

## Сферулы с “титановыми” оболочками в обломках карбонатного состава среди метагравелитов черносланцевой толщи Неoproтерозоя хребта Акшийряк (Срединный Тянь-Шань)

А. Г. Шевкунов<sup>1</sup>, Т. Дж. Теодоре<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кумтор Голд Компани, 720031, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Ибраимова, 24, e-mail: anatoly\_shevkunov@mail.ru

<sup>2</sup>Spectrum Petrographics Inc., 11406 NE Rosewood av., Ste B, Vancouver, WA 98662

Поступила в редакцию 21.04.2025 г., принята к печати 02.06.2025 г.

**Объект исследования.** Разнообразные карбонатные сферические образования, имеющие оболочки иного состава и образующие скопления, в составе известняковых обломков в метагравелитах флишоидного черносланцевого разреза венда всячего бока рудоносной структуры месторождения Кумтор. **Цель.** Оценка всего разнообразия популяции карбонатных сферул, имеющих подобные оболочки, с точки зрения установления возможных вариантов природы их образования и вещественного состава оболочек сферул. **Материалы и методы.** Исследовалась серия разрезов флишоидной черносланцевой толщи венда всячего бока рудоносной структуры месторождения Кумтор с горизонтами специфических метагравелитов, содержащих карбонатные обломки со скоплениями сферул. Образцы метагравелитов из керна скважин изучены оптическими методами с диагностикой минеральных образований в шлифах, аншлифах и полированных шлифах. Для работы с одним из образцов задействован растровый электронный микроскоп (SEM). Проанализированы отдельные участки полированного тонкого сечения с получением энергодисперсионных рентгеновских спектров (EDS) и многоуровневых поэлементных EDS-карт. **Результаты.** Метагравелиты наблюдаются в виде маркирующего горизонта в составе толщи терригенных ритмитов – флишоидного переслаивания углеродистых филлитов, псаммитовых филлитов и полимиктовых песчаников с карбонатным цементом в разрезе пород всячего бока рудовмещающей структуры золоторудного месторождения Кумтор. В составе большинства карбонатных обломков метагравелитов обнаружены разнообразные сферические образования с индивидуальными размерами, внешними оболочками и, нередко, внутренним строением. Они образуют скопления разной плотности, распространение которых не выходит за пределы карбонатных обломков в метагравелитах. В составе изученных внешних оболочек сферул установлено наличие титана в виде минеральной формы рутила. **Выводы.** Наблюдаемые сферулы относятся к син- и диагенетическим образованиям пелитоморфных карбонатных осадков, разрушенных и переотложенных позднее в виде обломков известняков гравийной размерности в терригенных осадках более позднего возраста, которые впоследствии были метаморфизованы. По внешнему виду и размерам такие скопления сферул первоначально отнесены к пелоидам в карбонатных породах. Однако наличие специфических внешних оболочек у всех сферул, разнообразие их форм и размеров, а также, в ряде случаев, внутреннего строения позволяют предполагать присутствие среди них объектов, имеющих биологическую природу. Формирование минеральных “титановых” оболочек вокруг сферул в пределах карбонатных обломков либо произошло в процессе регионального метаморфизма, либо связано с диагенезом карбонатных осадков, содержащих сферулы биогенного происхождения с повышенными содержаниями титана. Эти минеральные оболочки, вероятно, способствовали сохранению форм сферул в процессе последующих преобразований терригенных пород в условиях зеленосланцевого метаморфизма.

**Ключевые слова:** Срединный Тянь-Шань, месторождение Кумтор, черные сланцы, терригенные ритмиты, обломки карбонатных пород, сферулы с оболочками из оксида титана

## Spherules with “titanium” shells in debris of carbonate composition among metagraelites of the black shale sequence of the Neoproterozoic Akshiryak Ridge (Middle Tien Shan)

Anatoly G. Shevkunov<sup>1</sup>, Ted J. Theodore<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kumtor Gold Company, 24 Ibraimova st., Bishkek, Kyrgyzstan 720031, e-mail: anatoly\_shevkunov@mail.ru

<sup>2</sup>Spectrum Petrographics Inc., 11406 NE Rosewood av., Ste B, Vancouver, WA 98662

**Для цитирования:** Шевкунов А.Г., Теодоре Т.Дж. (2026) Сферулы с “титановыми” оболочками в обломках карбонатного состава среди метагравелитов черносланцевой толщи Неoproтерозоя хребта Акшийряк (Срединный Тянь-Шань). *Литосфера*, 26(1), 205–228. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-205-228>. EDN: JJOTES

**For citation:** Shevkunov A.G., Theodore T.J. (2026) Spherules with “titanium” shells in debris of carbonate composition among metagraelites of the black shale sequence of the Neoproterozoic Akshiryak Ridge (Middle Tien Shan). *Lithosphere (Russia)*, 26(1), 205–228. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-205-228>. EDN: JJOTES

Received 21.04.2025, accepted 02.06.2025

**Research subject.** Various carbonate spherical formations having shells of different compositions and forming clusters in the composition of limestone fragments in metagraywackes of the flyschoid black shale section of the Vendian hanging wall of the ore-bearing structure of the Kumtor deposit. **Aim.** To assess the entire diversity of the population of carbonate spherules with similar shells, from the point of view of establishing possible variants of the nature of their formation and the material composition of the spherule shells. **Materials and methods.** A series of sections of the Vendian flyschoid black shale sequence of the hanging wall of the ore-bearing structure of the Kumtor deposit with horizons of specific metagraywackes containing carbonate fragments with clusters of spherules was studied. Samples of metagraywackes from borehole cores were studied by optical methods, with diagnostics of mineral formations in thin sections, polished sections and polished sections. A scanning electron microscope (SEM) was used to work with one of the samples. Individual areas of the polished thin section were analyzed to obtain energy-dispersive X-ray spectra (EDS) and multi-level elemental EDS maps. **Results.** Metagraywackes are observed as a marker horizon in the composition of the terrigenous rhythmite sequence – flyschoid interbedding of carbonaceous phyllites, psammitic phyllites, and polyimictic sandstones with carbonate cement in the section of rocks of the hanging wall of the ore-bearing structure of the Kumtor gold deposit. In the composition of most carbonate fragments of metagraywackes, various spherical formations with individual sizes, external shells and, often, internal structure were found. They form clusters of different density, the distribution of which does not go beyond the carbonate fragments in metagraywackes. In the composition of the studied external shells of spherules, the presence of titanium in the mineral form of rutile has been established to date. **Conclusions.** The observed spherules belong to syn-, diagenetic formations of pelitomorphic carbonate sediments, destroyed and redeposited later as gravel-sized limestone fragments in terrigenous sediments of a later age, which were subsequently metamorphosed. Based on their appearance and size, such spherule clusters were initially classified as peloids in carbonate rocks. However, the presence of specific external shells in all spherules, the diversity of their shapes and sizes, and, in some cases, their internal structure suggest the presence of objects of biological nature among them. The formation of mineral “titanium” shells around spherules within carbonate fragments occurred either during regional metamorphism or is associated with diagenesis of carbonate sediments containing spherules of biogenic origin with elevated titanium contents. These mineral shells contributed to the preservation of spherule shapes during subsequent transformations of terrigenous rocks under greenschist metamorphism.

**Keywords:** Middle Tien Shan, Kumtor deposit, black shales, terrigenous rhythmites, carbonate rock fragments, spherules with titanium oxide shells

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе проведения тематических работ по изучению разреза рудовмещающей структуры месторождения Кумтор исследован керн глубоких поисковых и разведочных скважин, пробуренных на Центральном карьере и флангах месторождения, на предмет поиска органических остатков, позволяющих провести датирование разных частей разреза джетымской серии. Весь объем джетымской серии, состоящей из джетымтауской, джакболотской и байконурской свит, официально отнесен к венду на основании региональных стратиграфических корреляций (Стратифицированные ..., 2015). Органических остатков в породах, слагающих эту серию, не обнаружено, за исключением отдельных находок микрофоссилий и микрофитолитов. В пределах Срединного Тянь-Шаня породы этой серии с размывом залегают на раннепротерозойских гранитоидах либо верхнерифейских метаркозах и метавулканитах. Между тем они повсеместно подстилают фаунистически охарактеризованные горизонты углисто-кремнистых сланцев кембрия-ордовика.

Среди пород разреза джетымской серии, слагающей основную часть структуры месторождения и сложенной преимущественно филлитами, нами сделан ряд находок проблематичных образований, некоторые из которых возможно отнести к органическим остаткам. Они обнаружены в основном при микроскопическом изучении шлифов и аншлифов, внимательном осмотре керна скважин интервалов терригенных ритмитов, слагающих висячий бок чешуйчато-надвиговой структуры месторождения. В разных частях разреза обнаружены остатки известковых водорослей, разнообразный органический детрит, сечения конусовидных трубчатых фоссилий, псевдоморфозы пирита по микрофоссилиям, спикулам губок и остаткам мелких раковин моллюсков. Точная диагностика и определение принадлежности выявленных образований к какому-либо таксону, за исключением некоторой части остатков известковых водорослей, в настоящее время не проведены.

Интересной находкой стало установление в разрезе терригенных ритмитов прослоев метагравелитов с обломками карбонатных пород, содержащих сферулы с “титановыми” оболочками.

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Вмещающие золотое оруденение породы месторождения Кумтор представляет собой толщу серых филлитов хлорит-(±полевошпат)-кварц-серицитового состава с пачками углеродистых пород, карбонатно-филлитовых ритмитов и конгломерато-сланцев (диамиктитов). Они отнесены к джетымской серии Срединного Тянь-Шаня, возраст которой официально считается вендским на основании региональных стратиграфических корреляций (Стратифицированные..., 2015). В структуре месторождения различается три латеральных типа разреза джетымской серии, совмещенных на Центральном участке месторождения в вертикальную тектоностратиграфическую последовательность по разновозрастным надвигам и сложенным: 1) пестроцветными гематитсодержащими филлитами и яшмами (подошва); 2) серыми филлитами, карбонат-филлитовыми ритмитами и пиритноносными углеродистыми филлитами (рудоносная структура); 3) флишоидной толщей с пачками углеродистых филлитов, псаммитовых филлитов и кристаллическими сланцами (висячий бок). Во всех типах разреза как своеобразный маркер джетымской серии присутствуют диамиктиты (конгломерато-сланцы, тиллоиды); углеродистые филлиты с сульфидами наблюдаются как во втором, так и в третьем типах разреза.

После глубокого поискового бурения на Центральном участке месторождения, в разрезе пород висячего бока рудоносной структуры, ранее выделенных в составе третьей и четвертой пачек джетымтауской свиты джетымской серии, установлен значительный интервал терригенных ритмитов (рис. 1) – флишоидного переслаивания филлитов и доломит-полимиктовых метапесчаников с пачками углеродистых пиритизированных филлитов, прослоями метагравелитов (крупнозернистых метапесчаников) и известняковых конгломерато-брекчий (Шевкунов и др., 2023).

Мощность собственно интервала терригенных ритмитов, по данным разных скважин, составляет от 130 до 280 м (см. рис. 1). Установить истинную мощность пока не представляется возможным из-за наблюдаемых на этих интервалах фрагментах складчатости. Маркирующим горизонтом для толщи терригенных ритмитов является наличие прослоев метагравелитов специфического облика, насыщенных разноокатанными обломками светлых известняков (рис. 2).

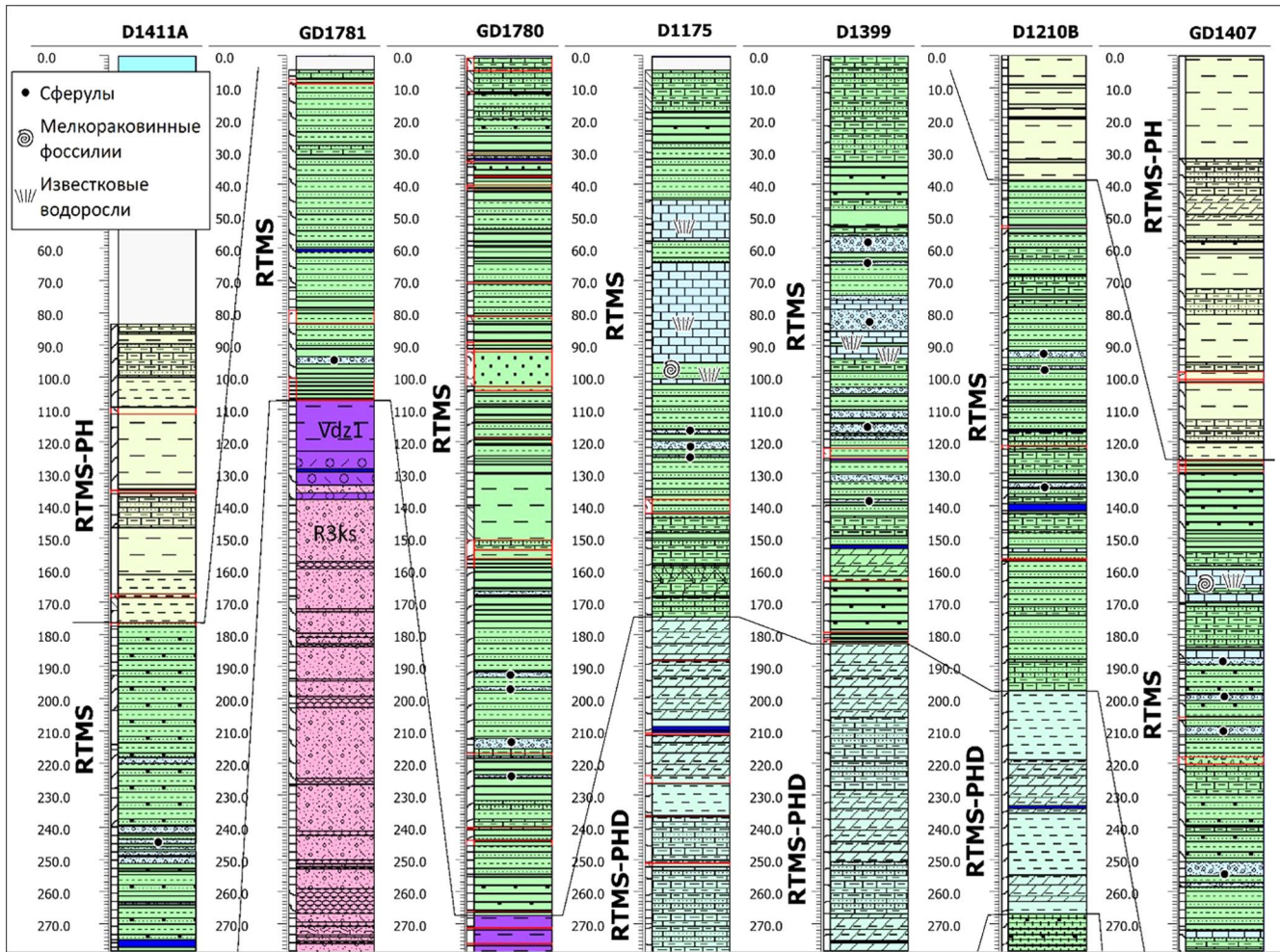
Они прослеживаются по простирацию через всю структуру висячего бока рудоносной зоны Центрального участка месторождения Кумтор (скв. D1175, D1210B, D1389, D1399, GD1407, D1411A). Подобный горизонт метагравелитов встречен и в керне скважины DPR1515, пробуренной на правом борту ледника Петрова, на удаленном северо-вос-

точном фланге структуры месторождения. Причем породы разреза терригенных ритмитов здесь практически не метаморфизованы, так же как и содержащиеся в метагравелитах известняковые обломки (рис. 3).

