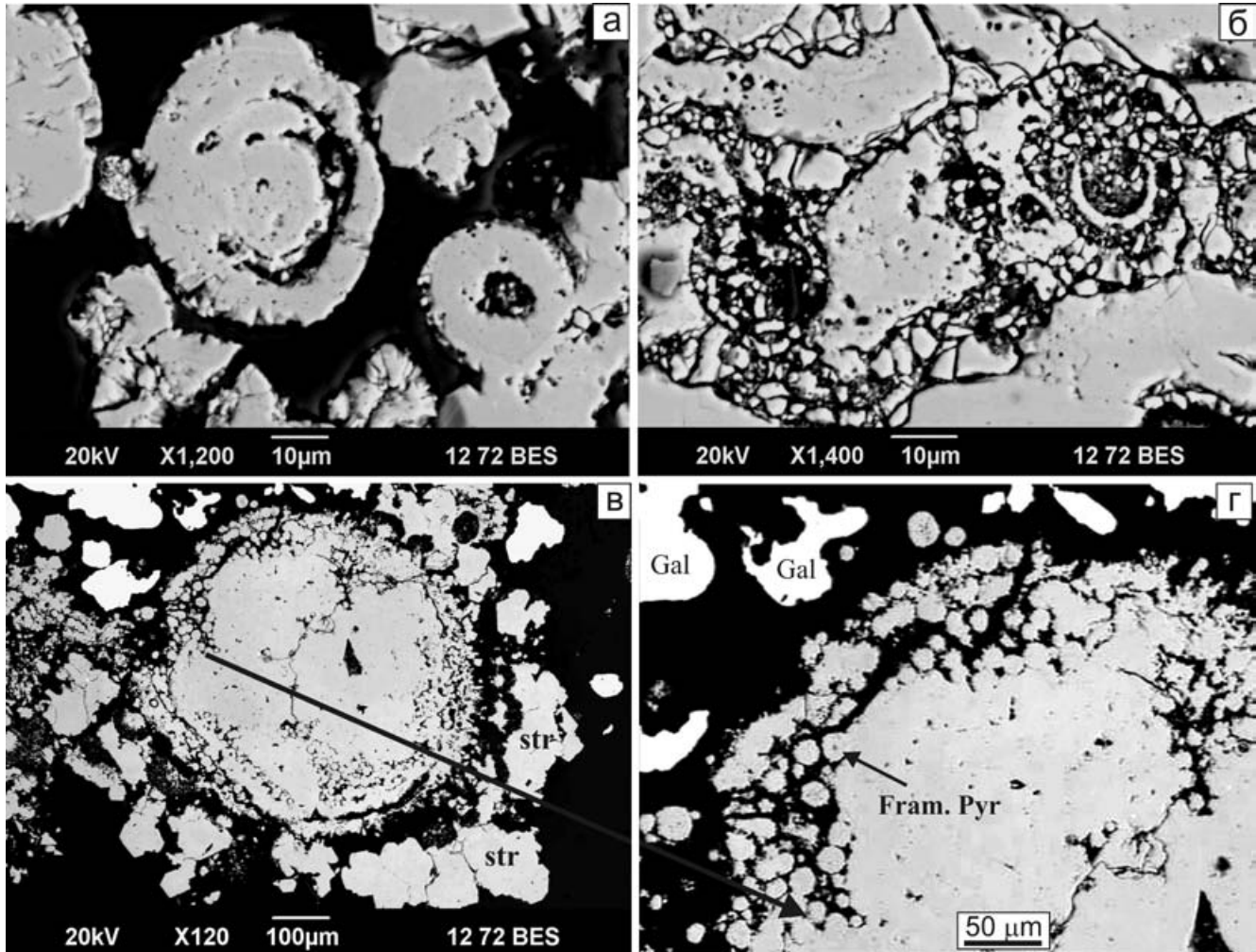
**Рис. 3.** СЭМ-фото трубок червей-полихет из сульфидной породы Сафьяновского месторождения.

а – две трубки полихет в продольном срезе; б – трубка полихеты в поперечном срезе; в – поперечный срез трубки с сохранившимся многослойным строением, несмотря на псевдоморфное замещение пиритом; г – для сравнения приводится микроструктура полихет из палеоген-неогеновых карбонатных отложений со следами сипов (Крым, мыс Казантип); д – СЭМ-фото детального строения стенки изучаемой полихеты с фрамбоидальными пиритами; е – ЭДС-спектр элементного состава стенки полихеты.

**Fig. 3.** BSE photos of tube worms-polychaete of the rocks of the Saf'yanovskoe deposit.

а – two polychaete tubes in the longitudinal section; б – polychaete tube in the cross section; в – tube's cross section with a pre-

served multi-layered structure despite the pseudomorphic substitution with pyrite; г – in comparison the microstructure of polychaetes from Paleogene-Neogene carbonate deposits with traces of sips (Crimea, Cape Kazantip) is given; д – BSE photo of a detailed structure of the wall of the studied polychaete with framboidal pyrites; e – EMF spectra of the chemical composition of a polychaete wall.



**Рис. 4-1.** СЭМ-фото пиритовых микроконкреций.

а – типичная конкреционная концентрическая зональность; б – концентричность сохраняется даже при метаморфизме; в – микроконкреция с фрамбоидальными пиритами в центральной части, str – строматолитоподобные структуры в краевой части; г – увеличенный фрагмент этой микроконкреции, Gal – галенит, Fram. Pyr – фрамбоидальные пириты.

