

УДК 552.54+55.551-72

## ИСКОПАЕМЫЕ ОРГАНИЗМЫ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ЧЕРНЫХ ОНКОЛИТОВ КАЛАНЧЕВСКОЙ СВИТЫ ВЕНДА БАЙКАЛО-ПАТОМСКОГО НАГОРЬЯ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© 2023 г. Т. В. Литвинова\*

Геологический институт РАН, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: litvinova-geo@rambler.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

После доработки 13.01.2023 г.

Принята к публикации 16.01.2023 г.

С помощью электронного микроскопа впервые изучены микроорганизмы и биогенные ультрамикроструктуры в черных онколитах каланчевской свиты венда Байкало-Патомского нагорья Восточной Сибири и во вмещающих их породах. В результате исследования установлено, что в онколитах, в отличие от вмещающих пород, широко распространены перекристаллизованные нитчатые цианобактерии, фоссилизированные колонии трубчатых организмов, а также отдельные коккоидные образования биогенного происхождения. На основе нового фактического материала анализируются особенности жизнедеятельности организмов и их участие в построении концентрической структуры черных онколитов, отмечаются особенности взаимодействия биогенных и абиогенных факторов в процессе формирования этих образований.

*Ключевые слова:* онколиты, электронный микроскоп, микрофоссилии, биогенные ультрамикроструктуры, венд, эдиакарий, Восточная Сибирь

DOI: 10.31857/S0031031X23030108, EDN: QBZTSP

### ВВЕДЕНИЕ.

Не прикрепленные ко дну водоема концентрически-слоистые карбонатные стяжения получили название онколиты (Pia, 1927). История изучения, попытки классификации, генезис и проблемы использования их в стратиграфии и литологии изложены в многочисленных трудах (Маслов, 1955; Журавлева, 1964; Wilson, 1975; Greensmith, 1978, Hallam, 1981; Головёнок, 1989; Колосов, Рожин, 2020 и др.). Большинство исследователей характеризует онколиты как сферические, желваковые или ступчатые образования карбонатного состава (известняки, доломиты), часто имеющие концентрическое строение. Предполагается, что они формировались в определенных гидродинамических условиях и при участии микроорганизмов (Twenhofel, 1919; Pia, 1927; Odum, 1957; Давыдов, 1975; Колосов, 1977; Selley, 1977 и др.). Их размеры оцениваются по-разному, от долей миллиметра до 100 мм в диаметре. Микроорганизмы миллиметровой размерности чаще относят к оолитам. На основе изучения морфологических особенностей было разработано несколько вариантов классификации сфероморфных образований: одни исследователи выделяют ооиды, оолиты, пизолиты и онколиты (Selley, 1977); другие — онколиты и оолиты, переходные разновидности между которыми весьма

условны (Колосов, Рожин, 2020); третьи рассматривают оолиты и онколиты отдельно.

При стратиграфическом расчленении докембрийских пород, за неимением фауны, долгое время исследователи опирались преимущественно на биогенные постройки, формальные таксоны строматолитов и микрофитолитов (т.е. онколитов и катаграфий). Строматолиты использовались преимущественно в глобальном масштабе, с их помощью выделяли эратемы и субэратемы, и лишь в пределах рифейских строматолитовых провинций удавалось осуществлять дифференциацию на более дробные подразделения (Semikhatov, Raaben, 2000). Применение онколитов в качестве инструмента стратиграфической корреляции оказалось еще более затруднительным. Визуальное сходство либо различие их строения далеко не всегда способны служить опорой при установлении возраста пород.

В настоящее время с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) стало возможным выявление остатков фоссилизированных организмов в строматолитах и онколитах. Это новое перспективное направление работ позволит расширить микропалеонтологические исследования и повысить их значение для стратиграфии докембрия. При изучении строматолитов разного возраста были выявлены разнообразные остатки фоссилизированных цианобактерий (Litvinova,

2016), в т.ч. и в ченчинской свите Байкало-Патомского нагорья Восточной Сибири (Литвинова, Сергеев, 2018), и установлена роль микроорганизмов в формировании их микроструктуры (Литвинова, 2018). В онколитах каланчевской свиты также обнаружены остатки микрофоссилий и показана возможность решения вопросов возникновения и формирования этих образований (Колосов, Троегубова, 2016; Колосов, 2016). Кроме того, онколиты могут быть востребованы при выделении литолого-генетических типов пород (Колосов, 2010). Это указывает на сложность объектов и необходимость их детального изучения.

Целью настоящей статьи является изложение и интерпретация нового фактического материала, полученного в результате исследования черных онколитов каланчевской свиты Байкало-Патомского нагорья, с использованием возможностей сканирующего микроскопа. С помощью методики, позволяющей наблюдать объекты в объеме (Литвинова, 2015), впервые были определены состав, морфологическое строение, распространение остатков микроорганизмов и биогенные ультрамикроструктуры в этих онколитах и во вмещающих породах. Сопоставление этих данных позволило оценить участие цианобактерий в формировании онколитов и их роль в построении структуры этих образований.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