В прослоях метагравелитов часто наблюдается градационная слоистость – от крупнозернистых разностей до мелкозернистых песчаников. Метагравелиты лежат в основании мезоритмов, обычно заканчивающихся тонкозернистыми терригенно-известковыми породами или известняками. Мощность линз и прослоев метагравелитов от первых см до 1–2 м. По скважине D1411A, кроме метагравелитов с известняковыми обломками (239–244, 348–349 м), на интервалах 245–251 и 282–292 м наблюдаются подобные метагравелиты, но с преобладанием окатанных обломков метариолитов, гранитоидов, хлоритизированных метавулканитов, которые относятся к породам верхнего рифея. Прослой метагравелитов обычно же насыщены многочисленными разноокатанными обломками серых известняков (см. рис. 2). Разновеликие обломки во всех разновидностях метагравелитов погружены в хлорит-полевошпат-доломит-кварц-серицитовый матрикс.

От разрезов филлитов рудовмещающей джетымской серии терригенные ритмиты висячего бока Центрального участка месторождения отличаются прежде всего повышенной степенью регионального метаморфизма. Установленная минеральная ассоциация ( $Ap + Chl + Mu + Car + Alb + Q$ ) соответствует границе между хлорит-серицитовой и низкотемпературной частью биотитовой зоны зеленосланцевого метаморфизма (300–400–500°C). В этих разностях пород, представленных большей частью филлитами с лепидогранобластовой структурой, наблюдается местами, помимо укрупнения чешуйчатых силикатов, также микрокристаллическая структура у новообразований кварца, альбита, апатита, карбонатов. На этих интервалах породы выглядят более массивными, со слабо выраженным рассланцеванием, появляется линейность в расположении минеральных агрегатов. Углеродистое вещество графитизированное; местами наблюдается пирротин, который часто развивается по диагенетическому и метаморфогенному пириту.

Изученная толща терригенных ритмитов, по предварительным данным, относится к верхнему Неопротерозою на основе ее сопоставления с отложениями джетымтауской свиты хр. Джетымтоо, эдиакарский возраст которых установлен по присутствию в песчаниках зерен обломочных цирконов с датировкой 629 млн лет (Rojas-Agramonte et al., 2014), а также по наличию в составе терригенных ритмитов прослоев метагравелитов с окатанными обломками пород свиты Большого Нарына (скв. D1411A, 282–292 м), возраст которой датирован в 720–726 млн лет (Terbishaliev et al., 2021).



**Рис. 1.** Корреляция разрезов по скважинам висячего бока рудоносной структуры месторождения Кумтор (Центральный участок), местоположение метагравелитов со сферулами и находок остатков известковых водорослей в пределах разреза терригенных ритмитов (RTMS).

PHD – доломитистые филлиты; PH – серые полосчатые филлиты; Vdz<sub>1</sub> – филлиты джетымтауской свиты венда, залегающие с базальными диамиктитами на метавулканиках и метааркозах рифея (R<sub>3</sub>ks); красным цветом отмечены тектонические нарушения.

**Fig. 1.** Correlation of sections along the boreholes of the hanging wall of the ore-bearing structure of the Kumtor deposit (Central area), location of metagravellites with spherules and finds of remains of calcareous algae within the section of terrigenous rhythmites (RTMS).

PHD – dolomitic phyllites; PH – gray banded phyllites; Vdz<sub>1</sub> – phyllites of the Vendian Jetymtau suite, occurring with basal diamictites on Riphean metavolcanics and metaarkoses (R<sub>3</sub>ks); tectonic faults are marked in red.

Находки остатков известковых водорослей и микрораковинных окаменелостей в прослоях известняков среди толщи терригенных ритмитов (см. рис. 1) оставляют верхний предел возраста осадконакопления пока неопределенным. В известняках, по предварительным данным, определены остатки известковых водорослей следующих родов: *Palaeomicrocystis* Korde (1955), *Epiphyton celsum* Korde, *Botomaella zelenovi* Korde, *Globuloella* Korde (aff. *G. botomensis* Korde). Слоевница известковых водорослей разнообразны по строению и часто

находятся в ассоциации друг с другом. Такие разновидности водорослей встречаются в отложениях начиная с нижнего кембрия (Ископаемые известковые водоросли, 1987). Среди колонии водорослей рода *Globuloella botomensis* Korde встречен единственный остаток мелкой раковины моллюска? размером 0.5–0.6 мм. В конглобрекциях также определены остатки известковых водорослей родов *Actinophycus kordeae* Vologdin и *Arenarina colligata* Vologdin, *sp.nov.* Подобные описаны в отложениях начиная с нижнего ордовика (Вологдин, 1962).

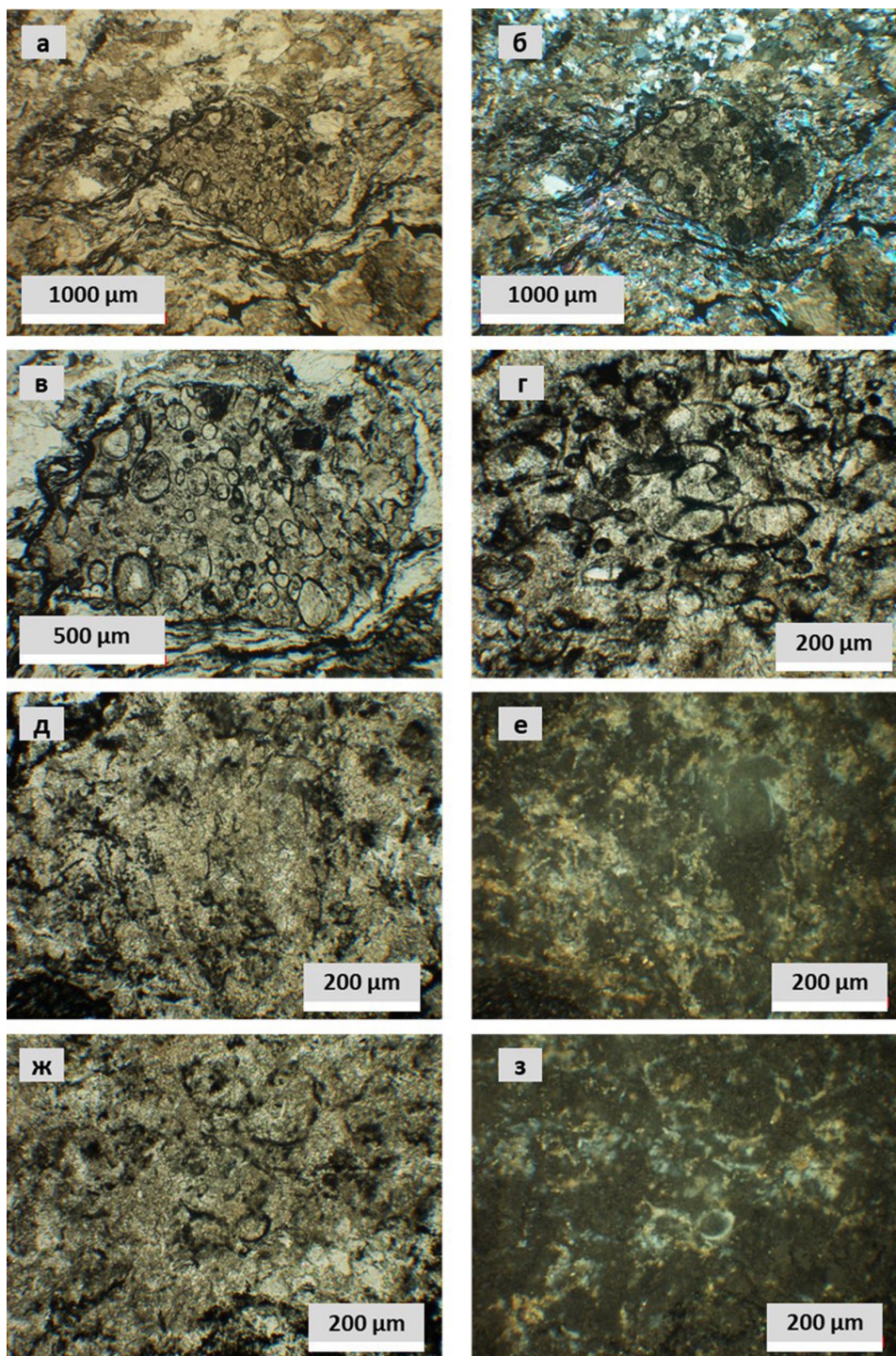


**Рис. 2.** Прослои метаморфизованных гравелитопесчаников, содержащих обломки известняков, в черных псаммитовых филлитах.

Фото керн скв. D1399A/109 м (а), D1411A/239.7–241.2 м (б) и D2023/11.5 м (в), диаметр керн  $\approx 6.35$  см; г, д – фото полированных образцов метагравелитов из скв. D1175 (Центральный участок); е – фото шлифа Мф24 (николи II) – обломки известняков насыщены многочисленными сферулами (“икрой”).

**Fig. 2.** Black psammitic phyllites contain layers of metamorphosed gravelite-sandstones containing limestone fragments.

Photos of cores from boreholes D1399A/109 m (a), D1411A/239.7–241.2 m (б) and D2023/11.5 m (в), core diameter  $\approx 6.35$  cm; г, д – photos of polished metagravellite samples from borehole D1175 (Central area); е – photo of thin section Mf24 (Nicoli II) – limestone fragments are saturated with numerous spherules (“caviar”).

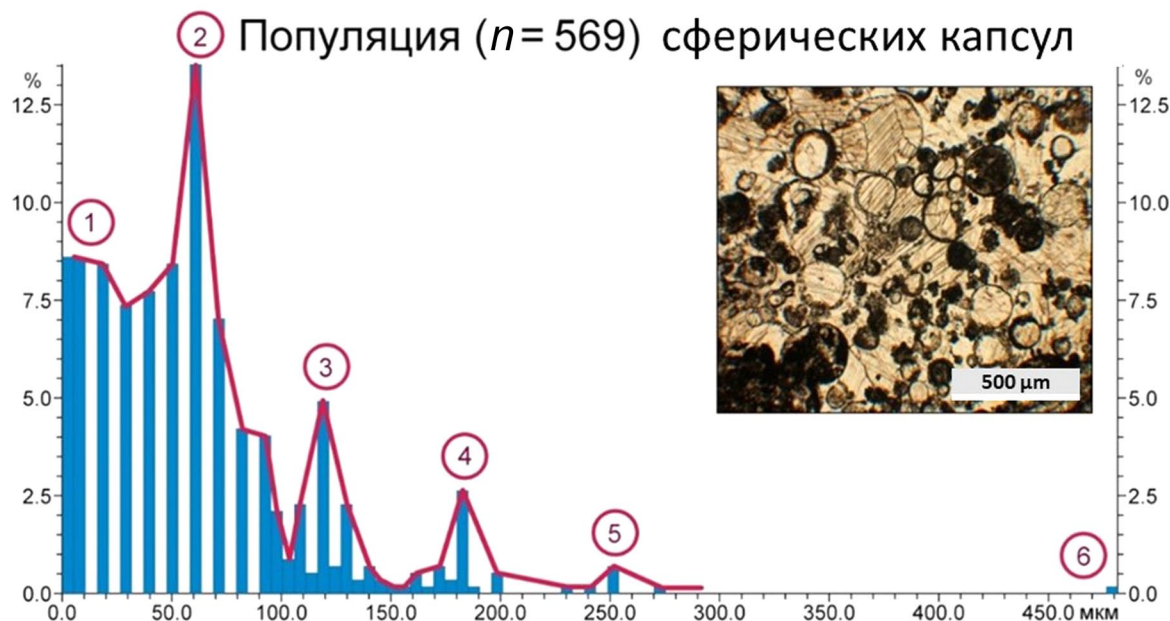


**Рис. 3.** Обломки известняков со сферулами и нитчатыми образованиями в метаморфизованных гравелито-песчаниках из разреза терригенных ритмитов на дальнем северо-восточном фланге месторождения (правый борт ледника Петрова).

Скважина DRP1515, 156 м: а, в, г – фото шлифа в проходящем свете (николи II); б – (николи X); 218.5 м; д, ж – фото шлифа в проходящем свете (николи II); е, з – фото шлифа в отраженном свете (николи X).

**Fig. 3.** Limestone fragments with spherules and filamentary formations in metamorphosed gravelite-sandstones from the section of terrigenous rhythmites on the far northeastern flank of the deposit (right side of the Petrov Glacier).

Borehole DRP1515, 156 m: а, в, г – thin section photos in transmitted light (nicols II), б – (nicols X); 218.5 m; д, ж – thin section photos in transmitted light (nicols II); е, з – thin section photos in reflected light (nicols X).



**Рис. 4.** Гистограмма частоты встречаемости оболочек округлой формы разного размера (1–6 – группы оболочек по размерам) в популяции сферических образований, наблюдаемых в шлифах в составе обломков известняков.

**Fig. 4.** Histogram of the frequency of occurrence of round-shaped shells of different sizes (1–6 – groups of shells by size) in the population of spherical formations observed in thin sections as part of limestone fragments.

Кроме остатков водорослей, в известняках встречается разнообразный органический детрит, поперечные и косопродольные сечения конусовидных трубчатых фоссилий с размером поперечного сечения 1.5 мм и продольного более 3 мм, похожих на сечения примитивных кораллов. В пачках углистых филлитов среди флишоидной толщи наблюдаются псевдоморфозы пирита по спикулам губок и остаткам мелких раковин моллюсков. Определение принадлежности органических остатков к какому-либо таксону в настоящее время не проведено.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении изучения образцов керна месторождения Кумтор использовались преимущественно традиционные оптические методы исследования с диагностикой минеральных образований в шлифах, полированных шлифах и аншлифах на микроскопе Nikon eclipse “LV 100 POL”, оснащенный цифровой камерой DS-Fi1. Таким образом изучено более 50 образцов, отобранных из терригенных ритмитов с прослоями метагравелитов, содержащих карбонатные обломки со сферическими образованиями.