**Fig. 4-1.** BSE photos of the pyrite micronodules.

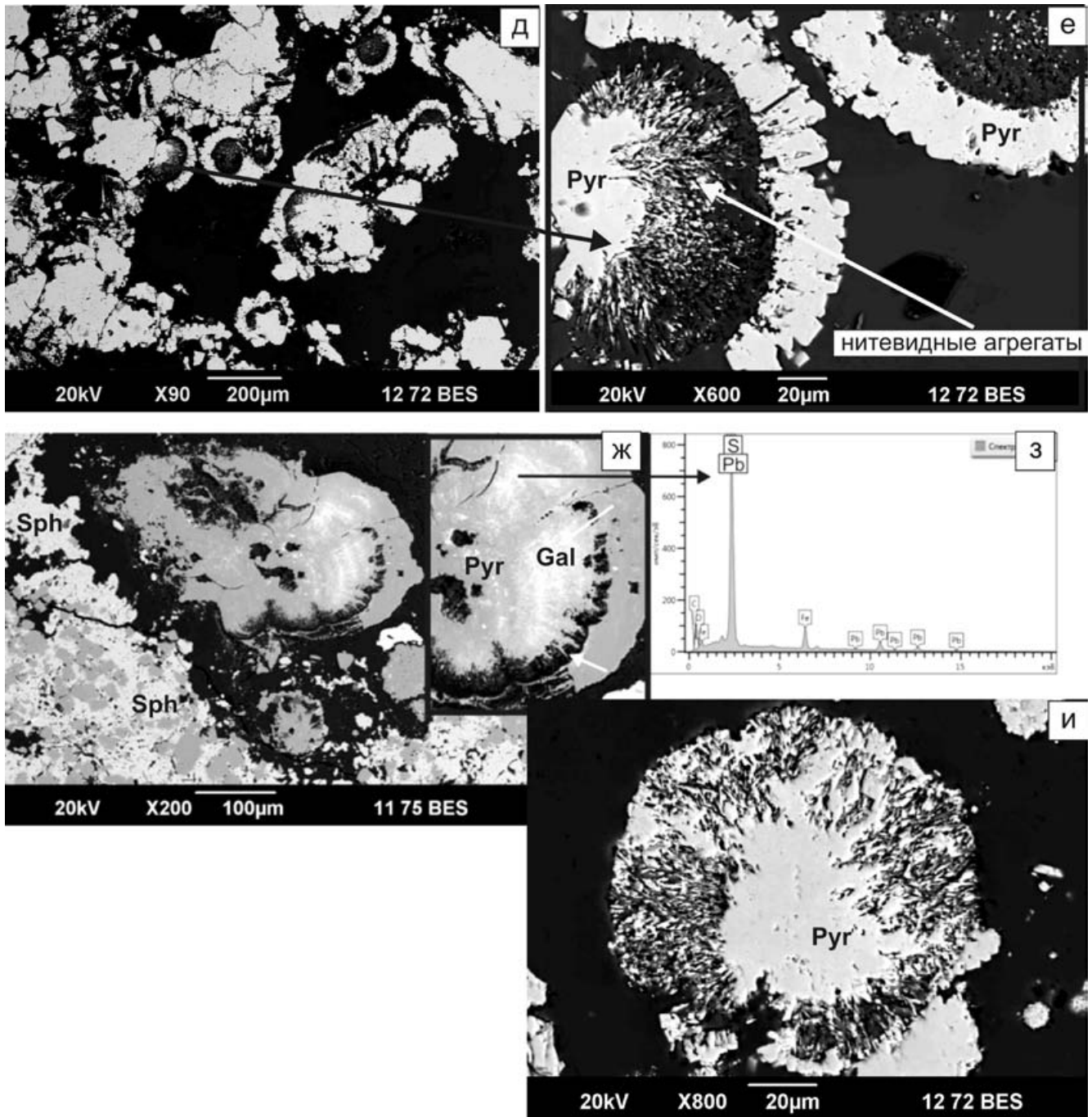
а – typical concretion concentric zonation; б – concentric zonation is saved during metamorphism; в – micronodule a central part of which is consisted by framboidal pyrites, str – stromatolite-like structures in the marginal part; г – enlarged fragment of the micronodule, Gal – galenite; Fram. Pyr – framboidal pyrites.

### Микроконкреции

В шлифе из обр. Саф 7/18 также отмечается присутствие микроконкреций (рис. 4а) с типичной концентрической зональностью, сохраняющейся даже при метаморфизме (рис. 4б). Центральная часть некоторых микроконкреций сложена фрамбоидальными пиритами (рис. 4в), на увеличенной врезке

(рис. 4г) видно их характерное строение. На поверхности конкреции (см. рис. 4в) наблюдаются отдельные строматолитоподобные обрастания. В работе (Масленников и др., 2016, с. 67, рис. 1.3.3 а) отмечаются подобные образования как “донные гидротермальные корки колломорфного пирита”.

Для других колчеданных микроконкреций характерна повторяемость строения (рис. 4д): центральные



**Рис. 4-2.** (продолжение рис. 4-1). Микроконкреции с нитевидными структурами из колчеданной породы.

д – микроконкреции пирита с повторяющимся строением; е – увеличенный фрагмент микроконкреции с отчетливо видимыми нитевидными структурами в центральной части; ж – микроконкреция, нитчатые структуры которой подчеркиваются галенитом (*Gal* – галенит, *Sph* – сфалерит, *Pyr* – пирит); з – ЭДС спектр галенита; и – шаровидный агрегат, полностью сложенный пиритом с нитевидными структурами.

**Fig. 4-2.** (continuation of Fig. 4-1). Microconcretions with filamentous structures from the pyrite ores.

д – pyrite microconcretions with repeated structures; е – enlarged fragment of microconcretion with clearly visible filamentous aggregates in the central part; ж – microconcretion with galenite filamentous structures (*Gal* – galenite, *Sph* – sphalerite, *Pyr* – pyrite); з – EMP spectra of galenite; и – spherical aggregate, completely folded pyrite with filamentous structures.