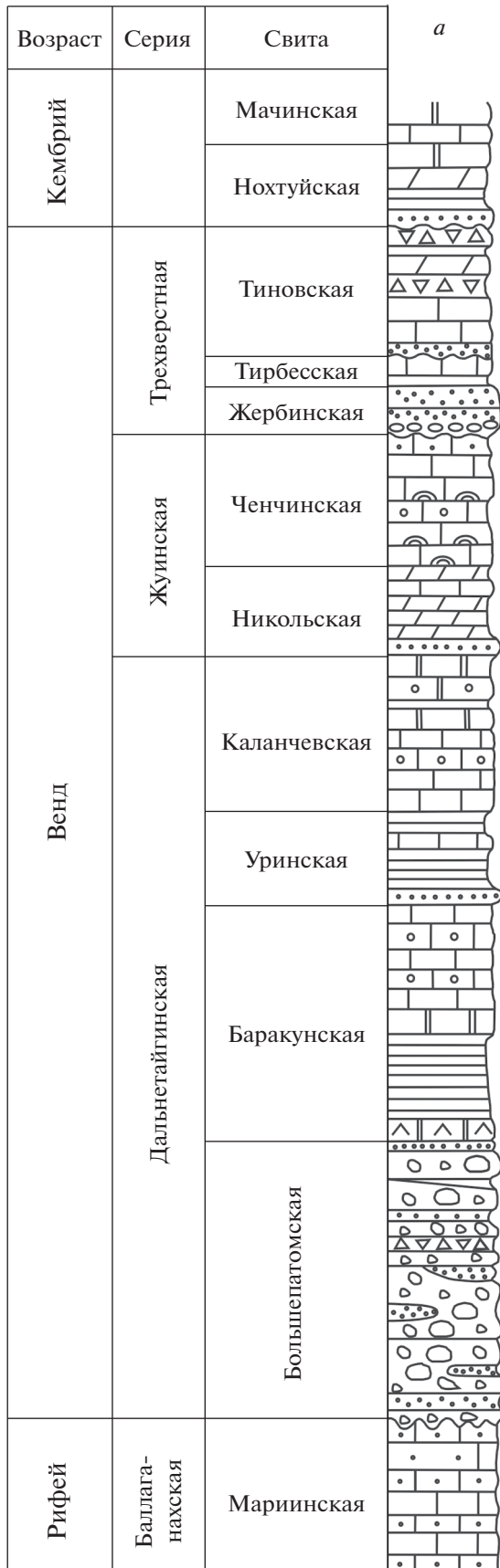
Уринское поперечное поднятие находится на северо-восточной окраине Патомской складчатой дуги (Чумаков и др., 2013) Восточной Сибири. Наиболее полный разрез рифейских и вендских отложений вскрывается близ устья р. Большой Патом и протягивается к северу, пересекая р. Лена между устьями рек Джерба (Жерба) и Малый Патом (рис. 1, *а–в*). Здесь обнажаются верхнерифейская баллаганахская серия и вендские дальнетайгинская, жуинская и трехверстная серии (Дольник, 2000; Чумаков и др., 2013).

Дальнетайгинская серия состоит из четырех согласно залегающих снизу вверх свит: большепатомской, баракунской, уринской и каланчевской. Большепатомская свита сложена в основном массивными и слоистыми тиллитами общей мощностью 900–1100 м (Чумаков и др., 2013). В

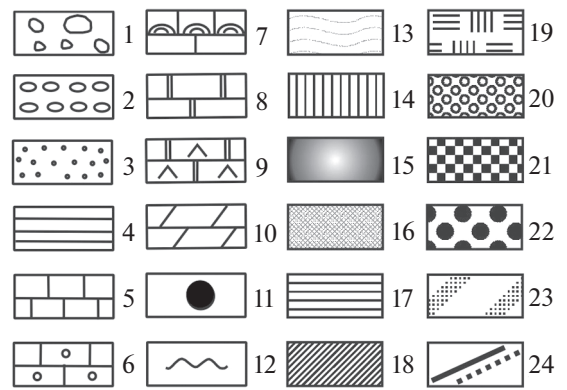
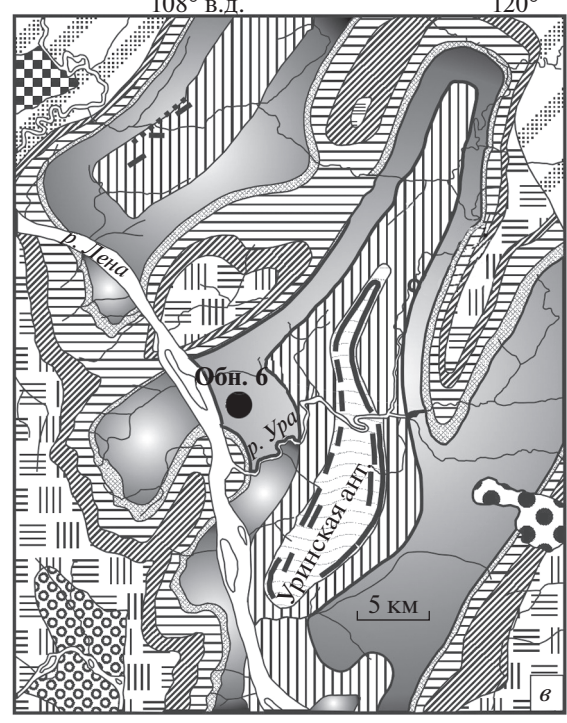
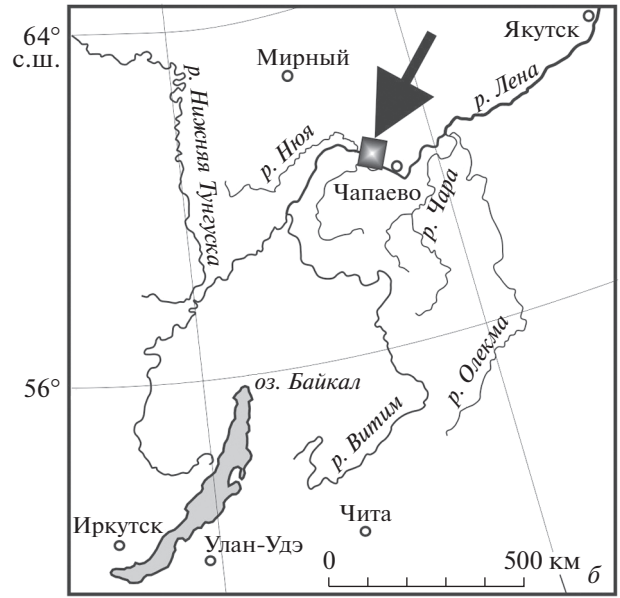
основании перекрывающей ее баракунской свиты протягивается шестиметровый базальный горизонт тонкослоистых карбонатов. Он рассматривается как завершающий толщу тиллитов цикл (Чумаков и др., 2013) и называется “венчающий доломит” или *cap-dolomites*. Основная часть баракунской свиты сложена пачками чередования темных известняков и черных сланцев общей мощностью 1100–1200 м. Уринская свита представлена преимущественно алевролитами и аргиллитами, с подчиненными прослоями доломитов и известняков, общая мощность порядка 300–350 м (Колосов, 1975). Дальнетайгинская серия завершается каланчевской свитой, представленной толщами карбонатных, реже – глинисто-карбонатных пород, отлагавшихся в литоральных обстановках мелководного бассейна, ее мощность до 500 м. В ней установлены редкие реликты строматолитовой текстуры (рис. 2, *а*), а также многочисленные и весьма разнообразные онколиты преимущественно донного происхождения (Колосов, 1975, 2010), значительно реже – сформировавшиеся во взвешенном состоянии (Колосов, Троегубова, 2016). Первые из них равномерно либо с перерывами перекатывались по дну, обрастая, соответственно, одинаковыми либо разными по толщине концентрическими слоями, их формирование осуществлялось с участием цианобактерий. Вторые прошли две стадии построения: возникновение ядра во взвешенном состоянии, затем обрастание его цианобактериями. Ядро представляет собой плотно упакованный за счет перекатывания карбонатный материал, а оболочка вокруг него носит комковатый характер (Колосов, Троегубова, 2016).