Полированный тонкий срез одного образца D1175-117.5 (Мф24) исследован стандартными петрографическими методами в компании Spectrum

Petrographics (Ванкувер, Канада). Там же представленный образец исследован на SEM. Первоначальные поиски SEM проведены на нескольких участках. Микрофотографии представлены как снимки в обратнорассеянных электронах (BSE). Изучено 60 отдельных точек – участков полированного тонкого сечения с углеродным покрытием различного размера с получением энергодисперсионных рентгеновских спектров (EDS). Кроме того, подготовлены индивидуальные и многоуровневые поэлементные EDS-карты.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В пределах обломков известняков из упомянутых метагравелитов обнаружены скопления разнообразных микроскопических сферул. Они представлены образованиями сферической, овальной, яйцевидной, почковидной, грибовидной, грушевидной форм, большей частью имеющих темную оболочку (см. рис. 2, 3). Обычно они образуют подобие колоний (“разнозернистую икру”). Размеры наблюдаемых сферул округлой формы в изученной популяции колеблются в широких пределах – от 5–10 до 480 мкм (рис. 4), 70% всех округлых сферул имеют размер от 5 до 80 мкм, из них 30% – менее 30 мкм. В пределах карбонатных обломков размер сферул и набор их форм сходны, но

часто индивидуальны для каждого из изученных образцов. Размер сферул либо примерно одинаков, либо может варьироваться внутри одного обломка в широких пределах от первых до 80–100 мкм.

Скопления сферул срезаются по контуру обломков известняков и не прослеживаются во вмещающих их карбонатно-терригенных филлитах. Некоторые обломки известняков и содержащиеся в них сферулы сложены мелкозернистым, до пелитоморфного, известняком (см. рис. 3). Это наблюдается в слабометаморфизованных метагравелитах среди флишовой толщи на дальнем фланге месторождения (скв. DRP1515). В шлифах из таких образцов наблюдаются, кроме сферул, скопления микроскопических ветвистых нитчатых образований. Чаще же, в пределах Центрального участка месторождения, обломки карбонатов в метагравелитах среди филлитов представляют собой перекристаллизованный известняк местами с ясно выраженными трещинами спайности зерен кальцита. Трещины спайности либо прерываются в областях стыка со сферическими образованиями, либо пересекают их, либо образуют индивидуальную картину в границах разных сферул.

Вокруг обломков известняков со сферулами иногда наблюдаются дворники растяжения (перекристаллизации) – метаморфогенные тени давления, сложенные более крупнозернистой кварц-карбонатной массой по краям обломков. В процессе стрессового давления и перекристаллизации известняка какая-то часть оболочек разрушается либо вдавливаются друг в друга и деформируются. В некоторых образцах в составе обломков известняков наблюдаются новообразованные при метаморфизме пород удлиненные мелкие таблитчатые кристаллы полевого шпата (альбита?), которые корродируют обломки известняков и сферулы. Также на обломки известняков наложены местами выделения кристаллов метаморфогенного пирита и гнезда пирротина. Иногда наблюдается замещение сферул в обломках метаморфогенным кварцем, реже хлоритом или хлорит-кварц-мусковитовой массой.

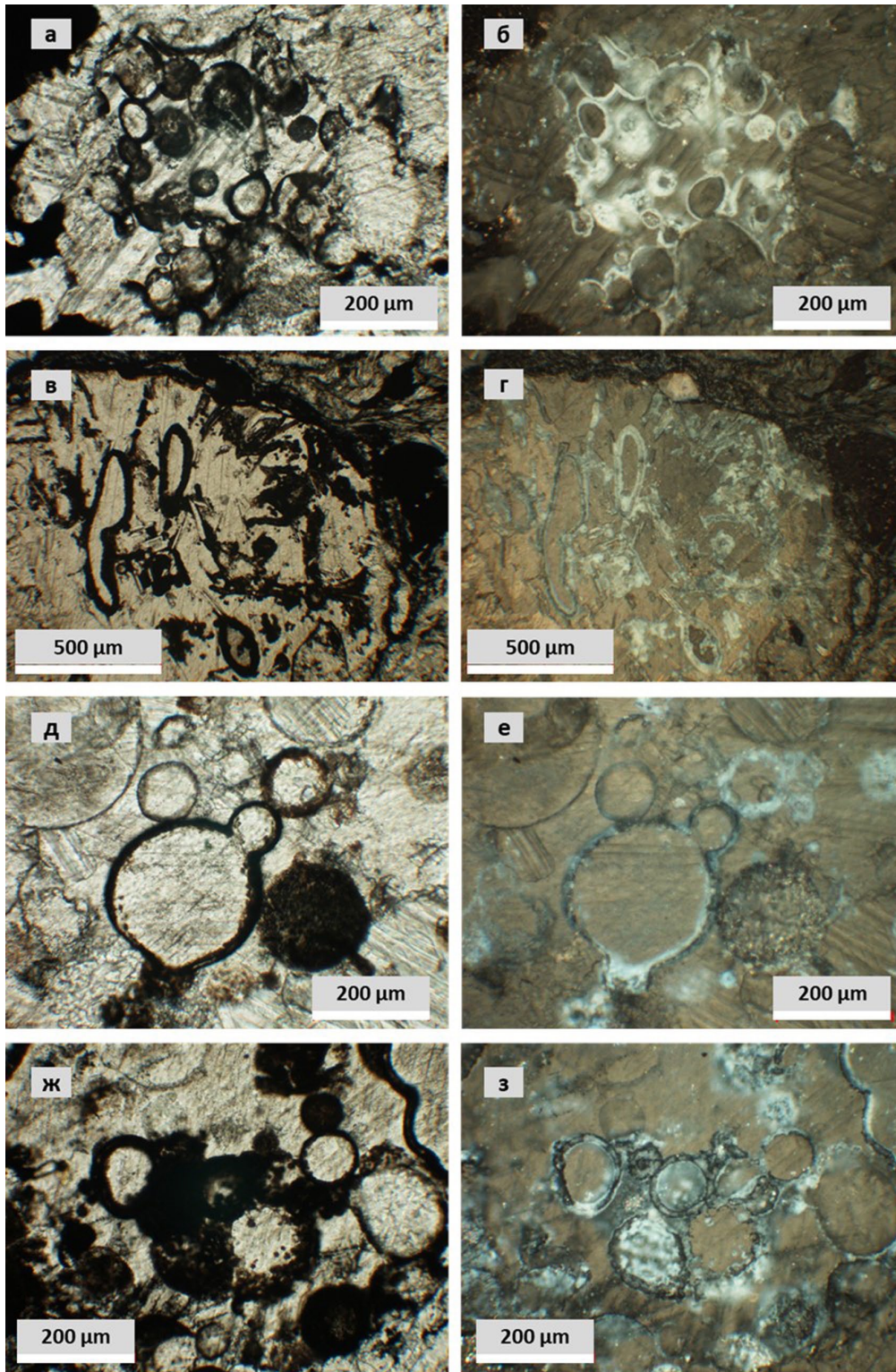
Цвет сферул с черными оболочками в проходящем свете преимущественно прозрачный, как и у вмещающих известняков; среди них встречаются сферулы сплошного черного цвета и, реже, мелкие сферулы коричневатого цвета с шагреневой поверхностью (рис. 5, 6). Сферулы черного цвета сложены тонкозернистым веществом, резко отличающимся по структуре в отраженном свете от вмещающих их карбонатов (см. рис. 6). В отраженном свете в шлифах (николи X) черные оболочки сферул имеют фарфоровидный (“телевидный”) облик и розовато-белую окраску (см. рис. 5), что характерно часто для лейкоксена.

В составе черных оболочек сферул при изучении аншлифов и полированных шлифов изна-

чально установлено оптическими методами наличие рутила (см. рис. ба, б, г, е). Рутил наблюдается в виде тончайших сплошных масс, обволакивающих сферы по внешнему контуру и повторяющих все изменения их форм. Тщательное изучение в дальнейшем ободков сферул при 500-кратном увеличении как в отраженном, так и в проходящем свете, а также под электронным микроскопом в одном из образцов (Мф24 – скв. D1175-117.5) в компании Spectrum Petrographics (Ванкувер, Канада) подтвердило заключения, сделанные ранее при оптических методах исследования, что повышенный уровень Ti на ободках является результатом главным образом скопления чрезвычайно мелких частиц рутила, присутствующих на их поверхности. Однако нельзя исключить наличие дополнительных минеральных фаз, содержащих Ti.

В изученных на SEM участках метагравелита наблюдаются обломки карбонатов со скоплениями сферул с явно выраженными оболочками черного цвета. Наиболее интересным при изучении спектров EDS на поэлементных картах оказалось присутствие и распределение Ti. Легко различимы два текстурных режима Ti (рис. 7): 1) Ti отражает рутил, сконцентрированный на самых внешних узких ободках сферул, шириной  $\approx 10$  мкм; 2) Ti также присутствует в виде редких рваных несколько более крупных выделений рутила вне сферул. Последняя разновидность тесно связана текстурно с микроучастками развития хлорита. Распределение Ti на ободках сферул повторяет, безусловно, их форму. Некоторый Ti на ободках также совпадает довольно хорошо с Al, Si, Fe и, в меньшей степени, с Mg, хотя ни один из последних четырех элементов на картах EDS не определяет овальные формы сферул так, как Ti. Совокупность распределения этих элементов (Al, Si, Fe, Mg) интерпретируется в виде минеральной формы хлорита (см. рис. 7). Некоторое количество Fe наблюдается вдоль плоских микротрещин, и, по-видимому, представлено оксидом Fe (гетит?).

В матрике филлитов и диамиктитов джетымской серии, породы которой слагают большую часть рудоносной зоны месторождения Кумтор и ее всякого бока, а также в метааркозах залегающей выше по разрезу толщи верхнего рифея наблюдаются практически везде скопления обломочных зерен рутила, лейкоксена и анатаза (размером до 0.01 мм) в аксессуарных количествах (см. рис. 7ж). В рассеянных обломочных зернах рутила часто присутствуют тригональные сетки, образующиеся обычно в результате замещения ильменита и титаномагнетита, что подтверждается присутствием в центре некоторых рутиловых сеток реликтовых магнетита и ильменита. По некоторым зернам рутила в филлитах, особенно их углеродистых разновидностях, местами развивается диагенетический и метаморфогенный пирит. Во флишовой

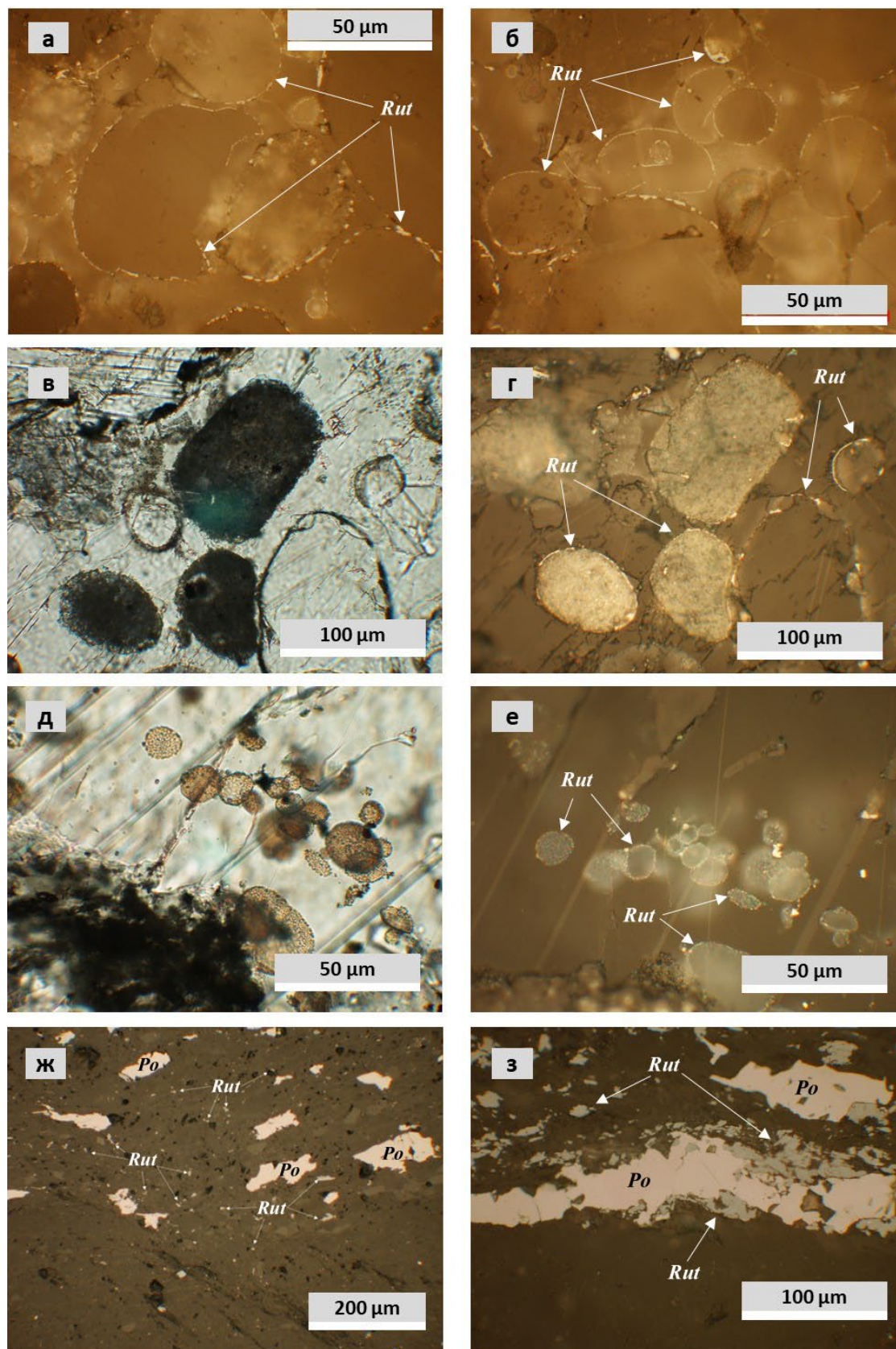


**Рис. 5.** Микрофотографии разных видов сферылы из обломков известняков (шлифы, николи II) с явно выраженными черными оболочками.

а, в, д, ж – шлифы в проходящем свете (николи II); б, г, е, з – шлифы в отраженном свете (николи X).