части сложены нитевидными структурами, нити отчетливо видны при увеличении  $\times 600$  и выше (рис. 4е), а для краевой части характерны массивные микрокристаллы пирита. Встречаются микроконкреции (рис. 4ж), нитевидная структура которых подчеркивается включениями галенита (рис. 4з), или шаровидные обособления, полностью сложенные нитевидными структурами (рис. 4и).

### **Фрамбоидальные пириты из углеродисто-кремнистой породы**

Фрамбоидальные пириты весьма широко распространены в исследуемых образцах колчеданных пород, а также в углеродисто-кремнистых отложениях, входящих в состав рудовмещающей толщи. Так, в изучаемом образце углеродисто-кремнистые породы согласно с микроскопически встречаются фоссилии фораминифер хорошей сохранности, к которым приурочены фрамбоидальные пириты, часто заполняя внутреннюю полость раковин (рис. 5а, б). Это свидетельствует о том, что полости еще не были заполнены осадком, но условия благоприятствовали формированию фрамбоидов. Наблюдаемые фрамбоиды различаются по размеру микрокристаллов (рис. 5в, г), по плотности их расположения (см. рис. 5в), по специфическому, сливному, облику (рис. 5д).

### **Фрамбоидальные пириты с минерализованными SiO<sub>2</sub> чехлами**

На некоторых фрамбоидальных пиритах наблюдаются сохранившиеся минерализованные чехлы (рис. 6а–в) бактериальных колоний. На СЭМ фото они выглядят как полупрозрачная пленка (см. рис. 6б). Примечательно, что чехлы на фрамбоидах как из углеродисто-кремнистой породы, так и из колчеданной породы (см. рис. 6а, в), по ЭДС-спектрам имеют одинаковый состав, соответствующий диоксиду кремния.

## **ОБСУЖДЕНИЕ**

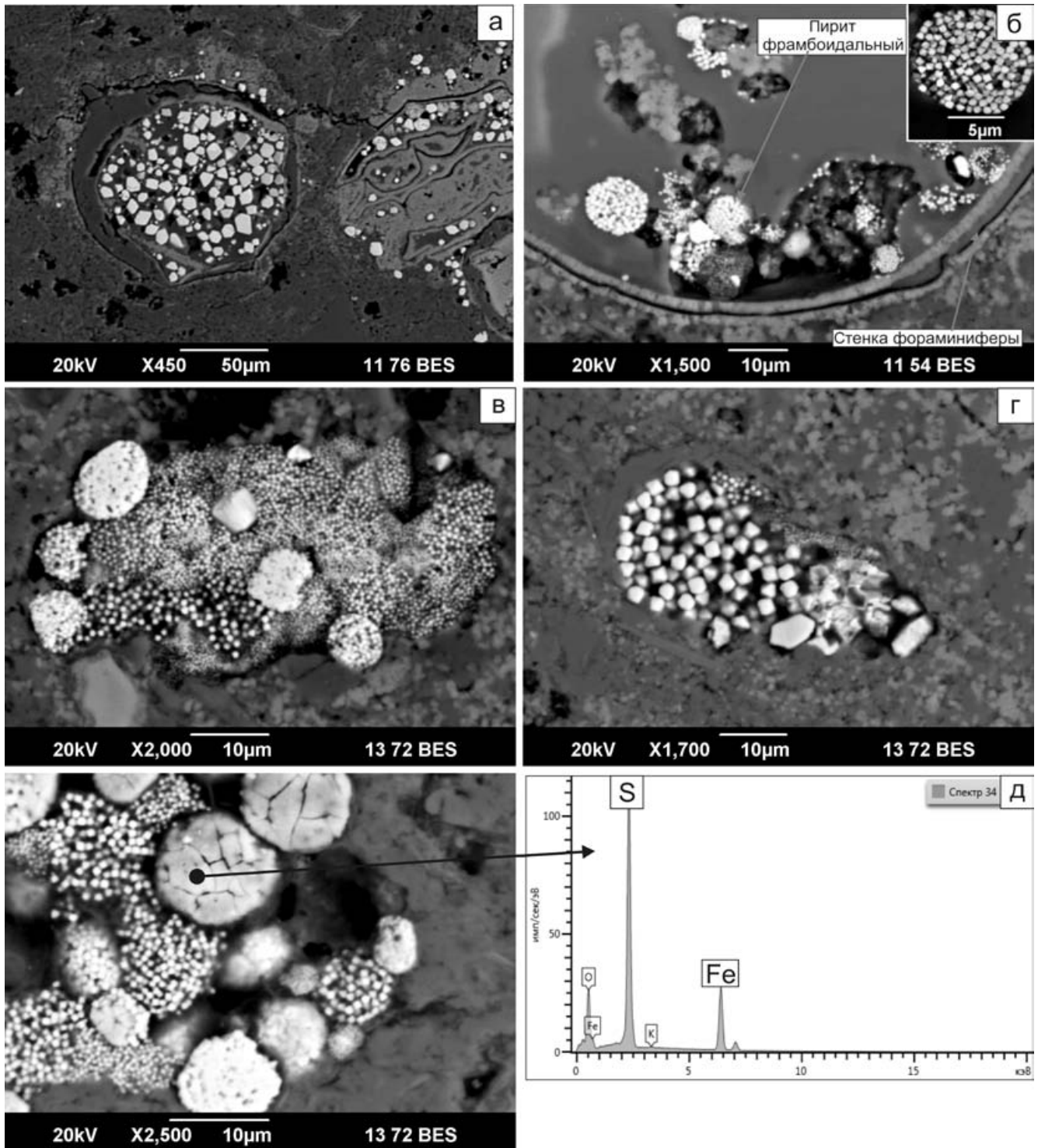
При изучении отложений, которые предположительно относятся к придонно-гидротермальной фации, необходимо найти достоверные признаки биогенной активности (включая микробиальную), для чего требуются не только петрографические, но и литологические и палеонтологические методы изучения, в том числе, большое количество изготавливаемых шлифов.