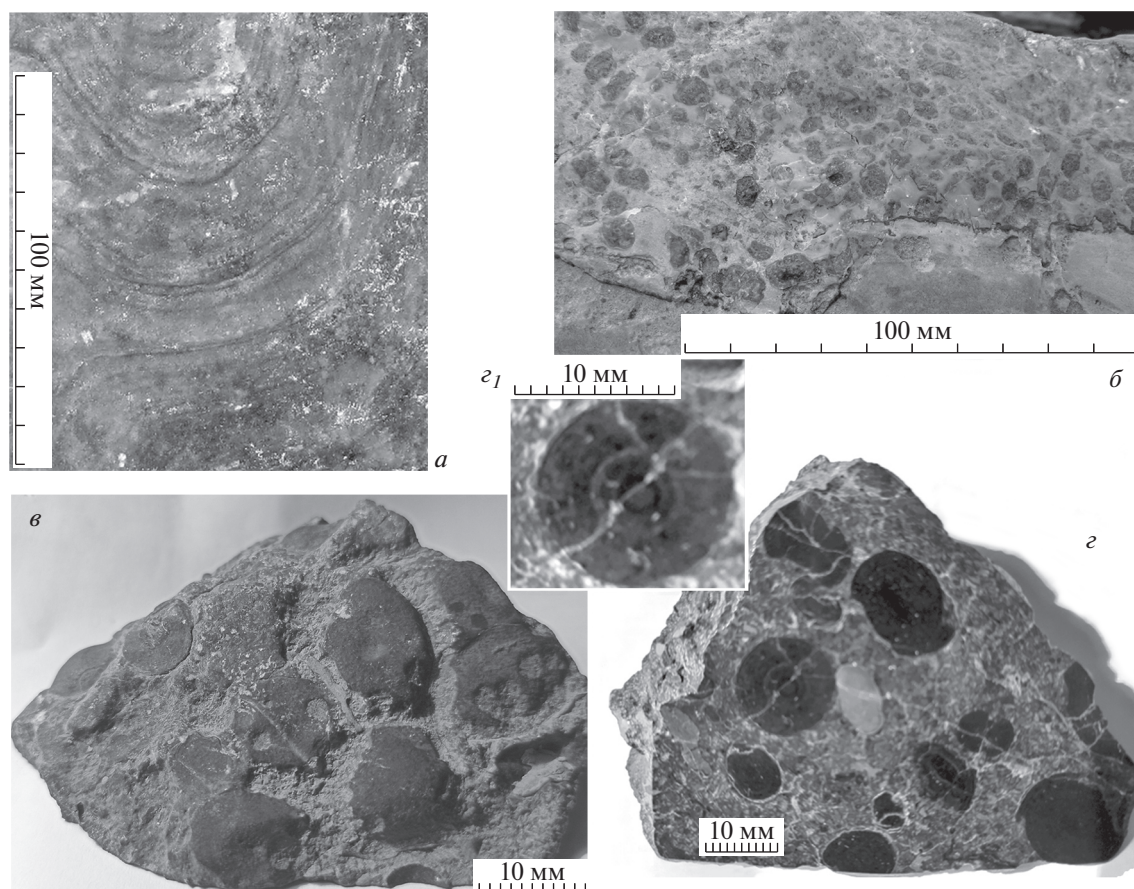
Отложения дальнетайгинской серии согласно перекрываются жуинской серией, включающей в себя никольскую и ченчинскую свиты. Первая сложена толщей чередования пестроцветных тонкослоистых песчаников, алевролитов и мергелей с редкими прослоями известняков, мощность от 120 до 360 м (Чумаков и др., 2013). Вверх по разрезу она постепенно сменяется строматолитовыми известняками ченчинской свиты, в которой установлены реликты хроококковых и гормогониевых строматолитообразующих сообществ цианобактерий, а также проблематичные остатки эвкариотных микроорганизмов пертататакового типа (Литвинова, Сергеев, 2018; Litvinova, Sergeev,