**Fig. 5.** Micrographs of different types of spherules from limestone fragments (thin sections, Nicol II) with clearly defined black shells.

а, в, д, ж – thin sections in transmitted light (Nicol II); б, г, е, з – thin sections in reflected light (Nicol X).



**Рис. 6.** Скопления сферических образований с оболочками из рутила (*Rut*), наблюдаемые в обломках мраморизованных известняков в составе образцов метатравелитов (а–е), а также рассеянная вкрапленность

аксессуарных обломочных зерен рутила (ж) и агрегаты перекристаллизованного рутила (з) в ассоциации с метаморфогенным пирротинном (Po) в филлитах флишоидной толщи из керна скв. D1175.

а, б – 117.5 м (аншлиф, николи II); в, г – 122 м (полированный шлиф слева – в проходящем свете, справа – в отраженном свете, николи II); д, е – 118.1 м (полированный шлиф слева – в проходящем свете, справа – в отраженном свете, николи II); ж – 88.7 м; з – 114 м (аншлифы, николи II).

**Fig. 6.** Clusters of spherical formations with rutile (*Rut*) shells observed in fragments of marbleized limestones in meta gravelite samples (a–e), as well as scattered dissemination of accessory detrital rutile grains (ж) and aggregates of recrystallized rutile (з) in association with metamorphic pyrrhotite (*Po*) in phyllites of the flyschoid sequence from the core of borehole D1175.

а, б – 117.5 m (polished section, Nicoli II); в, г – 122 m (polished section on the left – in transmitted light, on the right – in reflected light, Nicoli II); д, е – 118.1 m (polished section on the left – in transmitted light, on the right – in reflected light, Nicoli II); ж – 88.7 m; з – 114 m (clear sections, nicoli II).

ной толще всячего бока рудоносной структуры, на участках разреза с повышенной степенью метаморфизма и пирротинизацией, наблюдается перетолжение и рекристаллизацией рутила в виде новообразований кристаллических агрегатов в ассоциации с выделениями пирротина и метаморфогенного пирита (см. рис. 7з). Источником титана, вероятнее всего, являются первичные скопления в филлитах обломочных зерен рутила и лейкоксена.

Ни в одном из множества изученных образцов разных литотипов пород джетымской серии района месторождения Кумтор не обнаружено таких выделений рутила, как в случае со сферулами в обломках карбонатных пород в метагравелитах флишоидной толщи. Не встречено также и таких скоплений сферул в карбонатных разностях пород джетымской серии венда. Хорошо наблюдается эрозионный характер контакта карбонатных обломков и вмещающего их матрикса – по линии контакта сферулы, а также их разрушенные черные оболочки. Таким образом, можно констатировать, что карбонатные обломки со сферулами в метагравелитах флишоидной толщи являются скоплениями кластических обломков более древних пород карбонатного состава, попавших в бассейн седиментации при образовании песчаников и гравелитов флишоидной толщи.

Впоследствии флишоидная толща была метаморфизована в разной степени, в том числе и обломки карбонатных пород со сферулами. В разных частях разреза флишоидной толщи степень метаморфизма неоднородная, так же как и степень изменения карбонатных обломков. Наблюдается местами коррозия карбонатных обломков и содержащихся в них сферул с “титановыми” оболочками новообразованными метаморфогенными минералами – хлоритом, альбитом, мусковитом, кварцем, пиритом, пирротинном, перекристаллизация карбоната внутри обломков и образование дворигов растяжения-перекристаллизации по краям карбонатных обломков. При этом “титановые” оболочки сферул не имеют продолжения или каких-либо каналов связи с основной вмещающей минеральной массой филлитов.

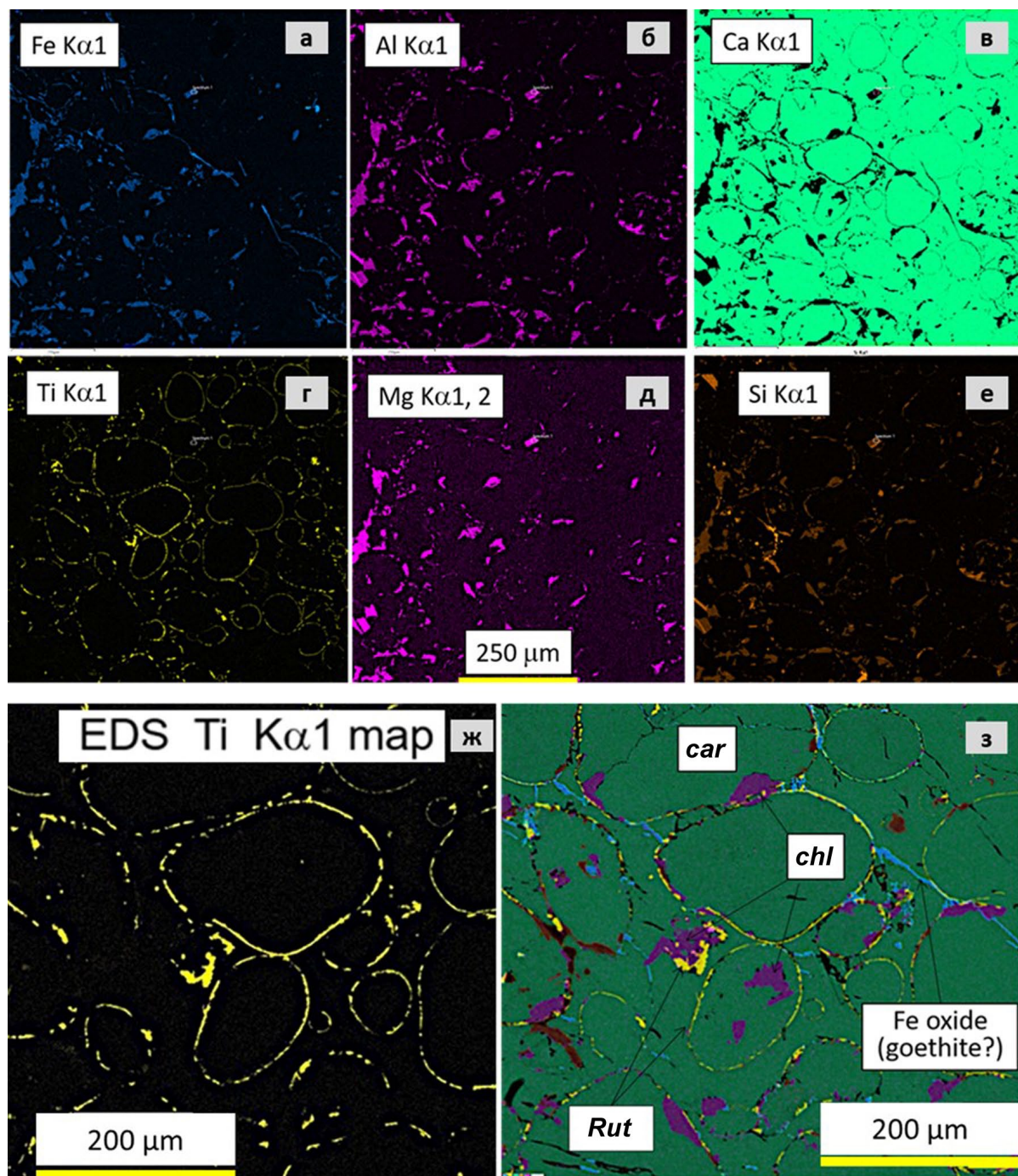
Ниже приведены фототаблицы (рис. 8–12), показывающие все разнообразие наблюдаемых сферул в обломках карбонатных пород метагравелитов флишоидной толщи из разреза всячего бока рудоносной структуры месторождения Кумтор. Большинство из них имеет черные оболочки, сложенные, согласно проведенным исследованиям, оксидами Ti. Минеральный состав оболочек, вероятнее всего, имеет более сложный состав, и, кроме рутила, там присутствует ряд других соединений, в настоящее время не изученных; вероятно присутствие углефицированного органического вещества и устойчивых углеводородных соединений. То же самое касается и минерального состава самих сферул, которые различаются в некоторых случаях цветом и микроструктурными особенностями.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований актуальными для обсуждения являются как минимум два вопроса: 1) что представляют собой обломки карбонатных пород в метагравелитах и микроскопические сферулы с оболочками в этих карбонатных обломках, какова природа их образования; 2) с чем связано происхождение “титановых” оболочек вокруг микросферических карбонатных образований?

В карбонатных породах описывается множество микроструктурных элементов в виде скоплений округлых образований, сложенных теми же карбонатами. Это комки, сгустки, пелоиды, оолиты, онколиты (микрофитолиты), микропроблематики (катаграфии), органостенные микрофоссилии (сфероморфиды) и др.

Самым общим для таких образований является термин “пелоиды”, под которым обычно понимаются зерна песчаной размерности (в среднем 100–500 мкм), сложенные микро- и криптокристаллическим кальцитом, округлые или вытянутые, правильной или неправильной формы, без определенного внутреннего строения (Tucker, Wright, 2002). Отмечается также, что пелоиды являются

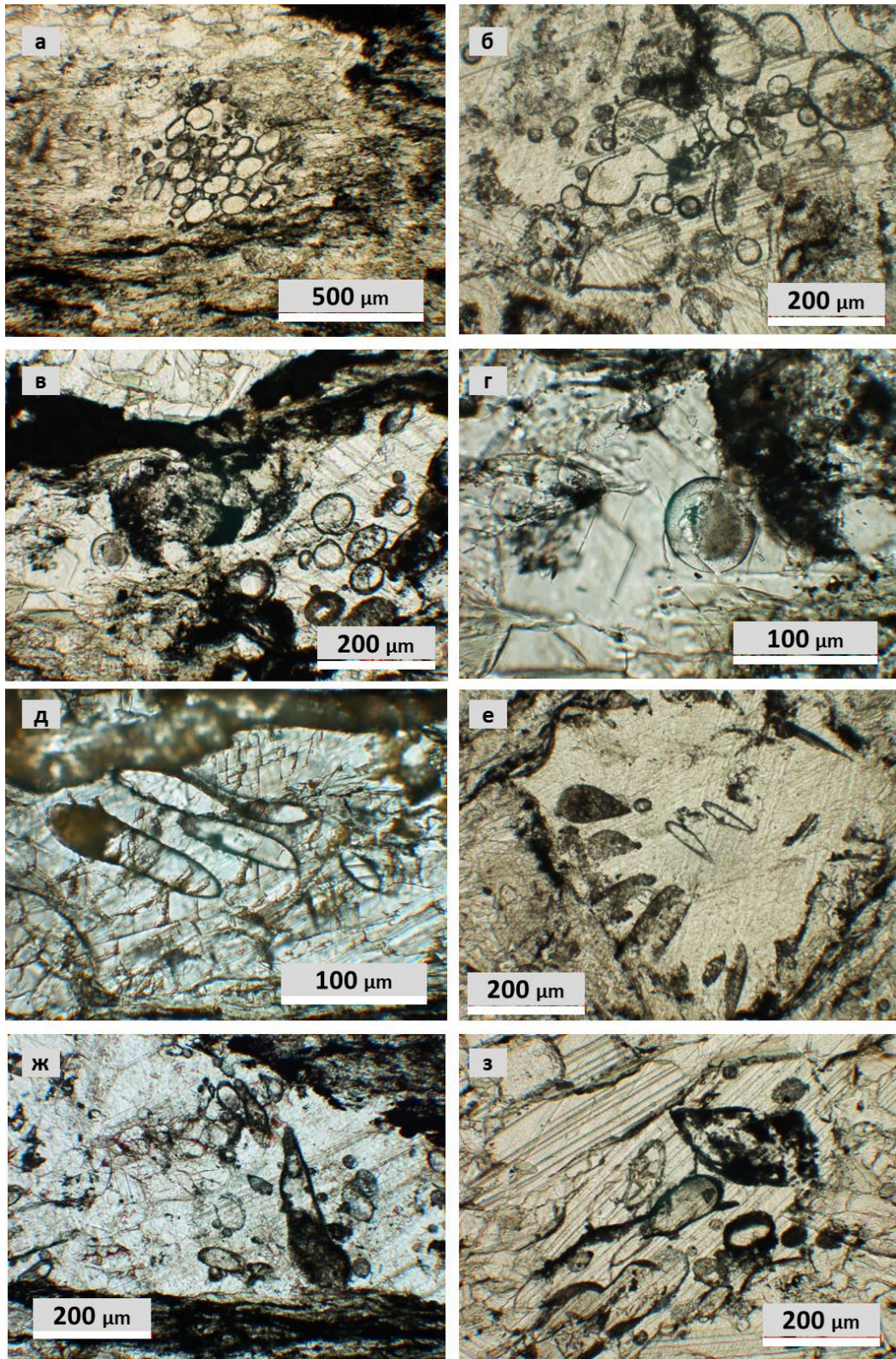


**Рис. 7.** Образец D1175-117.5. Поэлементные карты EDS участка изученной области в пределах обломка карбонатов со скоплением сферул.

а – железо, б – алюминий, в – кальций, г – титан, д – магний, е – кремний; ж – элементная карта распределения титана (EDS Ti map) в увеличенном фрагменте изученного участка; з – совмещенные поэлементные карты EDS с диагностикой минеральных фаз: *car* – кальцит (зеленый), *chl* – хлорит (фиолетовый), *Rut* – рутил (желтый), Fe oxide – гетит? (голубой), *Q* – кварц (коричневый).

**Fig. 7.** Sample D1175-117.5. EDS elemental maps of the studied area within a carbonate fragment with a cluster of spherules.

а – iron, б – aluminum, в – calcium, г – titanium, д – magnesium, е – silicon; ж – elemental map of titanium distribution (EDS Ti map) in an enlarged fragment of the studied area; з – combined EDS elemental maps with diagnostics of mineral phases: *car* – calcite (green), *chl* – chlorite (purple), *Rut* – rutile (yellow), Fe oxide – goethite? (blue), *Q* – quartz (brown).