Среди явных признаков пригидротермально-осадочной фации, кроме находок фоссилий бентосной макрофауны *in situ*, могут быть конкреционные и строматолитоподобные образования, сформированные в результате жизнедеятельности микробиальных сообществ, в состав которых входят

ли элементотлагающие прокариоты. Так, в местах их обитания в результате микробиальной катализации (в частности, изменение pH среды) выпадают минералообразующие соединения, которые цементируют осадок и формируют морфологически обособленные образования (Заварзин, 1993), способные сохраняться в породе. Для формирования сульфидных обособлений необходима активность сообществ прокариотных организмов, извлекающих энергию при окислении серы из сероводорода, тиосульфата, самородной серы и других неорганических соединений (Ленгелер и др., 2005; Соколова, Каравайко, 1964). Находки локальных скоплений сульфидных конкреций в осадочных отложениях могут также служить своеобразным маркером зон разгрузки флюидов, содержащих соединения серы (Николаева, Королев, 2010).

В изучаемых пригидротермально-осадочных колчеданных и углеродисто-кремнистых отложениях мы рассматриваем микроконкреции и строматолитоподобные образования (корки коллоидного пирита) как результат жизнедеятельности ископаемых микробиальных сообществ. Так, для некоторых микроконкреций характерна повторяемость строения и размеров обособлений (см. рис. 4д). Присутствие нитчатых агрегатов, как в центре конкреций (см. рис. 4д–ж), так и в самостоятельных образованиях (см. рис. 4и) может свидетельствовать о наличии в ископаемом микробиальном сообществе образующих нити организмов: нитчатых бактерий (железобактерий? актиномицет?). Также конкреции могут слагаться фрамбоидальными пиритами (см. рис. 4в). В некоторых скоплениях фрамбоидальных пиритов наблюдается цепочечное расположение микрокристаллов, что также указывает на цепочечные или нитчатые формы ископаемой пиритотлагающей микробиоты. Разные размеры и плотность расположения микрокристаллов, а также их специфичный сливной облик (см. рис. 5а–д) можно объяснить количеством выделяемых колонией метаболитов и плотностью населения в микробиальных колониях.

Хотя о происхождении фрамбоидальных пиритов ведутся дискуссии, ряд авторов является сторонниками их микробиально-биохемогенного происхождения (Антошкина и др., 2017; Астафьева и др., 2005; Масленников и др., 2016; Butler et al., 2000). О микробиальной активности в гидротермально-биогенных отложениях Сафьяновского месторождения свидетельствует ассоциация фрамбоидального пирита с фаунистическими остатками: трубками червей-полихет (см. рис. 3е) из колчеданной породы и раковинами фораминифер (см. рис. 6а, б) из углеродисто-кремнистой породы (Сорока и др., 2017). Аналогичные находки известны, например, в фоссилиях радиолярий Камчатки (Савельева и др., 2013).