**Рис. 1.** Стратиграфическое и географическое положение черных онколитов каланчевской свиты: *а* – сводный разрез венда Уринского поднятия, *б* – схема расположения Уринской антиклинали, *в* – геологическая карта Уринской антиклинали. Обозначения: 1 – диамиктиты; 2 – конгломераты; 3 – песчаники; 4 – алевролиты и аргиллиты; 5 – известняки; 6 – оолитовые известняки и доломиты; 7 – строматолитовые известняки и доломиты; 8 – доломиты; 9 – венчающий доломит (*cap dolomite*); 10 – мергели; 11 – местонахождения черных онколитов каланчевской свиты; 12 – стратиграфические несогласия; 13 – большепатомская свита; 14 – баракунская свита; 15 – каланчевская и уринская свиты; 16 – никольская свита; 17 – ченчинская свита; 18 – жербинская свита; 19 – тирбесская и тиновская свиты; 20 – нохтуйская свита; 21 – мачинская свита; 22 – юрские отложения; 23 – четвертичные отложения; 24 – силлы, дайки и главные разломы (по: Чумаков, 1959; Sergeev et al., 2011; Чумаков и др., 2013). Примечание: темный квадрат со стрелкой – район работ (*б*); обн. – обнажение (*в*).



км  
1.0  
0.5  
0





**Рис. 2.** Некоторые из биогенных текстур каланчевской свиты: *а* – строматолиты; *б* – пласт, включающий черные онколиты; *в*, *г* – черные онколиты соответственно в образце и в шлифовке, *г<sub>1</sub>* – круглый онколит с хорошо выраженным концентрическим строением, фрагмент *г*.

2019). Общая мощность ченчинской свиты на Уринском поднятии оценивается от 400–600 м на р. Лена (Стратиграфия..., 2005) до 800–1200 м в более южных районах (Melezhik et al., 2009).

Комплекс литологических и изотопно-геохронологических данных указывает на ранневендский возраст дальнетайгинской и жуинской серий Патомского комплекса (Чумаков и др., 2013), подтверждаемый палеонтологическими находками по ассоциации уринской микробиоты (Воробьева и др., 2008; Голубкова и др., 2010; Sergeev et al., 2011; Moczydlowska, Nagovitsin, 2012).

Завершает разрез трехверстная серия, сложенная преимущественно карбонатными отложениями с редкими прослоями терригенных пород (Дольник, 2000; Чумаков и др., 2013).

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы черных онколитов и вмещающих их пород отобраны автором в обнажениях каланчевской свиты, протянувшейся вдоль левого берега Лены, на расстоянии около 2.7 км от скалы Ка-

ланча. В темно-сером невыдержанном по простиранию пласте карбонатных пород мощностью до 0.8 м неравномерно рассеяны черные онколиты размером от 4–5 до 12 мм в диаметре (рис. 2, *б*, *в*). В разрезе они имеют овальную либо круглую форму (рис. 2, *г*); в некоторых из них, несмотря на густой черный цвет, достаточно хорошо просматривается концентрическое строение (рис. 2, *г<sub>1</sub>*). Пробы представляют собой механически выделенные фрагменты из разных частей онколитов и вмещающих их пород, размером около 5 × 5 мм. Выявление фоссилизированных организмов и биогенных ультрамикроструктур, а также определение их элементного химического состава проводилось на РЭМ модели TesScanMV-2300, снабженным энергодисперсной приставкой (микроанализатором) Cambridge Instrumente INCA-200; диаметр анализируемого участка – 1 мкм, чувствительность составляет 0.001%. Напыление свежего скола проб осуществлялось золотом, что позволило устанавливать количество углерода. Заметное повышение этого элемента на фоне вмещающей породы подтверждает биогенное происхождение исследуемого объекта (Litvinova, 2020).

Все образцы и изготовленные из них палеонтологические шлифы и пробы хранятся в Геологическом ин-те РАН, колл. № 1005/16.

### БИОГЕННЫЕ УЛЬТРАМИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРООСТАТКИ ОРГАНИЗМОВ В ЧЕРНЫХ ОНКОЛИТАХ И ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ

И в онколитах, и во вмещающих породах установлены фоссилизированные микроорганизмы, каждый из которых протестирован с помощью микроанализатора, что позволило подтвердить их биогенное происхождение. Сопоставление находок показало, что и в тех, и в других присутствуют остатки бактериальных пленок и коккоидных цианобактерий *Mucosocoides* sp., однако по количеству, степени сохранности и расположению они существенно различаются. Так, во вмещающей породе остатки бактериальных пленок размером от 20 до 40 мкм могут формировать микрослойки (рис. 3, а), либо скапливаться в группы из нескольких тесно соприкасающихся образований (рис. 3, б). Они имеют неопределенную облаковидную конфигурацию, плотное сложение (их толщина до 3 мкм); сморщенную, иногда бугристую поверхность (рис. 3, а, б). В онколитах обрывки бактериальных пленок преимущественно меньшего размера, более тонкие и гладкие (рис. 3, в). Относительно крупные среди них встречаются очень редко (рис. 3, з, д) и могут сопровождаться единичным маленьким (1.5 мкм в диаметре) биогенным образованием в форме правильного шарика (рис. 3, д, д<sub>1</sub>). Коккоидные цианобактерии *Mucosocoides* sp. (Schopf, 1968) установлены повсеместно. Во вмещающей породе они беспорядочно рассеяны в местах распространения бактериальных пленок, имеют округлую форму, плавные очертания и ровную поверхность (рис. 3, е). На их оболочке возможно обнаружить единичное биогенное образование (рис. 3, д<sub>1</sub>), по форме, гладкой поверхности и размеру идентичное вышеописанному “шарику” в онколитах (рис. 3, е<sub>1</sub>). Остатки деформированных оболочек коккоидных цианобактерий онколитах скапливаются в пределах небольшого участка пробы (рис. 3, ж). Их поверхность сплющена, покрыта вмятинами (рис. 3, ж<sub>1</sub>) или пустотами, с относительно ровными, запавшими внутрь краями (рис. 3, ж<sub>2</sub>); бактериальными пленками они не сопровождаются.