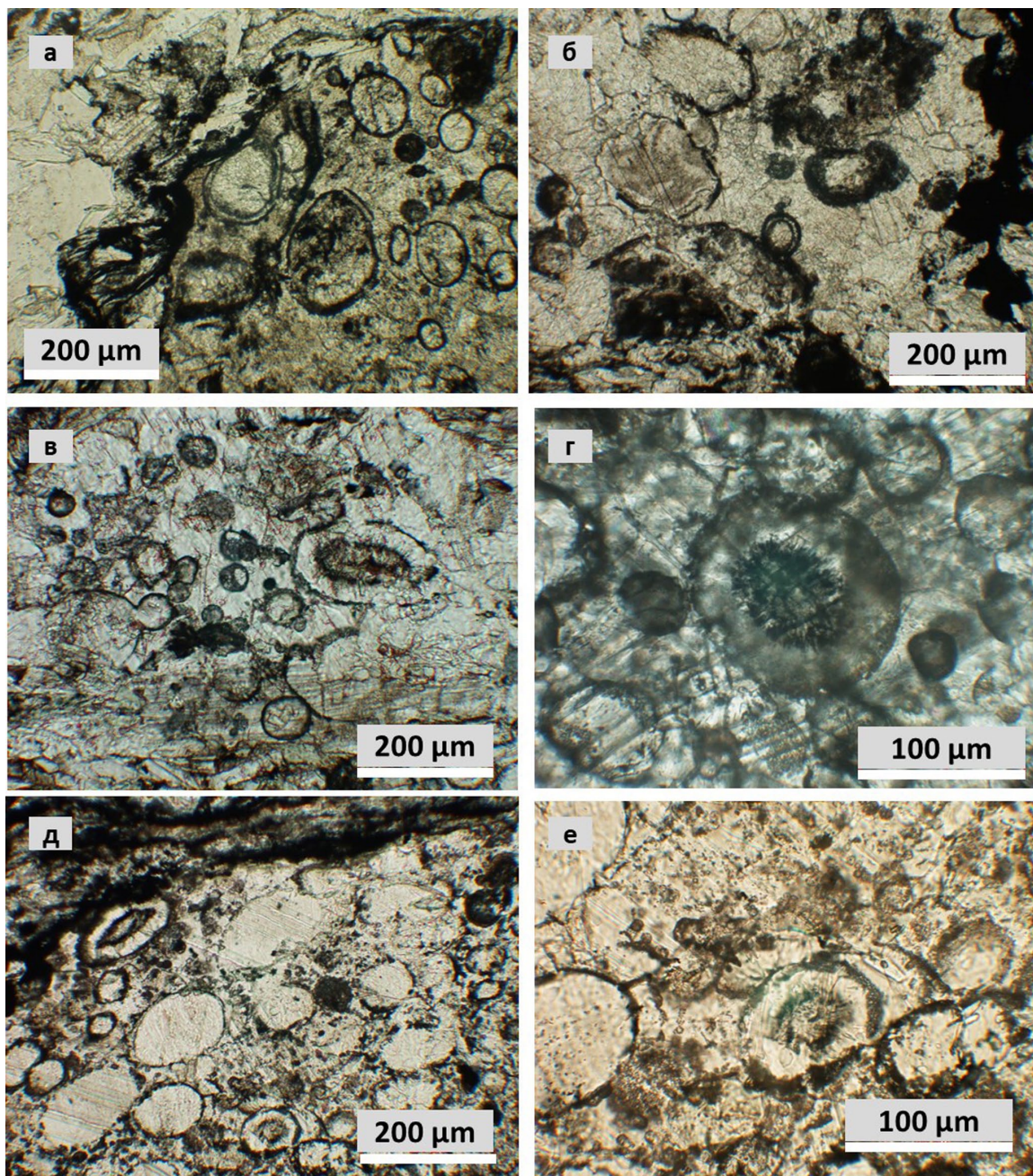


**Рис. 8.** Микрофотографии разных видов сферул, наблюдаемых в обломках известняков (здесь и далее фрагменты шлифов в проходящем свете, николи II).

а–г – сферулы с гладкой поверхностью и тонкой оболочкой; некоторые из них имеют затемнение в центре, занимающее более половины объема; д–з – сферулы дисковидной, удлинено-овальной, яйцевидно-удлинённой и каплевидной форм, закругленные к базальной части.

**Fig. 8.** Micrographs of different types of spherules observed in limestone fragments (hereinafter, fragments of thin sections in transmitted light, Nicol II).

а–г – spherules with a smooth surface and a thin shell; some of them have a darkening in the center, occupying more than half the volume; д–з – spherules of disc-shaped, elongated-oval, ovoid-elongated and drop-shaped forms, rounded toward the basal part.

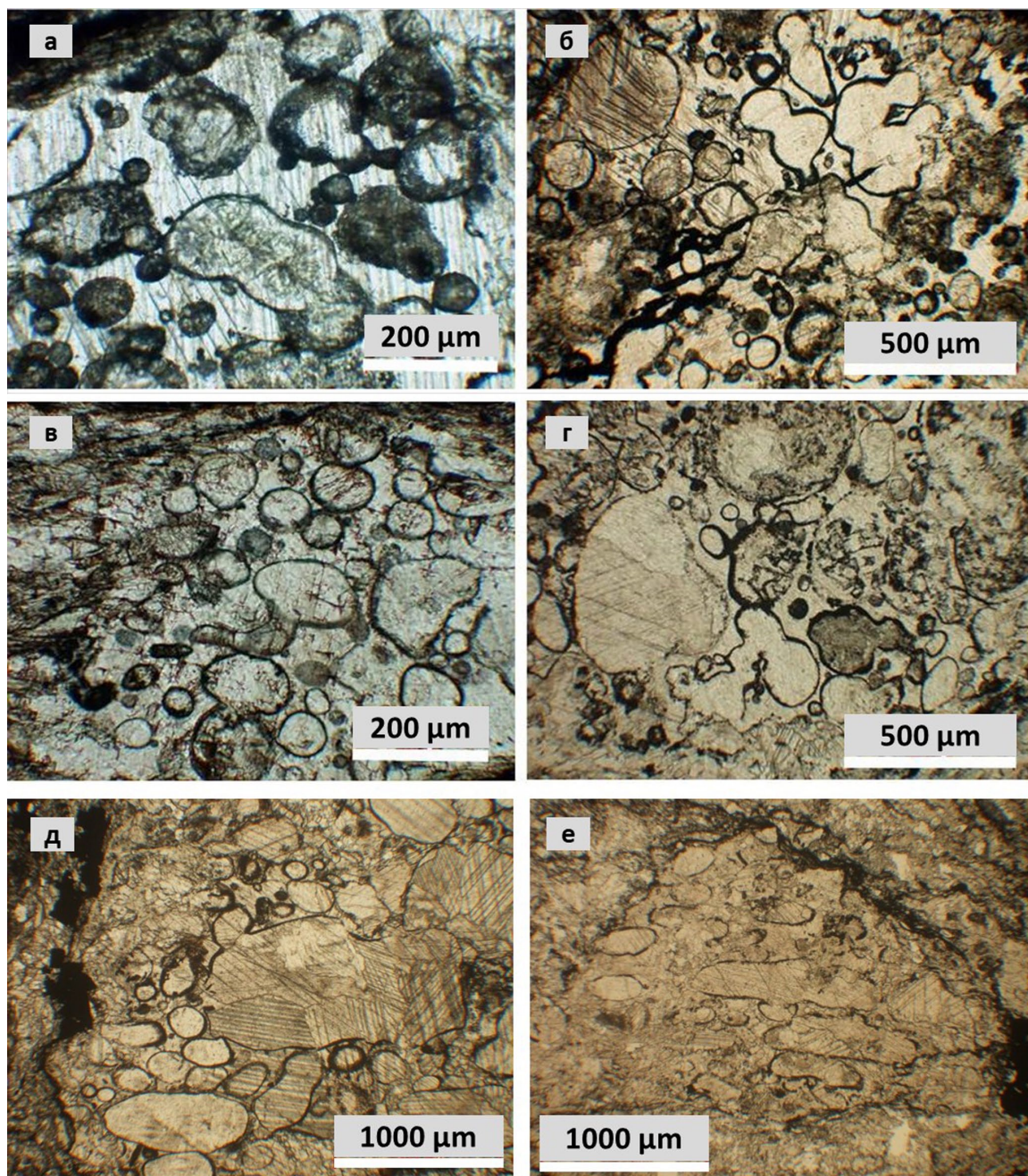


**Рис. 9.** Микрофотографии разных видов сферул из обломков известняков (шлифы, николи II).

а, б – единичные формы оболочек представлены “кольцами”; в–е – формы, в центральной части которых наблюдаются ворсистые выделения, занимающие половину объема сферы.

**Fig. 9.** Micrographs of different types of spherules from limestone fragments (thin sections, Nicol II).

а, б – individual forms of shells are represented by “rings”; в–е – forms in the central part of which shaggy secretions are observed, occupying half the volume of the sphere.



**Рис. 10.** Микрофотографии разных видов сферул из обломков известняков (шлифы, николи II).

а–г – колонии – скопления “матрешковидных” оболочек и образования амебоидного облика с ярко выраженной черными оболочками; д, е – пузырьчатые микропроблематики (катаграфии) группы *Vesicularia* Koroljuk, 1963?

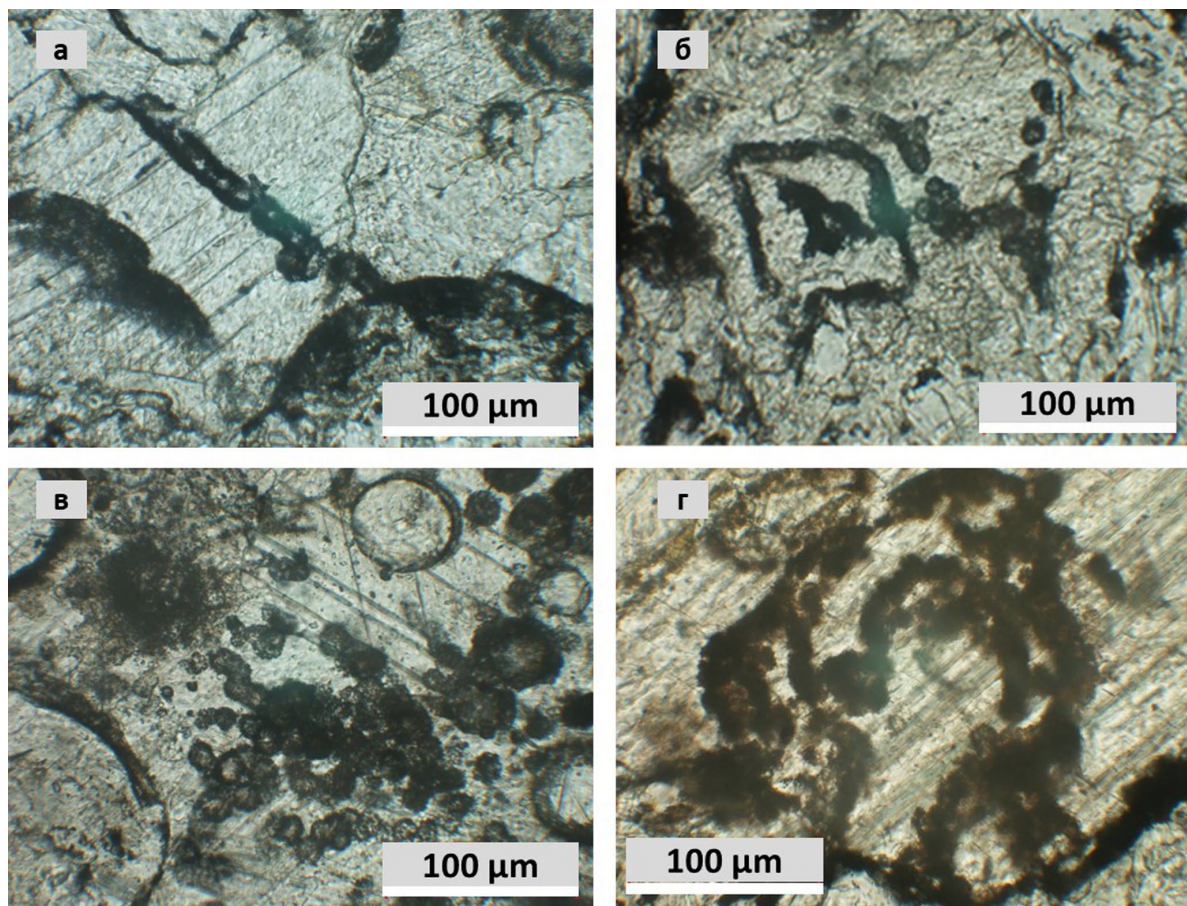
**Fig. 10.** Micrographs of different types of spherules from limestone fragments (thin sections, Nicol II).

а–г – колонии-скопления “matryoshka-shaped” shells and amoeboid formations with clearly defined black shells; д, е – vesicular microproblemata (catagraphs) of the *Vesicularia* group Koroljuk, 1963?

полигенетической группой зерен, объединяющих комки карбонатного ила (матрикса), микритизированные зерна, водорослевые пелоиды и фекальные комочки (пеллеты). Различаются пелоиды биогенного происхождения, комки переотложенного ила и

зерна, образовавшиеся на месте своего нахождения (Сапурин, Мизенс, 2014). Большая часть пелоидов образуется на стадии сингенеза и диагенеза осадков.

Оолиты и онколиты, образующие сферулы размером обычно >2 мм, реже – меньше, представле-



**Рис. 11.** Микрофотографии разных видов сферул из обломков известняков (шлифы, николи II).

а–г – цепочки – скопления округлых микронных сферул, напоминающие колониальные коккоидные микрофоссилии (грибы?) *Eosaccharomyces ramosus* Herm.