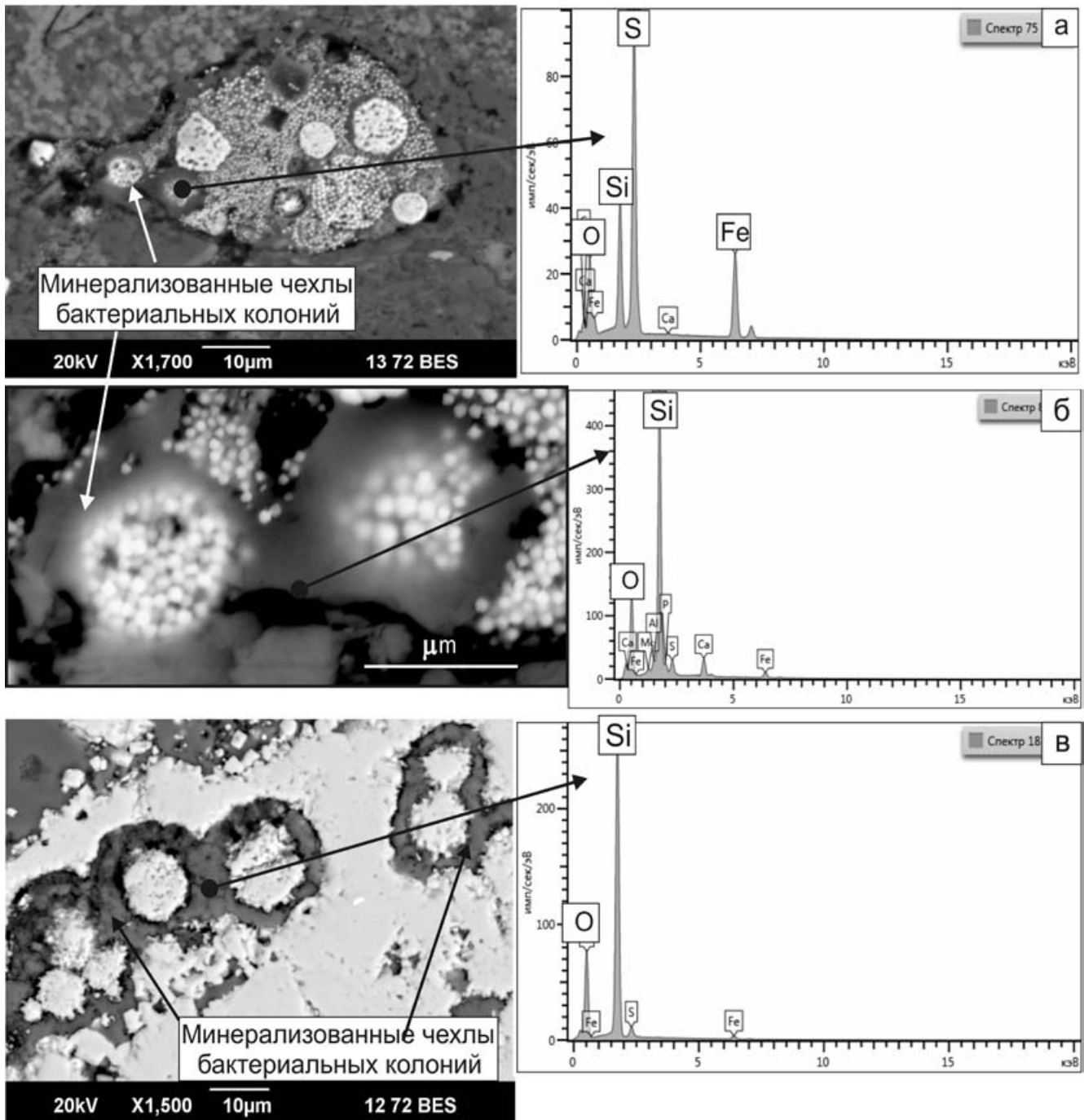


**Рис. 5.** Фрамбоидальные пириты из углеродисто-кремнистой породы.

а, б – различные по размерам фрамбоидальные пириты в фоссилиях фораминифер; в – различные по размерам и плотности расположения микрокристаллов фрамбоды; г – микрокристаллы фрамбоидального пирита одинаковой размерности в полости микрофоссилии (?); д – СЭМ-фото и ЭДС-спектр шарообразных агрегатов пирита специфичного облика среди фрамбоидальных пиритов.

**Fig. 5.** Framboidal pyrites from carbonaceous-siliceous rock.

а, б, – framboidal pyrites of various sizes in fossils of foraminifera; в – framboids of various sizes and densities of microcrystals arrangement; г – microcrystals of framboidal pyrite of the same dimension in the cavity of microfossils (?); д – BSE photo and EMF spectra of spherical aggregates of pyrite of a specific appearance among framboidal pyrites.



**Рис. 6.** СЭМ-фото и ЭДС-спектры фрамбоидальных пиритов с чехлами, сохранившимися благодаря минерализации  $\text{SiO}_2$ .

а, б – из углеродисто-кремнистой породы, б – увеличенный фрагмент, в – из колчеданной породы.

**Fig. 6.** BSE photo and EMF spectra of framboidal pyrites with covers preserved due to mineralization by  $\text{SiO}_2$ .

а, б – in carbon-siliceous rocks, б – enlarged fragment; в – in pyrite rock.

Кроме того, на некоторых фрамбоидах сохранились минерализованные  $\text{SiO}_2$  чехлы (см. рис. 5а–в), интерпретируемые как первоначально слизистые пленки внеклеточных биополимеров, покрывав-

шие ископаемые бактериальные колонии. Так, при наступлении неблагоприятных внешних условий многие микробиальные организмы (бактерии, цианобактерии, актиномицеты и др.) выделяют защит-

ную слизь – внеклеточные вещества (Мудрецова-Висс и др., 2014), способные к минерализации в том числе диоксидом кремния (Torporski et al., 2002; Орлеанский 2007).

Еще одним признаком активности микробиоты во время формирования пригидротермально-осадочных отложений может служить наличие остатков неизмененного или слабометаморфизованного ископаемого органического вещества (ИОВ), захороненного в исследуемых породах. Для этого анализа используется метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) (Муравьев, 2007). Учитывая, что сера, содержащаяся в придонном слое осадка около черных курильщиков, является мощнейшим окислителем органических веществ, для сульфидных и сульфатных пород метод непригоден. Однако анализу ЭПР с положительным результатом подлежат такие породы, как кремнистые, кремнисто-карбонатные, карбонатные, фосфатные или включающие первичноглинистую компоненту.

При наличии в минеральных матрицах остатков ИОВ на спектрах ЭПР в области радикалов будут наблюдаться сигналы углеродных радикалов Rс-org. Типичные для белков животного происхождения (включая бактерии), они имеют следующие характеристики: ширина линий  $\Delta H \approx 0.5 - 4$  Гс и g-фактор  $\approx 2.0026 - 2.0028$ . Если ИОВ метаморфизованы относительно слабо, эта линия наблюдается только после предварительного нагрева образцов до 600°C в лабораторных условиях. Сигналы ЭПР углеродных радикалов Rс-org, характерные для ископаемых растительных остатков (лигнин, целлюлоза), характеризуется следующими величинами:  $g \approx 2.0030 - 2.0038$  и  $\Delta H \approx 4 - 7$  Гс. Причем, в зависимости от степени углефикации, эта линия обнаруживается либо в исходных (углефицированные в природе), либо в предварительно нагретых при 350°C образцах (Муравьев, 2007).

Анализ спектров ЭПР углеродисто-кремнистых пород Сафьяновского месторождения показал наличие двух типов сигнала углерода Rс-org, характерных для растительных белков (включая водорослевые) и типичных для белков животного ряда (включая бактерии). Также установлено, что ИОВ изменено в условиях нагревания не выше 300°C (Сорока и др., 2019). ИОВ углеродисто-кремнистых пород Сафьяновского месторождения генетически однотипное, преимущественно сапропелевое, и его накопление связано с морскими условиями (Ярославцева и др., 2012, Сорока др., 2019).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее важные признаки микробиальных образований в придонно-гидротермальных отложениях Сафьяновского колчеданного месторождения:

- наличие минерализованных чехлов или биопленок, приуроченных к фрамбоидам;
- приуроченность фрамбоидальных пиритов к остаткам микробиоты;
- повторяемость специфичного строения и размеров микроконкреций, не свойственная хемогенным образованиям;
- участие фрамбоидальных и нитчатых пиритов в формировании микроконкреций и в виде самостоятельных агрегатов, указывающее на присутствие различных прокариот в ископаемом сообществе;
- наличие цепочечного или слоистого расположения микрокристаллов, свидетельствующего о первичном структурировании микробиоты;
- присутствие слабоизмененных остатков ископаемых органических веществ в углеродисто-кремнистой породе, установленных методом ЭПР.