В онколитах выявлены и другие многочисленные биогенные ультрамикроструктуры, а также фоссилизированные остатки организмов:

1. Округлые однотипные образования размером около 20 мкм, хорошо выделяемые в породе, благодаря оконтуривающему их полюму пространству шириной около 1–2 мкм (рис. 4, а), и сгуженности в пределах небольшого участка пробы (рис. 4, б). С помощью микроанализатора в них

фиксируется повышенное, по сравнению с вмещающей породой, количество углерода и присутствие биофильных микроэлементов, обычных для ископаемых микроорганизмов (Литвинова, 2019). В пределах участков скопления этих образований встречаются круглые пустоты размером 8–10 мкм (рис. 4, а).

2. Остатки мелких полых перекристаллизованных трубчатых образований с круглым поперечным сечением диаметром от 0.8 до 2.1 мкм, длиной до 10 мкм. Формируют либо небольшие группы из двух–трех организмов (рис. 4, в), либо вкрапленники неопределенной формы (рис. 4, з). И те, и другие отделены от окружающего их карбонатного материала полым пространством. При увеличении фрагментов вкрапленника видно, что он практически полностью сложен остатками тесно соприкасающихся полых несегментированных частично сплюснутых трубчатых образований (рис. 4, з<sub>1</sub>–з<sub>3</sub>). Все они слегка наклонены примерно в одном направлении, и заметно расширяются в сторону открытого окончания. Вкрапленники приурочены к центральной части онколита, группы из двух–трех организмов – к его периферии.

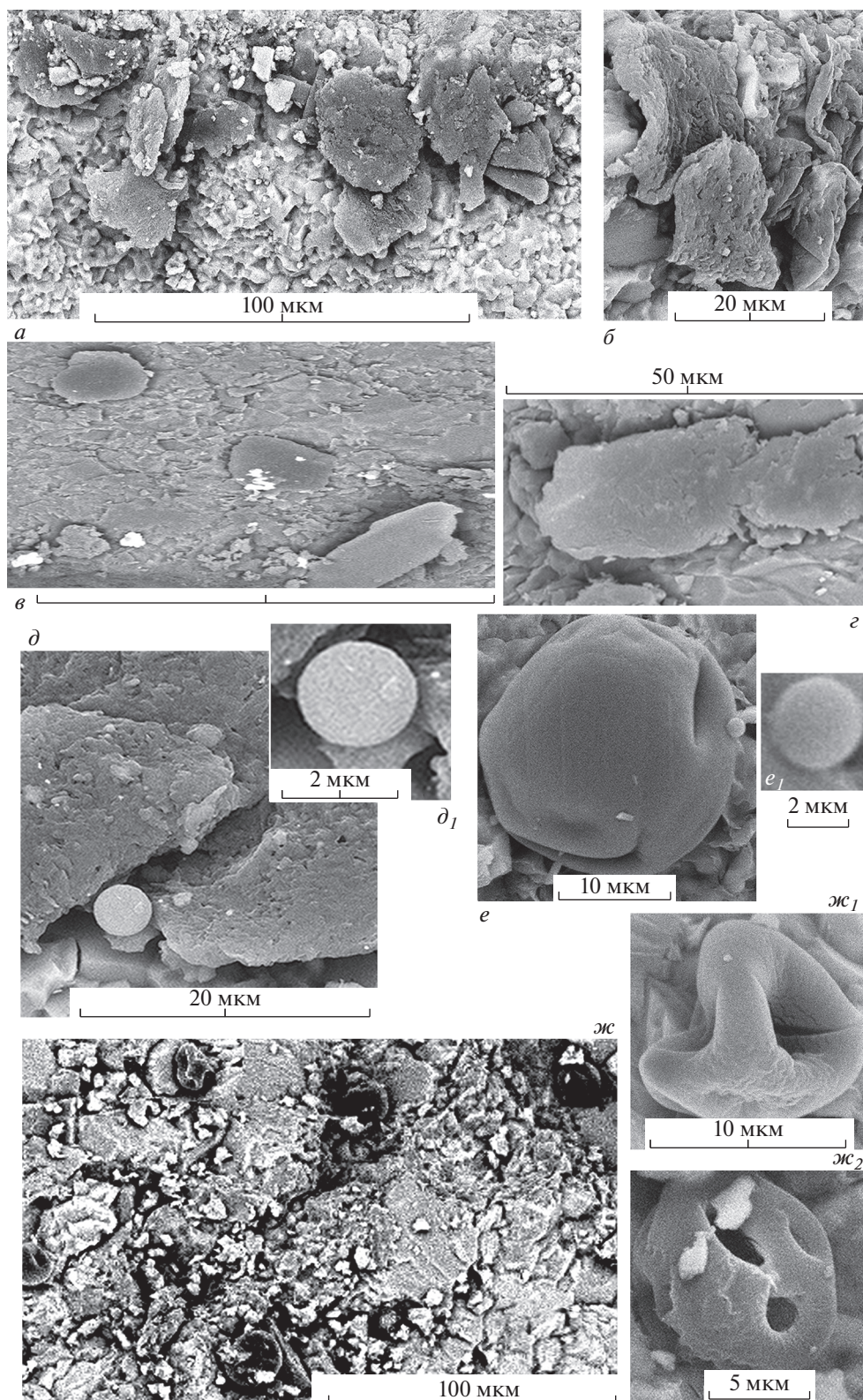
3. Остатки относительно крупных (2 × 30 мкм) перекристаллизованных нитчатых микрофоссилий (рис. 4, д), количество которых возрастает к периферической части онколита.