**Fig. 11.** Micrographs of different types of spherules from limestone fragments (thin sections, Nicoli II).

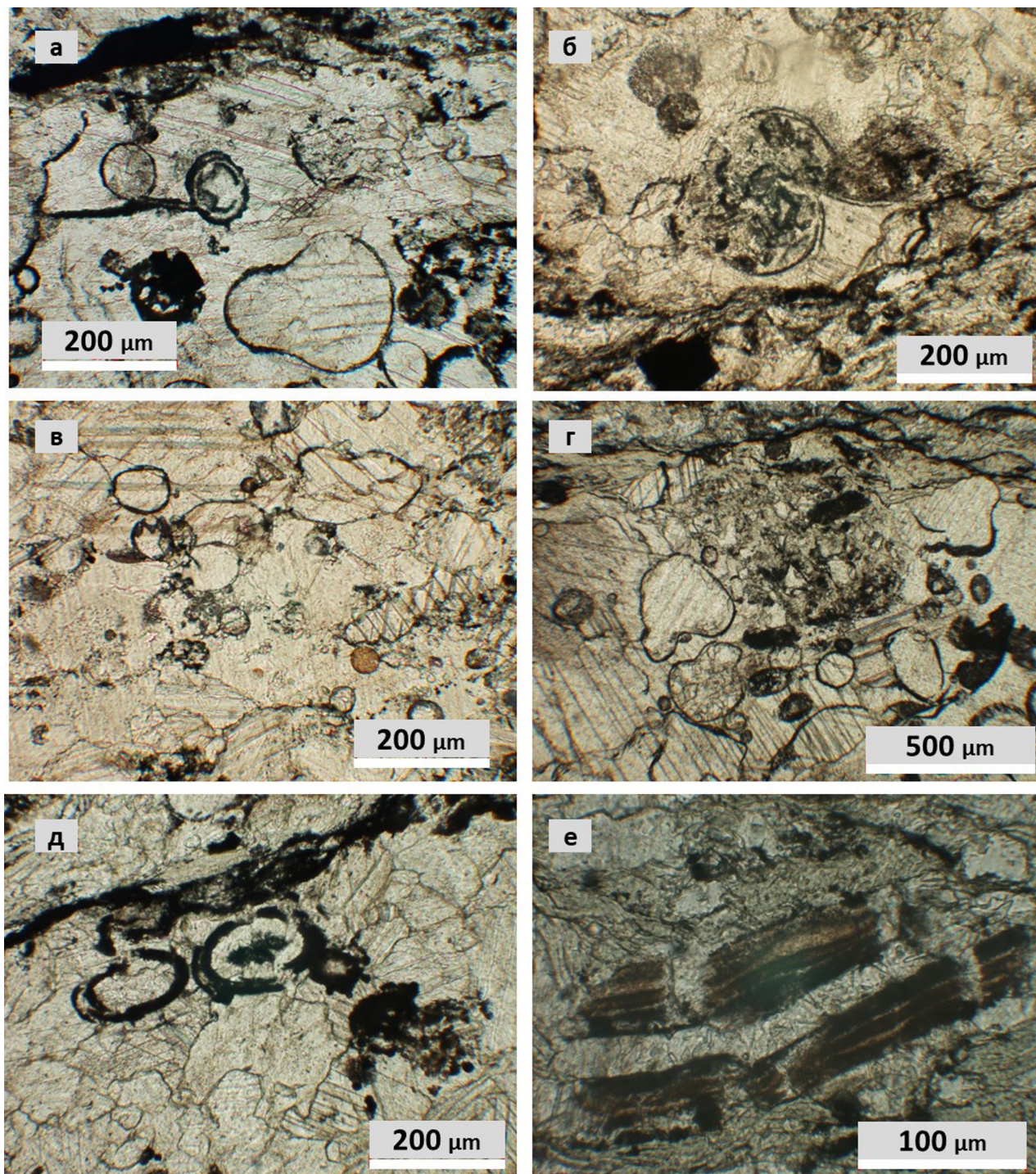
а–г – chains-clusters of rounded micron spherules, reminiscent of colonial coccoid microfossils (fungi?) *Eosaccharomyces ramosus* Herm.

ны также большой генетической группой. Отличаются наличием ряда слоистых концентрических оболочек и присутствием внутри сферулы ядра (минеральной частицы или обломка органики), вокруг которого образуются слои. При этом оолиты считаются абиогенными образованиями, а онколиты – биогенными, тесно связанными с формированием строматолитов.

Пузырчатые образования простой округлой формы, состоящие из тонкой пелитоморфной стенки и центральной камеры, заполненной более крупнозернистым карбонатом, выделены как микропроблематики – микрофитоциты (катаграфии) группы *Vesicularia* Koroľjuk (Королюк, 1960; Ископаемые проблематики СССР, 1990). Это округлые образования размером 90–200 мкм, с толщиной стенок 10 мкм. Тельца преимущественно овальной формы в сечении, хотя бывают и угловатые, и уд-

линенные. Контур телец без резко выступающих углов и впадин. Каждое тельце очень четко ограничено тонкой темной стенкой. Тельца тесно прижаты друг к другу, образуя сплошную сеть.

Органостенные микрофоссилии (ОМ) представляют собой большую группу крайне гетерогенных по своим биологическим связям ископаемых микроорганизмов (Вейс, 1993). В количественном отношении среди них резко преобладают остатки двух основных морфологических типов – сфероморфных (коккоидных) и нитчатых. Помимо этих двух типов, варьирующихся по размерам и второстепенным особенностям строения в широких пределах, в отложениях различного возраста известны полигональные, овально-эллипсоидальные, кольцевидные, клубковидные, сферические, спиральные, членистые, конические, цепочечные, кустиковидные и некоторые другие разновидности.



**Рис. 12.** Микрофотографии разных видов сферул из обломков известняков (шлифы, николи II).

Среди всего разнообразия сферул нередко встречаются самые причудливые формы: а, б – со сложным внутренним строением сферы, “стеблями” и хвостовидными выростами; в – “вазообразные”; г – “бабочкообразные” формы черного цвета; д – округлые толстостенные с бородавчатыми выростами на поверхности; е – лентообразные фрагменты слоевища водоросли?

**Fig. 12.** Micrographs of different types of spherules from limestone fragments (thin sections, Nicoli II).

Among all the variety of spherules, the most bizarre forms are often encountered: а, б – with a complex internal structure of the sphere, “stems” and tail-like outgrowths; в – “vase-shaped”; г – “butterfly-shaped” forms of black color; д – rounded, thick-walled with warty outgrowths on the surface; е – ribbon-shaped fragments of the algae thallus?

Единственным общим признаком, объединяющим все эти резко разнородные микроископаемые, является наличие в их составе защитных и опорных структур (клеточных стенок, чехлов, оболочек), сложенных различными высокостойкими углеводородными соединениями – полисахаридными, гликопептидными и другими комплексами, что и позволило им fossilizироваться в определенных специфических условиях. Классификация ОМ опирается на их морфологические особенности. Все ОМ разделяются на следующие морфологические группы: акритархи, одиночные и колониальные коккоидные формы, нитчатые чехлы, трихомы, сложнопостроенные образования (Вейс, 1993; Микрофоссилии докембрия СССР, 1989; Тимофеев, 1969; и др.).

Преимущественная часть всех ОМ описанных групп выделена из состава первично-глинистых, известково-глинистых и кремнистых пород, накопившихся в нормально-морских условиях седиментогенеза (Сергеев, 1992). При этом изученные породы были практически не метаморфизованы. Все методики при изучении органостенных микрофоссилий рекомендуют опробование именно таких литотипов пород. Считается, что в карбонатных породах при быстрой раскристаллизации кальцита клеточные оболочки бактериальных тел разрушаются и не сохраняются (Астафьева и др., 2011). Однако по результатам исследований органостенных микрофоссилий докембрия–нижнего палеозоя Б.В. Тимофеев (1969) отмечает, что "... высокая степень метаморфизма пород, вплоть до амфиболитовой фации, не исключает вовсе возможности обнаружения в них микрофоссилий". Причем, по его же мнению, в карбонатных породах они сохраняются лучше.

С учетом сказанного описываемые проблематичные образования в виде скопления сферул в пределах обломков известняков в метагравелитах флишовой толщи могут являться, по нашим представлениям, с той или иной долей вероятности скоплениями разных морфологических групп ископаемых микроорганизмов и микропроблематик докембрия: акритарх, колониальных коккоидных микрофоссилий, грибов, катаграфий и др. Все разнообразие наблюдаемых в шлифах сферических образований разделено нами на отдельные популяции с устойчивыми внешними признаками и размерами (см. рис. 3, 5–6, 8–12).

Преобладающая часть сохранившихся сферических образований с оболочками имеет округлую форму и гладкую внешнюю поверхность, размеры от 5 до 80 мкм. Гораздо реже встречаются сферические образования округлой и овальной формы с гладкой внешней поверхностью и внутренним ядром с размерами до 50% от диаметра сфер. Внутренняя часть представляет собой либо затемнение (см. рис. 8в, г), либо ворсистое образо-

вание в виде "ежика" (см. рис. 9в–е). Ряд сферул имеют кольцеобразную (двойную) оболочку (см. рис. 5з, 8в, 9а, б); другие характеризуются наличием скульптурированных оболочек в виде шагреновой (см. рис. 6д, е), бугорчатой (см. рис. 5ж, з), ворсинчатой (см. рис. 5д, е), бородавчатой внешней поверхности с небольшими булавообразными выростами (см. рис. 12д). У некоторых сферул имеются длинные выросты? в виде "стебля" или "конского хвоста" (см. рис. 12а, б).

Наблюдаются также цепочки – скопления округлых микронных сферул (5–10 мкм), напоминающие колониальные коккоидные микрофоссилии (см. рис. 11а–г). Встречаются скопления сферул дискоидной, удлиненно-овальной, яйцевидно-удлиненной и каплевидной форм, закругленные к базальной части (см. рис. 3в, г; рис. 5в, г; рис. 8д–з) и имеющие иногда устьевые отверстия (см. рис. 6б). Интересны колонии – скопления "матрешковидных" оболочек, местами с элементами симметрии и образования амебоидного облика с ярко выраженными черными оболочками (см. рис. 10а–г); некоторые скопления пузырчатых образований размером >500 мкм сходны с микропроблематиками (катаграфиями) группы *Vesicularia* Koroljuk, 1963? (см. рис. 10д, е). Встречаются нитчатые ветвистые образования (см. рис. 3д–з), лентовидные микрофрагменты слоевища водоросли? (см. рис. 12е), косые срезы полых игловидных чехлов? длиной 100–150 мкм и диаметром 5–10 мкм, сложенные тем же материалом, что и оболочки сферул.

При отнесении проблематичных образований к биогенным или абиогенным прежде всего необходимо рассмотреть вопрос их сингенетичности и биогенности (Федонкин, Сергеев, 2018). По мнению Дж.В. Шопфа (Schopf, 1999), критерии биогенности проблематичных микроструктур сводятся к следующему: 1) они должны состоять из углефицированного органического вещества (или из замещенной минералом органической структуры, что требует доказательств); 2) они должны обладать сложной клеточной структурой, что исключило бы возможное небоиологическое происхождение; 3) они должны быть многочисленными и 4) являться членами многокомпонентной ассоциации (земные экосистемы не бывают одновидовыми); 5) они должны демонстрировать весь диапазон тафономической деградации в соответствии с характером их сохранности; 6) эти объекты должны иметь определенную морфологическую изменчивость, которая определяется геномом у всех видов; 7) порода и сами объекты должны представлять среду, годную для обитания, и 8) демонстрировать стадии роста и биологической репродукции путем клеточного деления, а также 9) биогенные изотопные метки.

Учитывая начальный уровень изученности выявленных сферул, можно отметить, что получен-

ные результаты проведенных исследований полностью соответствуют, по нашему мнению, указанным выше критериям сингенетичности и биогенности (Федонкин, Сергеев, 2018) по пунктам 3, 4, 6, 7 и частично по пунктам 1, 2, 8. Первоначальная порода, вмещающая сферулы, относится к известнякам, что можно видеть по обломкам, наблюдающимся в слабометаморфизованных гравелитах флишоидной толщи по разрезу на удаленных флангах месторождения; в пределах Центрального участка эти породы метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации, но сами сферулы сохранили большей частью свои формы и их разнообразие.

Сферические образования являются многочисленными в составе обломков известняков, и разнообразие соседствующих форм указывает, что они являются членами многокомпонентной ассоциации. В ряде случаев наблюдаются формы со сложным внутренним строением сферул, что может отражать особенности первичной клеточной структуры, не различимой при изучении шлифов; ряд однотипных сферул характеризуется определенной морфологической изменчивостью, признаками стадий роста и клеточного деления. Большинство сферул имеют тонкую черную оболочку, сложенную, как уже установлено, оксидом титана (рутила) и другими, в настоящее время не изученными соединениями, вероятно, с углеродом.

Можно предполагать как минимум два варианта образования “титановых” оболочек на поверхности карбонатных сферул: 1) метаморфогенный, обусловленный метаморфическими преобразованиями пород, ремобилизацией титана из вмещающих филлитов и переотложением титановых соединений в виде новообразований на поверхности карбонатных сферул, и 2) аутигенный, связанный с процессами формирования и преобразования специфических разностей биогенных известняков, сложенных органогенными матами, в составе которых присутствовали различные высокостойкие углеводородные соединения, изначально обогащенные титаном.

В природных условиях титан встречается главным образом в виде двуокиси титана ( $\text{TiO}_2$ ), известной в виде трех минеральных разновидностей: рутила, анатаза и брукита. Окисные соединения титана являются обычными минералами для некоторых магматических и метаморфических пород, где они присутствуют или как первичный компонент, раскристаллизовавшийся наряду с другими минералами, или как вторичный продукт разрушения более сложных по составу титаносодержащих минералов (ильменита, титаномагнетита и др.).

Рутил можно найти как самостоятельный минерал почти во всех метаморфических фациях (Meinhold, 2010). Он в основном образуется в ходе метаморфических процессов средней ( $500\text{--}650^\circ\text{C}$ ) и

высокой ( $>650^\circ\text{C}$ ) степени. Как типичная высокобарическая и высокотемпературная версия  $\text{TiO}_2$ , он преимущественно встречается в высокометаморфических породах, обычно богатых алюминием. Это характерный минерал для гранулитовой и эклогитовой фаций. Рутил в метаморфических породах высокой и сверхвысокой степени образует в основном отдельные кристаллы в матрице, но также встречается в виде включений в других минералах, таких как гранат, пироксен, амфибол и циркон. Эти зерна рутила могут иметь идиоморфные, до суб-идиоморфных, формы с размерами зерен от нескольких мкм до нескольких мм. Рутил также встречается в форме ориентированных игольчатых стержней, известных как сагенитовая текстура, или “звезды Венеры”.

Рутил может также образовываться и в относительно низкосортных метаморфических породах ( $300\text{--}500^\circ\text{C}$ ); в метаморфических породах низкой и средней степени он обычно встречается в виде мелких ( $\approx 20\text{--}100$  мкм) отдельно разбросанных игольчатых кристаллов или поликристаллических агрегатов. Игольчатая, эвгедральная морфология кристаллов показывает, что рутил вырос во время метаморфизма, не имеет обломочного происхождения. Такие метаморфогенные новообразования рутила наблюдались нами в филлитах из разреза терригенных ритмитов в ассоциации с метаморфогенным пирротинном, в виде сростков с пирротинном и другими сульфидами (см. рис. 6), а также как новообразования кристалликов рутила в составе метаморфогенных мусковита, кварца и других минералов микрокристаллических сланцев (скв. D1387, 127.9 м). Таким образом, среда образования, скопления обломочного рутила и наблюдаемые новообразованные минеральные ассоциации с рутилом в метаморфизованных флишоидных отложениях всяческого бока кумторской структуры позволяют предполагать, что “титановые” оболочки вокруг карбонатных сферул вполне могли сформироваться в условиях метаморфизма.

В осадочных породах рутил, анатаз, брукит и лейкоксен входят обычно в число обломочных зерен терригенных осадков. В поверхностных условиях земной коры титан в виде устойчивых минеральных разностей перемещается механически-водными потоками, частично ветром, а не в форме истинных растворов. В песках рутил и ильменит остаются практически неизменными. В глинах они обычно присутствуют в виде пелитовых частиц. Большое промышленное значение в России, а также за рубежом имеют морские (донные, пляжевые, дельтовые) россыпи комплексного циркон-рутил-ильменитового состава. Кроме этого, в литературе описаны проявления аутигенных титановых соединений в породах осадочного происхождения.