В перспективе следует обратить внимание на другие месторождения Урала в целях изучения и выявления признаков первичных осадочно-гидротермальных образований. В целом, следует отметить, что в настоящее время становится актуальным “флюидное” направление исследований в литологии (Беленицкая, 2011).

## Благодарности

Авторы благодарны главному геологу ОАО “Сафьяновская медь” Н.В. Лещеву за помощь в организации полевых исследований, а также Н.П. Сафиной за предоставленные образцы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амон Э.О., Коровко А.В. (1992) Новые данные по стратиграфии и литологии палеозон Урала и Средней Азии. Екатеринбург: УрО РАН, 69-77.
- Антошкина А.И., Рябинкина Н.Н., Валяева О.В. (2017) Генезис сидеритовых конкреций из терригенной толщи нижнего карбона на Приполярном Урале. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 130-144
- Анфимов А.Л., Сорока Е.И., Лещев Н.В. (2015) Новые данные о фораминиферах в рудовмещающей толще Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал). *Бюлл. МОИП. Отд. геол.*, **90**(3), 23-26.
- Астафьева М. М., Розанов А. Ю., Хувер Р. (2005) Фрамбоиды: их структура и происхождение. *Палеонтол. журн.*, (5), 1-7.
- Беленицкая Г.А. (2011) “Флюидное” направление литологии: состояние, объекты, задачи. *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*, **153**(4), 98-113.
- Демина Л.Л., Галкин С.В. (2010) *Alvinella pompejana* – супертермофил и чемпион по металлам. *Природа*, (8), 14-21
- Заварзин Г. А. (1993) Развитие микробных сообществ в истории земли. *Проблемы доантропогенной эволюции биосферы*. М.: Наука, 212-222.
- Зайков В.В., Шадлун Т.Н., Масленников В.В., Бортников Н.С. (1995) Сульфидная залежь Яман-Касы (Южный Урал) – руины древнего “черного курильщика”

- на дне Уральского палеоокеана. *Геология рудн. месторождений*, **37**(6), 511-529.
- Коровко А.В., Двоглазов Д.А. (1991) О позиции Сафьяновского рудного поля в структурах Режевской структурно-формационной зоны (Средний Урал). *Геодинамика и металлогения Урала*. Свердловск: УрО АН СССР, 151-152.
- Коровко А.В., Постоялко М.В., Степанова Т.И., Петрова Л.Г., Шурыгин М.В., Иванов К.С., Амон Э.О. (1999) Проблемы стратиграфии и палеонтологии Урала. Екатеринбург: Комитет природы по Свердловской обл., 141-144.
- Кузнецов А.П., Масленников В.В., Зайков В.В. (1993) Пригидротермальная фауна силурийского палеоокеана южного Урала. *Изв. РАН. Сер. биол.* (4), 525-534.
- Леин А.Ю., Москалев Л.И., Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. (2000) Гидротермальные системы океана и жизнь. *Природа*, (5), 47-55.
- Ленгелер Й., Древис Г., Шлегель Г. (2005) Современная микробиология. Прокариоты: в 2-х т. М.: Мир, 49 с.
- Масленников В.В. Литогеоз и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Целуйко А.С. (2016) Гидротермальные биоморфозы колчеданных месторождений: микротекстуры, микроэлементы и критерии обнаружения. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 387 с.
- Масленников В.В., Зайков В.В. (2006) Метод рудно-фациального анализа в геологии колчеданных месторождений. Учеб. пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 223 с.
- Мудрецова-Висс К.А., Дедюхина В.П., Масленникова Е.В. (2014) Основы микробиологии: учебник. Владивостокский университет экономики и сервиса. М.: ИНФРА-М, 354 с.
- Муравьев Ф.А. (2007) Литолого-минералогическая характеристика пермских маркирующих карбонатных горизонтов Республики Татарстан. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Казань. 24 с.
- Николаева В.М., Королев Э.А. (2010) Аутигенная пиритовая минерализация в юрских отложениях Среднерусского моря как признак придонных просачиваний глубинных флюидов. *Металлогения древних и современных океанов – 2010. Рудоносность рифтовых и островодужных структур*. Миасс: ИМин УрО РАН, 279-282.
- Орлеанский В.К., Карпов Г.А., Жегалло Е.А., Герасименко Л.М. (2007) Биогенно-кремнистые постройки термальных полей и их лабораторное моделирование. *Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров, биоминералогия*. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 127-128
- Притчин М.Е., Сорока Е.И., Пучков В.Н. (2021) Новые U-Pb изотопные данные для циркона из риолита Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал). *Литосфера*, **21**(6), 884-893
- Пучков В.Н., Иванов К.С., Коровко А.В. (1990) О возрасте вулканогенных формаций и времени заложения островной дуги на востоке Среднего Урала. *Докл. АН СССР*, **315**(5), 1203-1205.
- Савельева О.Л., Савельев Д.П., Чубаров В.М. (2013) Фрамбониды пирита в углеродистых породах смагинской ассоциации п-ова Камчатский Мыс. *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*, **22**(2), 144-151.
- Сафина Н.П., Масленников В.В. (2009) Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское (Урал). Миасс: УрО РАН, 260 с.
- Сафина Н.П., Сорока Е.И., Анкушева Н.Н., Киселева Д.В., Блинова И.А., Садыков С.А. (2021) Флюорит в рудах Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения, Средний Урал: ассоциации, состав, генезис. *Геология рудн. месторождений*, **63**(2), 132-153.
- Смирнов В.Н. (2012) Основные этапы магматизма восточного склона Среднего Урала. *Литосфера*, (5), 4-15.
- Соколова Г.А., Каравайко Г.И. (1964) Физиология и геохимическая деятельность тионовых бактерий. Институт микробиологии АН СССР. М.: Наука, 336 с.
- Сорока Е.И., Галеев А.А., Петрова В.И., Носова Ф.Ф., Лютоев В.П., Леонова Л.В., Закиров Т.Р. (2019) Органическое вещество в породах Сафьяновского медно-колчеданного месторождения (Средний Урал). *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*, **161**(2), 307-324.
- Сорока Е.И., Леонова Л.В., Анфимов А.Л. (2017) Апатит в стенках раковин девонских фораминифер в породах Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал). *Вестн. Уральского отделения Российского минералогического общества*, (14), 131-138.
- Чувашов Б.И., Анфимов А.Л., Сорока Е.И., Ярославцева Н.С. (2011) Новые данные о возрасте рудовмещающей толщи Сафьяновского месторождения (Средний Урал) на основе фораминифер. *Докл. АН*, **439** (5), 648-650.
- Шереметьев Ю.С. (1990) Сафьяновское медноколчеданное месторождение на Среднем Урале. Отчет Артемовской партии по детальной разведке северной части Сафьяновского месторождения за 1985–1990 гг. Геол. фонды, пос. Артемовский.
- Шпанская А.Ю., Масленников В.В., Литтл К. (1999) Трубки вестиментифер из раннесилурийских и среднедевонских палеогидротермальных биот Уральского палеоокеана. *Палеонтол. журн.*, (3), 21-30.
- Ярославцева Н.С., Масленников В.В., Сафина Н.П., Лещев Н.В., Сорока Е.И. (2012) Углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского медно-цинкового месторождения (Средний Урал). *Литосфера*, (2), 106-124.
- Antoshkina A.I., Leonova L.V., Simakova Yu.S. (2020) The Development of Miocene Biohermal Bryozoan Limestones of Kazantip Cape (Crimea). ISSN 1028-334X, *Dokl. Earth Sci.*, **491**(2), 195-198.
- Butler I. B., Rickard D. (2000) Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulfide. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **64**(15), 2665-2672.
- Koroteev V.A., Yaseva R.G., Bochkarev V.V., Moloshag V.P., Korovko A.V., Sheremet'ev Yu.S. (1997) Geological setting and composition of the sulfide-ore Saf'yanovka deposit in the Middle Urals. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 49 p.
- Toporski J.K.W., Steele A., Westall F., Kathie L., Thomas-Keptra, 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.