Во вмещающих породах какие-либо нитевидные формы биогенных образований отсутствуют, за исключением единственного обрывка бактериальной пленки, в пределах которого отчетливо проступают пучки нитей (рис. 4, е, е<sub>1</sub>).

Практически все минеральные частицы в черных онколитах имеют окатанные, округлые очертания (рис. 4, ж), формируя подчас плотные ультраонколиты (рис. 4, ж<sub>1</sub>). На поверхности некоторых из них могут возникать трубчатые формы цианобактерий. Они либо погружены в спрессованную карбонатную массу ультраонколита (рис. 4, ж<sub>2</sub>), либо располагаются на его поверхности, тесно соприкасаясь с ним боковой стенкой (рис. 4, ж<sub>3</sub>). Перекристаллизованные остатки нитчатых микрофоссилий (рис. 4, ж<sub>4</sub>) также формируют округлые структуры. В периферийной части онколита вкрапленники с трубчатыми цианобактериями не установлены, лишь небольшие группы из двух–четырех экз. Остатки нитевидных образований выравнивают поверхность, вписываясь в общую тенденцию закругленности форм, присущих окатанным минеральным образованиям (рис. 4, ж<sub>4</sub>), в целом чрезвычайно распространенным в изученных онколитах.

### ОБСУЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛА

Анализ остатков биогенных образований, установленных в ходе работы, показывает, что и во



**Рис. 3.** Сопоставление биогенных ультрамикроструктур в черных онколитах (онк) и во вмещающих породах (вп): *а–д* – бактериальные пленки: *а, б* – вп; *в–д* – онк, возможно, колонии *Eoentophysalis*; *д<sub>1</sub>* – “шарик” в пределах бактериальной пленки, фрагмент *д*; *е, ж* – коккоидные цианобактерии *Mucosocoides* sp. либо их оболочки: *е<sub>1</sub>* – “шарик” на поверхности цианобактерии (вп); *ж* – скопление коккоидных оболочек цианобактерий *Mucosocoides* (онк), *ж<sub>1</sub>, ж<sub>2</sub>* – деформированные коккоидные оболочки, фрагмент фиг. *ж* (онк).

вмещающих породах, и в онколитах находились микрофоссилии, однако их количество, состав и распределение по площади существенно различались. Некоторые из организмов, характерных в целом для отложений тиновской свиты, не выявлены в онколитах; другие, напротив, приурочены исключительно к этим образованиям. Так, коккоидные микрофоссилии *Мухососсоидес* sp., известные из отложений рифея и венда (Микрофоссилии ..., 1989), характерны преимущественно для вмещающих пород. Широкое распространение *Мухососсоидес* sp. в породе свидетельствует об активном гидродинамическом режиме, существовавшем в вендском бассейне в каланчевское время (Колосов, 1975).