Развитие аутигенных титановых соединений в ассоциации с углистым веществом описано

Н.В. Ренгартен (1956) для угленосных осадочных пород Карагандинского угольного бассейна. При микроскопическом изучении образцов продуктивной карагандинской свиты карбона установлено наличие в мелко-, среднезернистых песчаниках фаций речного аллювия и прибрежной зоны открытых озер аутигенных выделений титанистых минералов, которые связаны своим происхождением с процессами разложения растительного материала. Аутигенные титансодержащие минералы представлены брукитом, анатазом и лейкоксеном и чрезвычайно широко распространены. Они встречаются совместно, вблизи и внутри скоплений обугленных растительных остатков. Лейкоксен дает бесформенные выделения, которые в отраженном свете имеют фарфоровидный облик и розовато-белую окраску; в проходящем свете они кажутся темно-коричневыми, почти черными, а при скрещенных николях часто изотропные.

Присутствие агрегатных скоплений новообразованного анатаза установлено также в древесных остатках при изучении образцов минерализованной древесины (Ренгартен, 1956). Полости клеток в тканях древесины заполнены кварцево-халцедоновой массой с микроскопическими жеодами анатаза. Кроме того, мельчайшие (около 20 мкм) каплевидные зернышки титановых минералов иногда выделяются в виде цепочки внутри трубчатых сосудов древесины. Все это также подтверждает генетическую связь образования титановых минералов с органическим веществом растительного происхождения.

Брукит и анатаз (Пустовалов, 1956) в песчано-глинистых отложениях девона на Южном Тимане описаны И.А. Преображенским (1941), а позже Д.П. Сердюченко и Л.В. Добротворской (1949). Новообразованные минералы титана формируют здесь микроскопические кристаллы, вырастающие на относительно более крупных губчатых зернах и обломках лейкоксена, имеющих обычно очень неровную, бугристую поверхность. Кристаллы брукита и анатаза образовались на месте в условиях диагенеза в уже сформировавшемся осадке. Н.В. Логвиненко (1944) обнаружил новообразованные титановые минералы в каменноугольных отложениях северо-востока Донбасса. Ц.Н. Питковская (1953) установила в девонских песчаниках Западной Башкирии постоянное совместное присутствие вторичных титанистых минералов, каолинита и обуглившихся растительных остатков. Интересна находка А.Б. Диком (Dick, 1928) новообразованных иголочек рутила внутри раковин *Bathysiphon argenteus*.

М.М. Астафьевой и А.Ю. Розановым (2012) среди микрофоссилий кварц-серицитовая зона коры выветривания древних пород (2.1 млрд лет) Центральной Карелии встречены формы, имеющие крайне специфический химический состав. Это

овальные формы с неровной поверхностью и палочковидные формы, в составе которых существенную роль играет титан, тогда как в составе вмещающих пород титан практически отсутствует.

Аутигенные минералы титана, брукит и анатаз наблюдаются в раннекембрийских углеродистых сланцах из разрезов Мейшукун и Чжаджин Южного Китая (Liu et al., 2019). Агрегаты анатаза в черных сланцах Чжаджинского разреза сростаются с битумом. Предполагается, что Ti в этих сланцах мобилизуется в богатых органикой флюидах с низким pH и впоследствии предпочтительно осаждается в виде анатаза. Мобилизация инертного Ti в черных сланцах свидетельствует о возможном диагенетическом или постдиагенетическом его перераспределении в углеродистых породах.

В публикации Е. Сирантуан и др. (Sirantoine et al., 2021) сообщается о нескольких таксонах микрофоссилий (*Leiosphaeridia minutissima*, *Leiosphaeridia crassa*, *Synsphaeridium spp.* и *Myxococcoides spp.*), обнаруженных в фосфатной и глинистой минеральной матрице силикокластических докембрийских пород формаций группы Торидон (Шотландия), которые включают популяции клеток, содержащих анатаз (TiO<sub>2</sub>), идентифицированный с помощью электронной микроскопии. Большинство кристаллов анатаза встречаются полностью внутри отдельных клеток, окруженных неразрушенными углеродистыми стенками. Эти наблюдения показывают, что внутриклеточный анатаз является аутигенной осадочной фазой, тесно связанной с микроископаемыми. Путь минерализации для анатаза включает комплексообразование Ti с органическими лигандами внутри определенных клеток, что приводит к локализованному посмертному зародышеобразованию анатаза внутри этих клеток по мере распада комплексов. Дальнейший рост кристаллов анатаза, вероятно, вызван очень ранней диагенетической мобилизацией Ti, который был связан с более лабильным органическим материалом поблизости в отложениях.

В обзоре, сделанном в той же работе Е. Сирантуан (Sirantoine et al., 2021), анатаз описан в ассоциации с окаменелостями из ограниченного диапазона осадочных условий. В современных условиях анатаз осаждался вокруг микроископаемых в гидротермальных отложениях в исландских горячих источниках (Geptner et al., 2005) или гидротермально измененных базальтовых подушечках в Атлантическом океане (Cavalazzi et al., 2011). Анатаз также обнаружен в связи с макроископаемыми: олигоценным головастиком и копролитом (Toporski et al., 2002), и как нанокристаллы, связанные с углеродистыми остатками юрских листьев (Johnston et al., 1987). Докембрийские примеры включают зерна анатаза, связанные с окремненными органическими стенками микроископаемых формации Дракен (Foucher et al., 2012); диагенетические, богатые

титаном нанокристаллы, возможно, анатаз, связанные с франсвилльскими ганфлинтоподобными микроскопаемыми (Lekele Baghekema et al., 2017). Все эти исследователи сообщают о зернах анатаза вокруг окаменелостей, но не описывают аутигенные кристаллы анатаза внутри окаменелостей.

Я.Э. Юдович в обобщающей работе по геохимии титана (Юдович и др., 2018), разбирает ряд интересных фактов поведения и концентрации титана в связи с живым и биогенным веществом в процессе угленакопления, с накоплением морских карбонатных и кремнистых осадков, и отмечает слабую изученность этого вопроса. По его наблюдениям, важной особенностью геохимии титана в углях является накопление его в битуминозных микрокомпонентах группы лейптинита – в спорах и коровых тканях. На данном этапе исследований можно с уверенностью говорить о реальном вкладе первично-растительного титана ( $Ti_{\text{био}}$ ) в его концентрациях в некоторых углях. Наблюдается обилие аутигенных, дисперсно-распределенных в угольном ОВ микроминеральных фаз – рутила и анатаза, реже брукита, которые являются продуктом трансформации форм  $Ti_{\text{био}} \rightarrow Ti_{\text{мин}}$ .

В этом же обзоре указывается на заметный вклад биогенной (радиоляриевой) фракции  $Ti_{\text{био}}$  в валовое содержание титана в некоторых морских осадках, особенно кремнистых; в литературе имеются данные о накоплении  $Ti$  не столько в живом веществе, сколько в ортобиогенном минеральном веществе – в раковинках кремневого фитопланктона (по данным Дж. Мартина и Г. Кнаурера), и в кремневых губках (в сводке Е. Крессмана).

Значения титанового модуля в карбонатных породах очень часто повышены (Юдович и др., 2018), что объясняется сингенетичным вхождением небольших примесей титана в карбонатное вещество известковых осадков. При этом отмечается, что кларковая титанистость большинства карбонатных пород в сильнейшей степени зависит от доли в этих породах силикатного материала – основного носителя титана. А.П. Лисицын с коллегами (1980) выявили парадоксальное, по замечанию Я.Э. Юдовича (Юдович и др., 2018), обогащение титаном пелагических осадков океана, которое может иметь только одно объяснение, а именно добавку к терригенному титану титана аутигенного: “... обогащение осадков титаном обусловлено процессами, характерными только для океанского седиментогенеза, извлечением его из раствора океанской воды сорбционными процессами, образованием гидроокисей титана при гидролизе органического вещества в глубоких горизонтах водной толщи и на поверхности осадочного слоя”. Вклад аутигенных форм титана в осадки, по их данным, превышает 50%, достигая иногда 80% от валового содержания в осадках.

Титан принадлежит к числу наиболее распространенных в природе литофильных элементов,

среднее содержание его в земной коре составляет, по А.П. Виноградову, 0,45%. Но в биосфере он рассеян, относится к числу абиогенных нейтральных элементов и слабых мигрантов (Бгатов, 1999). В 1937 г. В.И. Вернадский (1954) сделал предположение о том, что титан нужен организму, так как он выполняет определенные жизненно важные функции. Сейчас установлено, что титан в организмах содержится в тысячных–десяти тысячных долях процента (на живой вес). Причем растения содержат его больше, чем животные. В наземных растениях его концентрация около  $10^{-4}\%$ , в морских – от  $1,2 \cdot 10^{-3}$  до  $8 \cdot 10^{-2}\%$ , в тканях наземных животных – менее  $2 \cdot 10^{-4}\%$ , а морских – от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-2}\%$ .

Среди растительных организмов наибольшее количество титана найдено у водоросли *Cladophora glomerata* (0,032% на живой вес). В современной бурой водоросли *Fucus sp.* накапливается титана в 10 тыс. раз больше (до  $1 \cdot 10^{-3}\%$ ), чем в окружающей морской воде ( $1 \cdot 10^{-7}\%$ ). Известно, что наиболее древние водоросли концентрировали преимущественно железо (Сабурин, 2004). У бурых водорослей, известных с конца протерозоя, на фоне снижения уровня концентрации железа возрастало содержание в клетках меди, никеля и титана.

Из изложенного следует, что нельзя отрицать возможность аутигенного накопления титана в определенных специфических условиях осадконакопления с последующим образованием минеральных форм оксидов титана в этих осадках в связи с жизнедеятельностью морских микроорганизмов и бактерий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами по совокупности проведенных исследований и анализа изложенных выше материалов предполагается вероятная природа образования наблюдаемой популяции карбонатных сферул с оболочками в связи с биогенными процессами типа образования органогенных матов карбонатного состава; при этом сферулосодержащие карбонатные обломки в метагравелитах имеют кластогенную природу, более древний возраст и отличаются от прослоев карбонатных пород в разрезе флишовой толщи по текстурно-структурным характеристикам. Относительно природы образования “титаносодержащих” оболочек карбонатных сферул на данном этапе исследований предполагаются две возможные гипотезы их появления: 1) в связи с процессами жизнедеятельности морской биоты и диагенеза первичных карбонатных осадков образование аутигенных концентраций титановых минералов в виде тончайших оболочек, покрывающих сферулы; 2) как результат ремобилизации титана из вмещающих филлитов при метаморфогенных процессах и его переотложение в виде новообразованных тонкокристаллических скоплений ти-

тановых минералов, замещающих первичные оболочки сферул, состоявших из углеводородных соединений. Вероятно, возможны и другие варианты образования скоплений карбонатных сферул и наблюдаемых в тесной ассоциации с ними микронных оболочек с тонкозернистыми скоплениями оксидов титана. Это покажут дальнейшие детальные исследования.

Обнаруженные прослои метагравелитов с карбонатными обломками и сферами уже сейчас представляют интерес в качестве маркирующего горизонта при прослеживании специфической флишоидной толщи терригенных ритмитов в структуре всячего бока рудоносной структуры месторождения Кумтор и предполагают возможность обнаружения среди разреза верхнего протерозоя района хр. Акийряк карбонатных разрезов с горизонтами, содержащими скопления подобных сферул, служивших источником обломочного материала для описанных выше метагравелитов флишоидной толщи. Вероятно, они также связаны со сфероморфидами и мегафоссилиями неясного систематического положения, обнаруженными в породах джергалачской свиты верхнего рифея К.С. Сагындыковым (1987), в той же структуре западнее месторождения Кумтор, в районе пер. Акбель. Подобные мегасфероморфиды описаны также Р.Н. Огурцовой (Огурцова, Сергеев, 1989) в породах чичканской свиты верхнего докембрия Южного Казахстана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьева М.М., Герасименко Л.М., Гептнер А.Р. и др. (2011) Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. М.: ПИН РАН, 172 с.
- Астафьева М.М., Розанов А.Ю. (2012) Древние коры выветривания как среда обитания наземной биоты. Сер. "Гео-биологические системы в прошлом". М.: ПИН РАН, 57-68. [http://www.paleo.ru/institute/files/early\\_colonization.pdf](http://www.paleo.ru/institute/files/early_colonization.pdf)
- Бгатов А.В. (1999) Биогенная классификация химических элементов. *Философия науки*, 2(6), 80-90.
- Вейс А.С. (1993) Органостенные микрофоссилии докембрия – важнейший компонент древней биоты. *Проблемы доантропогенной эволюции биосферы*. М.: Наука, 265-282.
- Вернадский В.И. (1954) Очерки геохимии. Избр. соч. Т. I. М.: АН СССР, 61-89.
- Вологдин А.Г. (1962) Древнейшие водоросли СССР. М.: АН СССР, 655 с.
- Ископаемые известковые водоросли. (1987) Новосибирск: Наука, 224 с. (Тр. Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР, вып. 674).
- Ископаемые проблематики СССР. (1990) М.: Наука, 57-63.
- Королюк И.К. (1960) Строматолиты нижнего кембрия и протерозоя Иркутского амфитеатра. *Геолого-геохимические исследования нефтегазоносных областей СССР*. М.: АН СССР, 112-161.
- Лисицын А.П., Лукашин В.Н., Емельянов Е.М. и др. (1980) Титан. Гл. 4. *Геохимия элементов-гидролизатов*. М.: Наука, 117-149.
- Логвиненко Н.В. (1944) К литологии и палеогеографии каменноугольных отложений северо-востока Донбасса. *Докл. АН СССР*, (5), 228-230.
- Микрофоссилии докембрия СССР. (1989) (Под ред. Т.В. Янкаускас). Л.: Наука, 191 с.
- Огурцова Р.Н., Сергеев В.Н. (1989) Мегасфероморфиды *Chuaria* из чичканской свиты верхнего докембрия Южного Казахстана. *Палеонтол. журн.*, (3), 119-122.
- Питковская П.Н. (1953) О геохимических фациях живецкого и франского времени на территории Западной Башкирии. *Геол. сб.* В 3 т. Т. 2. Л.; М.: Гостоптехиздат, 319 с.
- Преображенский И.А. (1941) Об аутигенных минералах и минералообразовании. *Тр. Ин-та геол. наук АН СССР*, сер. петрогр., 40(13), 41-54.
- Пустовалов Л.В. (1956) Вторичные изменения осадочных горных пород и их геологическое значение. *О вторичных изменениях осадочных пород*. М.: АН СССР, 3-52. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 5).
- Ренгартен Н.В. (1956) Минералы титана в угленосных осадочных породах. *О вторичных изменениях осадочных пород*. М.: АН СССР, 125-134. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 5).
- Сабурин М.Ю. (2004) Фитоценозы черноморской цистозии: структура, восстановление и перспективы использования. Дисс. ... канд. биол. наук. М.: РГБ ОД, 146 с.
- Сагындыков К.С. (1987) Разработка схемы стратиграфии и рабочей легенды докембрия–нижнего палеозоя района работ Акбельской партии. Фрунзе: ИГ АН Кырг. ССР, 105 с.
- Сапурин С.А., Мизенс Г.А. (2014) К вопросу об условиях образования пелоидных известняков восточного склона Среднего Урала. *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 161, 108-111.
- Сергеев В.Н. (1992) Окремненные микрофоссилии докембрия и кембрия Урала и Средней Азии. М.: Наука, 139 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 474).
- Сердюченко Д.П., Добротворская Л.В. (1949) О некоторых минеральных новообразованиях в осадочных породах. *Докл. АН СССР*, LXIX(3), 421-424.
- Стратифицированные образования Кыргызстана. (2015) (А.В. Дженчураева, И.Л. Захаров, Ю.В. Жуков и др.). Бишкек: Изд-во КРСУ, 338 с.
- Тимофеев Б.В. (1969) Сфероморфиды протерозоя. Л.: Наука, 67 с.
- Федонкин М.А., Сергеев В.Н. (2018) Псевдофоссилии, контаминанты и другие опасности микропалеонтологии архея и протерозоя. *Стратигр. Геол. корреляция*, 26(3), 127-128.
- Шевкунов А.Г., Корницкий А.И., Башкиров А.П., Айдаркулов Т.Н. (2023) Месторождение золота Кумтор (Срединный Тянь-Шань, Кыргызстан) и применение трёхмерного моделирования в программе Leapfrog Geo (Seequent) при проведении геологоразведочных работ. *Руды и металлы*, (2), 18-43.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. (2018) Геохимия титана. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 432 с.
- Cavalazzi B., Westall F., Cady S.L., Barbieri R., Foucher F. (2011) Potential fossil endoliths in vesicular pillow basalt, coral patch seamount, Eastern North Atlantic Ocean. *Astrobiology*, 11, 619-632.