REFERENCES

- Amon E.O., Korovko A.V. (1992) The stratigraphy and lithology new data of the Urals and Middle Asia paleozones. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 69-77. (In Russ.)
- Anfimov A.L., Soroka E.I., Leshchev N.V. (2015) New data on foraminifera of Saf'yanovka copper pyrite deposit ore-bearing strata. *Bull. MOIP. Otd. Geol.*, **90**(3), 23-26. (In Russ.)
- Antoshkina A.I., Ryabinkina N.N., Valyaeva O.V. (2017) Genesis of siderite nodules from the lower carboniferous terrigenous sequence in the Subpolar Urals. *Lithol. Polezn. Iskop.*, **52**(2), 111-124. (In Russ.)
- Antoshkina A.I., Leonova L.V., Simakova Yu.S. (2020) The Development of Miocene Biothermal Bryozoan Limestones of Kazantip Cape (Crimea). ISSN 1028-334X, *Dokl. Earth Sci.*, **491**(2), 195-198.
- Astaf'eva M.M., Rosanov A.Yu. (2005) Framboids: structure and origin. *Paleontol. Zh.* (5), 1-7. (In Russ.)
- Belenitskaya G.A. (2011) "Fluid" trend in lithology: condition, objects, problems. *Uchenye Zapiski Kazan. Univ. Ser. Estestvennye Nauki*, **153**(4), 98-113. (In Russ.)
- Butler I. B., Rickard D. Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulfide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(15), 2665-2672.
- Chuvashov B.I., Anfimov A.L., Soroka E.I., Yaroslavtseva N.S. (2011) New data about age of Saf'yanovka deposit strata on the base of foraminifera. *Dokl. Akad. Nauk*, **439**(5), 648-650. (In Russ.)
- Demina L.L., Galkin S.V. (2010) Alvinella pompejana – superthermophile and champion of metals. *Priroda*, (8), 14-21 (In Russ.)
- Koroteev V.A., Yaseva R.G., Bochkarev V.V., Moloshag V.P., Korovko A.V., Sheremet'ev Yu.S. (1997) Geological setting and composition of the sulfide-ore Saf'yanovka deposit in the Middle Urals. Ekaterinburg: IGG UB RAS, 49 p. (In Russ.)
- Korovko A.V., Dvoeglazov D.A. (1991) About Saf'yanovka ore field in the Rezh struktural-formation zone (Middle Urals). *Geodynamics and Metallogeny of the Urals*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 151-152. (In Russ.)
- Korovko A.V., Postoyalko M.V., Stepanova T.I., Petrova L.G., Shurygin M.V., Ivanov K.S., Amon E.O. (1999) The problems of stratigraphy and paleontology of the Urals. Ekaterinburg, Komprirody po Sverdlovskoi oblasti Publ., 141-144. (In Russ.)
- Kusnetsov A.P., Maslennikov V.V., Zaikov V.V. (1993) Prehydrothermal fauna of the Silurian paleocean of the Southern Ural. *Izv. RAN. Ser. Biol.*, (4), 525-534. (In Russ.)
- Lein A.Yu., Moskalev L.I., Bogdanov Yu.A., Sagalovich A.M. (2000) Hydrothermal systems of ocean and life. *Priroda*, (5), 47-55. (In Russ.)
- Lengeler I., Dreves G., Shlegele G. (2005) Modern microbiology. Prociots: in 2 v. M.: Mir Publ., 49 p. (In Russ.)
- Maslennikov V.V. (2006) Lithogenesis and massive sulfide deposits forming processes. Miass, IMin UB RAS, 384 p. (In Russ.)
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Tseluiko A.S. (2016) Hydrothermal biomorphoses of sulphide copper deposits: microtextures, trace elements and detection criteria. Ekaterinburg: RIO UB RAS, 387 p. (In Russ.)
- Maslennikov V.V., Zaikov V.V. (2006) Method of ore facies analysis in geology of copper sulfide deposits Text book. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 223 p. (In Russ.)
- Mudretsova-Viss K.A., Dedyukhina V.P., Maslennikova E.V. (2014) Fundamentals of microbiology: textbook. Moscow, INFRA-M Publ., 354 p. (In Russ.)
- Murav'ev F.A. (2007) Lithological and mineralogical characteristics of the Permian marking carbonate horizons of the Tatarstan Republic. Dr. geol. and min. sci. diss. Kazan, 24 p. (In Russ.)