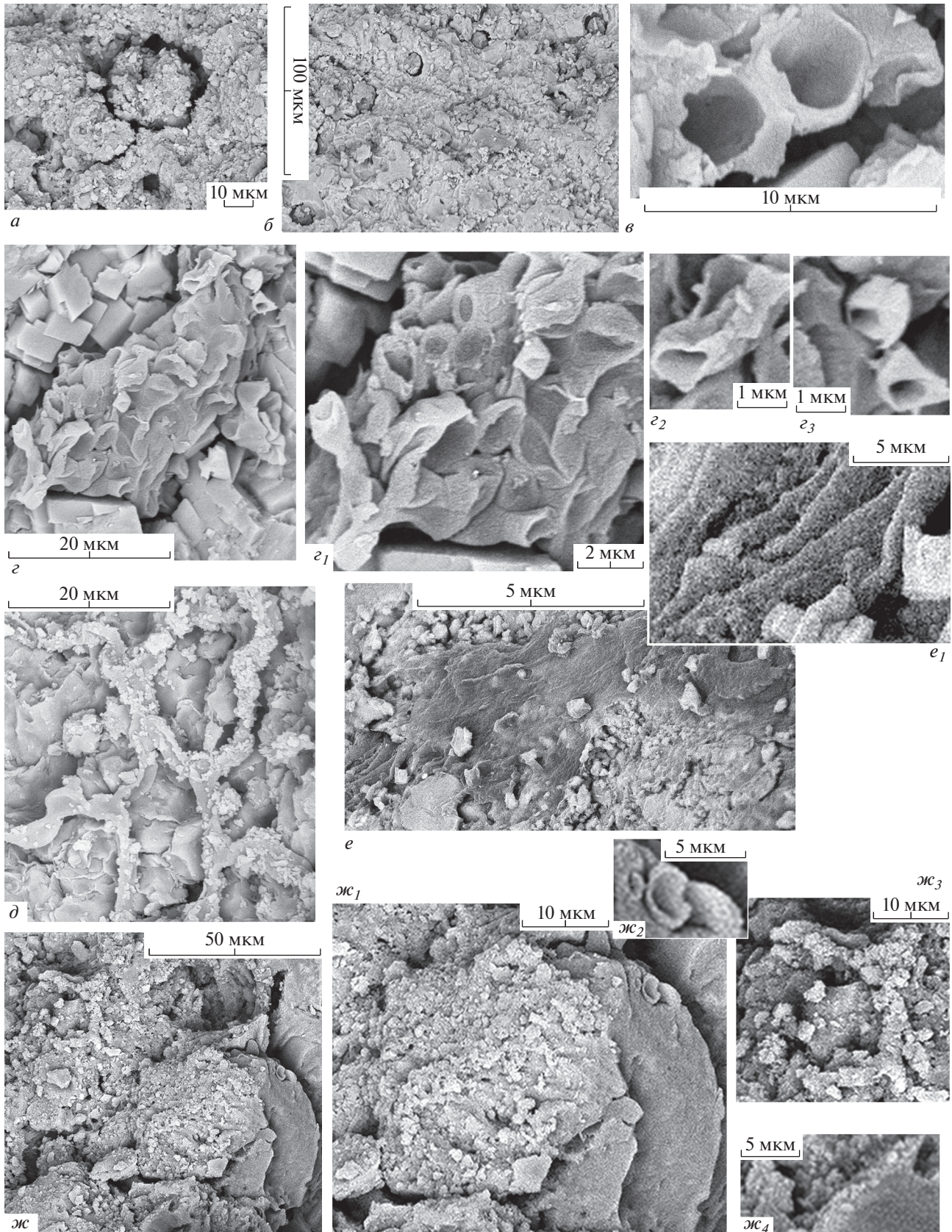
Несколько иная картина наблюдается в онколитах, где эти же микрофоссилии сгружены (рис. 3, ж) и деформированы значительно сильнее, чем во вмещающих породах (рис. 3, з, и), как это видно при большем увеличении. Трудно предположить в данном случае их прижизненное скопление ввиду полного отсутствия, в местах распространения коккоидных микрофоссилий, обрывков бактериальных пленок. На это же указывают и соответствующие им по размерам и форме карбонатно-органогенные образования (рис. 4, а, б), которые могли сформироваться только вокруг этих коккоидных микрофоссилий, поскольку какие-либо другие подобные им округлые организмы в исследованных пробах отсутствуют. Биогенная природа этих образований подтверждается повышенным количеством углерода. Большинство из них посмертно подхватывалось перекатывающимся минеральным стяжением либо прилипало к нему, находясь во взвешенном состоянии. В результате движения онколита, эти микрофоссилии были не только смяты и побиты, но и повреждены до дыр, впоследствии в результате усыхания их края плавно деформировались вовнутрь (рис. 3, и). Собираясь механическим путем, они покрывались слоем ила и запечатывались в карбонатном цементе. Оконтуривающая полость вокруг этих образований возникла в результате того, что процесс обезвоживания биогенного материала происходил быстрее, чем вмещающего их карбонатного ила. Высыхая, часть остатков коккоидных микрофоссилий деформировалась, уменьшалась в объеме, некоторые из них вывалились, оставляя полые круглые отверстия. Подобные пустоты не могли появиться в результате выпадения аксессуарных минералов, поскольку они отсутствуют в исследованных породах.

Вероятно, образование округлых органогенно-осадочных структур (рис. 4, а) происходило поэтапно. 1. Посмертное обливание поверхности покрытых слизью коккоидных микрофоссилий илом, что могло происходить и во взвешенном состоянии этих частиц, приводя к их утяжелению и погружению. 2. Включение их в более крупные

онколиты. Как сжатые и поврежденные, так и заключенные в минеральный чехол остатки организмов в процессе передвижения онколита захватывались совместно с осадочным материалом. 3. Утрамбовывание карбонатного материала вокруг остатков организмов и формирование плотных стяжений. В то время, как часть более тяжелых минеральных зерен периодически осыпалась, биогенный материал концентрировался, переносился и распределялся в матрице онколита, в зависимости от своих физических характеристик (силы тяжести, удельного веса и т.д.) и особенностей гидродинамического воздействия на процесс в целом. Благодаря такой дифференциации, осуществлялась своеобразная селекция: в пределах небольшого участка онколита скапливались либо клеточные стенки (рис. 3, ж), либо округлые стяжения (рис. 4, б). Это предположение подтверждается тем, что подобные органогенно-осадочные образования не установлены во вмещающих породах, а остатки коккоидных микрофоссилий *Мухососсоидес* sp. рассеяны по площади и сопровождаются обрывками бактериальных пленок, не наблюдаемых рядом с такими же организмами в онколитах.

Нитевидные цианобактерии, представленные в онколите двумя разновидностями — полыми трубчатыми (рис. 4, в, з) и перекристаллизованными относительно крупными нитчатыми образованиями (рис. 4, д<sub>1</sub>) — существовали только в пределах карбонатного стяжения. По-видимому, эти фотосинтезирующие микроорганизмы поселялись на его освещенной стороне, постепенно осваивая всю поверхность онколита и покрывая его слизью. В процессе роста онколита и перекачивания по дну будущие бактериальные пленки истончались, их поверхность сглаживалась, и при последующем налипании осадочного материала пленки спрессовывались (рис. 4, д). Этим и объясняются их небольшое количество в онколите и гладкая окатанная поверхность. Литификация осадка приводила к полному высыханию слизи, при этом удельная концентрация углерода возрастала. Таким образом, организмы принимали активное участие в построении структуры онколита, дальнейшие процессы преобразования породы с их посмертным участием приводили к формированию концентрических черных слоев (рис. 2, з<sub>1</sub>) с высоким содержанием углерода и к перекристаллизации остатков нитчатых микрофоссилий.