- Dick A.B. (1928) On Needles of Rutile in the Test of Bathesiphon argenteus. *Trans. Edinburgh Geol. Soc.*, **XII**, 18-21.
- Foucher F., Westall F., Knoll A. (2012) Biosignatures observed by Raman mapping in silicified materials. European Geosciences Union, General Assembly. Vienna, Austria. V. 14, p. 4287.
- Geptner A.R., Ivanovskaya T.A., Pokrovskaya E.V. (2005) Hydrothermal fossilization of microorganisms at the Earth's Surface in Iceland. *Lithol. Miner. Resour.*, **40**, 505-520.
- Johnston M.R., Raine J.I., Watters W.A. (1987) Drumduan group of east nelson, New Zealand: Plant-bearing Jurassic arc rocks metamorphosed during terrane interaction. *J. Royal Soc. New Zealand*, **17**, 275-301.
- Lekele Baghekema S.G., Lepot K., Riboulleau A., Fadel A., Trentesaux A., El Albani A. (2017) Nanoscale analysis of preservation of ca. 2.1 Ga old Francevillian microfossils, Gabon. *Precamb. Res.*, **301**, 1-18.
- Liu Z.-R.R., Zhou M.-F., Williams-Jones A.E. et al. (2019) Diagenetic mobilization of Ti and formation of brookite/anatase in early Cambrian black shales, South China. *Chem. Geol.*, **506**(20), 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.022>
- Meinhold G. (2010) Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Sci. Rev.*, **102**, 1-28. <http://www.elsevier.com/locate/earscierv>
- Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Alexeiev D.V., Jeffreys T., Khudoley A.K., Wong J., Geng H., Shu L., Semiletkin S.A., Mikolaichuk A.V., Kiselev V.V., Yang J., Seltmann R. (2014) Detrital and igneous zircon ages for supracrustal rocks of the Kyrgyz Tianshan and palaeogeographic implications. *Gondw. Res.*, **26**, 957-974.
- Schopf J.W. (1999) Fossils and pseudofossils: lessons from the hunt for early life on Earth. *Size limits of very small microorganisms*. Washington DC: National Academy Press, 88-93.
- Sirantoine E., Wacey D., Bischoff K., Saunders M. (2021) Authigenic anatase within 1 billion-year-old cells. *Geobiol.*, **19**, 3-17.
- Terbishaliev B., Timmerman M.J., Mikolaichuk A., Altenberger U., Sláma J., Schleicher A.M., Sudo M., Sobel E.R., Cichy S.B. (2021) Calcalkaline volcanic rocks and zircon ages of the late Tonian: early Cryogenian arc-related Big Naryn Complex in the Eastern Djetim-Too Range, Middle Tianshan block, Kyrgyzstan. *Int. J. Earth Sci.*, **110**, 353-375 <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01956-z>
- Toporski J.K.W., Steele A., Westall F., Avci R., Martill D.M., McKay D.S. (2002) Morphologic and spectral investigation of exceptionally well-preserved bacterial biofilms from the Oligocene Enspel formation, Germany. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**(10), 1773-1791. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00870-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00870-5)
- Tucker M., Wright P. (2002) Carbonate sedimentology. Oxford: Blackwell Science Ltd., 482 p.
- logical systems in the past”. Moscow, PIN RAN Publ., 57-68. [http://www.paleo.ru/institute/files/early\\_colonization.pdf](http://www.paleo.ru/institute/files/early_colonization.pdf) (In Russ.)
- Bgatov A.V. (1999) Biogenic classification of chemical elements. *Filosofiya Nauki*, **2**(6), 80-90. (In Russ.)
- Cavalazzi B., Westall F., Cady S.L., Barbieri R., Foucher F. (2011) Potential fossil endoliths in vesicular pillow basalt, coral patch seamount, Eastern North Atlantic Ocean. *Astrobiol.*, **11**, 619-632.
- Dick A.B. (1928) On Needles of Rutile in the Test of Bathesiphon argenteus. *Trans. Edinburgh Geol. Soc.*, **XII**, 18-21.
- Fedonkin M.A., Sergeev V.N. (2018) Pseudofossils, contaminants and other hazards of Archean and Proterozoic micropaleontology. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **26**(3), 127-128. (In Russ.)
- Fossil calcareous algae. (1987) Novosibirsk, Nauka Publ., 224 p. (Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics SB USSR Academy of Sciences, Iss. 674). (In Russ.)
- Fossil problems of the USSR. (1990) Moscow, Nauka Publ., 57-63. (In Russ.)
- Foucher F., Westall F., Knoll A. (2012) Biosignatures observed by Raman mapping in silicified materials. European Geosciences Union, General Assembly. Vienna, Austria. V. 14, p. 4287.
- Geptner A.R., Ivanovskaya T.A., Pokrovskaya E.V. (2005) Hydrothermal fossilization of microorganisms at the Earth's Surface in Iceland. *Lithol. Miner. Resour.*, **40**, 505-520.
- Johnston M.R., Raine J.I., Watters W.A. (1987) Drumduan group of east nelson, New Zealand: Plant-bearing Jurassic arc rocks metamorphosed during terrane interaction. *J. Royal Soc. New Zealand*, **17**, 275-301.
- Korolyuk I.K. (1960) Stromatolites of the Lower Cambrian and Proterozoic of the Irkutsk Amphitheater. *Geological and geochemical research of oil and gas areas of the USSR*. Moscow, AN SSSR Publ., 112-161. (In Russ.)
- Lekele Baghekema S.G., Lepot K., Riboulleau A., Fadel A., Trentesaux A., El Albani A. (2017) Nanoscale analysis of preservation of ca. 2.1 Ga old Francevillian microfossils, Gabon. *Precamb. Res.*, **301**, 1-18.
- Lisitsyn A.P., Lukashin V.N., Emel'anov E.M. et al. (1980) Titan. Ch. 4. *Geochemistry of hydrolyzed elements*. Moscow, Nauka Publ., 117-149. (In Russ.)
- Liu Z.-R.R., Zhou M.-F., Williams-Jones A.E. et al. (2019) Diagenetic mobilization of Ti and formation of brookite/anatase in early Cambrian black shales, South China. *Chem. Geol.*, **506**(20), 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.12.022>
- Logvinenko N.V. (1944) On the lithology and paleogeography of coal deposits in the northeast of Donbass. *Dokl. Akad. Nauk.* (5), 228-230. (In Russ.)
- Meinhold G. (2010) Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Sci. Rev.*, **102**, 1-28. <http://www.elsevier.com/locate/earscierv>
- Ogurtsova R.N., Sergeev V.N. (1989) Megaspheromorphids Chuaria from the Chichkan Formation of the Upper Precambrian of Southern Kazakhstan. *Paleontol. Zhurn.*, (3), 119-122. (In Russ.)
- Pitkovskaya P.N. (1953) On the geochemical facies of the Givetian and Frasnian periods in the territory of Western Bashkiria. *Geological collection*. In 3 v. V. 2. Lenin-grad; Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 319 p. (In Russ.)

## REFERENCES

- Astaf'eva M.M., Gerasimenko L.M., Geptner A.R. et al. (2011) Fossil bacteria and other microorganisms in terrestrial rocks and astromaterials. Moscow, PIN RAN Publ., 172 p. (In Russ.)
- Astaf'eva M.M., Rozanov A.Yu. (2012) Ancient weathering crusts as a habitat for terrestrial biota. Series “Geo-bio-

- Precambrian microfossils of the USSR. (1989) (Ed. T.V. Jankauskas). Leningrad, Nauka Publ., 191 p. (In Russ.)
- Preobrazhenskii I.A. (1941) About authigenic minerals and mineral formation. *Tr. Inst. Geol. Nauk AN SSSR*, ser. petrogr., **40**(13), 41-54. (In Russ.)
- Pustovalov L.V. (1956) Secondary changes in sedimentary rocks and their geological significance. *On secondary changes in sedimentary rocks*. Moscow, AN SSSR Publ., 3-52. (*Tr. GIN AN SSSR*, Iss. 5). (In Russ.)
- Rengarten N.V. (1956) Titanium minerals in coal-bearing sedimentary rocks. *On secondary changes in sedimentary rocks*. Moscow, AN SSSR Publ., 125-134. (*Tr. GIN AN SSSR*, Iss. 5). (In Russ.)
- Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Alexeiev D.V., Jeffreys T., Khudoley A.K., Wong J., Geng H., Shu L., Semiletkin S.A., Mikolaichuk A.V., Kiselev V.V., Yang J., Seltmann R. (2014) Detrital and igneous zircon ages for supracrustal rocks of the Kyrgyz Tianshan and palaeogeographic implications. *Gondw. Res.*, **26**, 957-974.
- Saburin M.Yu. (2004) Phytocenoses of the Black Sea cystoseira: structure, restoration and prospects for use. *Disse. ... cand. biol. sci.* Moscow, RGB OD Publ., 146 p. (In Russ.)
- Sagyndykov K.S. (1987) Development of a stratigraphic scheme and working legend of the Precambrian–Lower Paleozoic of the Akbel Party's work area. Frunze, IG AN Kyrgyzstan. SSR Publ., 105 p. (In Russ.)
- Sapurin S.A., Mizens G.A. (2014) On the formation conditions of peloidal limestones of the eastern slope of the Middle Urals. *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 161, 108-111. (In Russ.)
- Schopf J.W. (1999) Fossils and pseudofossils: lessons from the hunt for early life on Earth. *Size limits of very small microorganisms*. Washington DC, National Academy Press, 88-93.
- Serdyuchenko D.P., Dobrotvorskaya L.V. (1949) On some mineral neof ormations in sedimentary rocks. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **LXIX**(3), 421-424. (In Russ.)
- Sergeev V.N. (1992) Silicified microfossils of the Precambrian and Cambrian of the Urals and Central Asia. Moscow, Nauka Publ., 139 p. (*Tr. GIN AN SSSR*, Iss. 474). (In Russ.)
- Shevkunov A.G., Kornitskii A.I., Bashkirov A.P., Aidarkulov T.N. (2023) Kumtor gold deposit (Middle Tien Shan, Kyrgyzstan) and the application of three-dimensional modeling in the program Leapfrog Geo (Seequent) during geological exploration. *Rudy i Metally*, (2), 18-43. (In Russ.)
- Sirantoine E., Wacey D., Bischoff K., Saunders M. (2021) Authigenic anatase within 1 billion-year-old cells. *Geobiol.*, **19**, 3-17.
- Stratified formations of Kyrgyzstan. (2015) (A.V. Dzhenchuraeva, I.L. Zakharov, Yu.V. Zhukov et al.). Bishkek, Izd-vo KRSU, 338 p. (In Russ.)
- Terbishaliev B., Timmerman M.J., Mikolaichuk A., Altenberger U., Sláma J., Schleicher A.M., Sudo M., Sobel E.R., Cichy S.B. (2021) Calcalkaline volcanic rocks and zircon ages of the late Tonian: early Cryogenian arc-related Big Naryn Complex in the Eastern Djetim-Too Range, Middle Tianshan block, Kyrgyzstan. *Int. J. Earth Sci.*, **110**, 353-375 <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01956-z>
- Timofeev B.V. (1969) Proterozoic spheromorphids. Leningrad, Nauka Publ., 67 p. (In Russ.)
- Toporski J.K.W., Steele A., Westall F., Avci R., Martill D.M., McKay D.S. (2002) Morphologic and spectral investigation of exceptionally well-preserved bacterial biofilms from the Oligocene Enspel formation, Germany. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **66**(10), 1773-1791. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00870-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00870-5)
- Tucker M., Wright P. (2002) Carbonate sedimentology. Oxford: Blackwell Science Ltd., 482 p.
- Veis A.S. (1993) Precambrian organ-wall microfossils are the most important component of ancient biota. *Problems of pre-anthropogenic evolution of the biosphere*. Moscow, Nauka Publ., 265-282. (In Russ.)
- Vernadskii V.I. (1954) Essays on geochemistry. *Selected works*. V. I. AN SSSR, 61-89. (In Russ.)
- Vologdin A.G. (1962) The oldest algae of the USSR. Moscow, AN SSSR Publ., 655 p. (In Russ.)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Rybina N.V. (2018) Geochemistry of titanium. Syktyvkar, IG Komi NTs UrO RAN Publ., 432 p. (In Russ.)