- Nikolaeva V.M., Korolev E.A. (2010) Autogenic pyrite mineralization of the Jurassic series of the Srednerusskoe Sea as a sign of near bottom seeps of abyssal fluid. *Metallurgy of the ancient and modern oceans – 2010. Ores of rifting and island arc structures*. Miass, IMin UB RAS, 279-282. (In Russ.)
- Orleanskii V.K., Karpov G.A., Zhegallo E.A., Gerasimenko L.M. (2007) Biogenic-siliceous structures of thermal fields and their laboratory modeling. *Mineralogy and life: the origin of the biosphere and coevolution of the mineral and biological worlds, biomineralogy*. Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 127-128. (In Russ.)
- Pritchkin M.E., Soroka E.I., Puchkov V.N. (2021) News U-Pb isotopic zircon data on the rhyolite of the Saf'yanovskoe Cu-Zn deposit (Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, **21**(6), 884-893 (In Russ.)
- Puchkov V.N., Ivanov K.S., Korovko A.V. (1990) About age of volcanogenic formations and time of location of island arc on the east of Middle Urals. *Dokl. AN SSSR*, **315**(5), 1203-1205. (In Russ.)
- Safina N.P., Maslennikov V.V. (2009) Rudoclasts of the copper sulfide deposits of Yaman-Kasy and Saf'yanovskoe (Urals). Miass, UB RAS, 260 p. (In Russ.)
- Safina N.P., Soroka E.I., Ankusheva N.N., Kiseleva D.V., Blinova I.A., Sadykov S.A. (2021) Fluorite in the ores of the Saf'yanovskoe Cu-Zn deposit, Middle Ural: associations, composition, genesis. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **63**(2), 132-153. (In Russ.)
- Savel'eva O.L., Savel'ev D.P., Chubarov V.M. (2013) Framboids of pyrite of the carbonbearing rocks of the Smaginskaya association of the Kamchatskii Mys. *Vestn. KRAUNT. Nauki o Zemle*, **22**(2), 144-151. (In Russ.)
- Sheremet'ev Yu.S. (1990). Saf'yanovskoe copper sulfide deposit at the Middle Urals. Report of the Artemovskaya geological party of a detail research of the Northern part of the Safyanovskoe deposit with reserves estimation on 01.07.1990 years and 1985–1990 years. Artemovskii. (In Russ., unpublished)
- Shpanskaya A.Yu., Maslennikov V.V., Littl K. (1999) Tubes of Vestimentifera of the Earlier Silurian and Middle Devonian ages of the paleohydrothermal biots of the Ural paleocean. *Paleontol. Zhurn.*, (3), 21-30.
- Smirnov V.N. (2012) Base stages of magmatism of eastern slope of the Middle Urals. *Lithosphere (Russia)*, (5), 4-15. (In Russ.)
- Sokolova G.A., Karavaiiko G.I. (1964) Physiology and geochemical activity of thion bacteria. Institut of Microbiology AN SSSR. Moscow, Nauka Publ, 336 p. (In Russ.)
- Soroka E.I., Galeev A.A., Petrova V.I., Nosova F.F., Lyutov V.P., Leonova L.V., Sakirov T.R. (2019) Organic matter in the Saf'yanovka copper massive sulfide deposit (Middle Urals). *Uchenye Zapiski Kazan. Univ. Ser. Estestvennye Nauki*, **161**(2), 307-324. (In Russ.)
- Soroka E.I., Leonova L.V., Anfimov A.L. (2017) Apatite in a sink wall of the Devonian foraminifera of the rocks

- of the Saf'yanovskoe copper sulphide ore deposit (Middle Ural). *Vestn. Ural'skogo otd. Ross. mineralog. obshchestva*, (14), 131-138. (In Russ.)
- Toporski J.K.W., Steele A., Westall F., Kathie L., Thomas-Keptra, 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.
- Yaroslavtseva N.S., Maslennikov V.V., Safina N.P., Leshchev N.V., Soroka E.I. (2012) Carbonbearing alevropelites of the Saf'yanovskoe Cu-Zn ore deposit (Middle Ural). *Lithosphere (Russia)*, (2), 106-124. (In Russ.)
- Zaikov V.V., Shadlun T.N., Maslennikov V.V., Bortnikov N.S. (1995) Sulphide deposit of the Yaman-Kasy (Southern Ural) – ruins of an ancient black smoker at the bottom of the Ural paleocean. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, 37(6), 511-529. (In Russ.)
- Zavarzin G.A. (1993) Evolution of microbial communities in the Earth history. *The problems of preanthropogenic evolution of the biosphere*. Moscow, Nauka Publ., 212-222. (In Russ.)