Скопления многочисленных обрывков бактериальных пленок и построение ими отдельных слоев во вмещающих породах являются свидетельством существования цианобактерий и в них. Однако этим организмам не удалось стать полноценными строителями рифов, так широко распространенных в более поздних отложениях ченчинской свиты, но элементы строматолитовой текстуры указывают на подобные попытки (рис. 2, а).





Отдельные коккоидные шаровидные образования размером менее 2 мкм повсеместно обнаруживались на чехлах других микрофоссилий либо в их слизистой оболочке, не создавая колоний (рис. 3, *e<sub>1</sub>*, *ж<sub>1</sub>*). Такое окружение обеспечивало им благоприятное существование, играя не только роль защиты и амортизатора при движении в водном потоке, но и своего рода холодильника с запасом влаги, органического углерода и микроэлементов, необходимых для их жизнедеятельности. Очевидно, что эти бактерии тем или иным образом взаимодействовали с другими организмами — к примеру, имели симбиотические отношения либо паразитировали на них.

Тесно расположенные трубчатые образования напоминают трихомы одного из родов микрофоссилий — *Eomicrococleus* либо *Polytrichoides Negmān* (Герман, 1974). Некоторые исследователи рассматривают подобные организмы как остатки гормогониевых цианобактерий типа *Micrococleus*, *Schizothrix* (Герман, 1974; Horodyski, 1980). Эти цианофиты могли занимать свободное, еще не плотно спрессованное место в карбонатной массе онколита. Если пространство, освещение и прочие условия существования на данный момент позволяли, выростали колонии, наблюдаемые ныне в виде вкрапленников. Их распространение преимущественно во внутренней части онколитов позволяет предположить, что первоначально именно на такую плавающую колонию микроорганизмов осаждались минеральные пылинки и органогенно-биогенные новообразования, способствуя ее погружению. Перекатываясь по дну, они обрастали крупными нитевидными микрофоссилиями (рис. 4, *д*) и внеклеточным полимерным веществом — гликокаликсом (слизью). Размножение этих фотосинтезирующих микроорганизмов первоначально происходило на освещенной стороне онколита, а в результате его движения колония перемещалась и разрасталась, опоясывая слизью всю его поверхность. Липкий онколит поневоле собирал и прочий, иногда уже отмерший биоогенный материал, и взвешенный, и осажженный. Как только сообщество организмов погибало под очередным осадочным чехлом, наиболее жизнеспособные особи выбирались на его поверхность, размножались и вновь покрывали его слизью. Нитчатые цианобактерии — одни из самых сложно устроенных прокариот, их оптимальная форма и способность проскальзывать между частицами ила позволяют успешнее других организмов восстанавливать ци-

анобактериальную колонию. Этот процесс был неоднократно продемонстрирован при экспериментальных исследованиях (Орлеанский и др., 2000; Сумина, 2007 и др.), имитирующих построение строматолита и возникновения в нем слоистости за счет чередования минерального и биоогенного материала. Он также подтвердился при изучении строматолитов с ленточной микроструктурой (*Colonella laminata Komar*), построенных полностью нитчатыми цианобактериями. В их минеральном слое были выявлены как следы проскользнувших на поверхность нитей, так и отдельные остатки погибших организмов, не сумевших выбраться на поверхность (Литвинова, 2009). В онколитах обезвоженный гликокаликс (слизистая оболочка) нитчатых цианобактерий принял участие в формировании черных, насыщенных органическим углеродом, концентрических слоев. На это же указывает широкое развитие нитчатых микрофоссилий исключительно в пределах онколитов и полное отсутствие этих организмов во вмещающей породе. Обволакивая овальные минеральные составляющие слизи, колония выравнивала неровности поверхности онколита.

Аналогичные находки нитчатых перекристаллизованных микрофоссилий были обнаружены и в других онколитах каланчевской свиты (Колосов, Троегубова, 2016), что указывает на существование комфортных для их жизнедеятельности условий именно в этих образованиях. Некоторые исследователи не исключают того, что, по крайней мере, часть из них можно отнести к грибоподобным организмам (Колосов, Троегубова, 2016), однако доподлинно установить природу этих образований в настоящее время не представляется возможным.

Сообщества цианобактерий вырабатывают слизистую массу, обычно заметную на дне мелких водоемов. Бактериальная пленка с пучком нитчатых образований, установленная во вмещающих породах (рис. 4, *е*), могла возникнуть во время перекатывания по ней онколита, на поверхности которого развивались крупные нитчатые микрофоссилии. Впоследствии от гликокаликса остаются лишь обрывки бактериальной пленки, на одном из которых и сохранился отпечаток пучка нитчатых бактерий при возможном скольжении онколита по пленке. В то же время, подобная слизь, совместно с нитевидными цианобактериями, развивалась и на его поверхности, и в любой момент могла соскользнуть даже с плавающего онколита на дно. К таким предпо-

←  
**Рис. 4.** Биоогенные ультрамикроструктуры в черных онколитах: *а* — округлое образование и круглые пустоты, фрагмент *б*; *б* — размещение округлых образований на площади; *в* — остатки полых трубчатых микрофоссилий, поперечное сечение; *г* — вкрапленник с тесно соприкасающимися остатками организмов, *г<sub>1</sub>–г<sub>3</sub>* — фрагменты вкрапленника с остатками трубчатых микрофоссилий; *д* — перекристаллизованные нитчатые образования; *е* — пучки нитей и их отпечатки в пределах бактериальной пленки, *е<sub>1</sub>* — фрагмент *е*; *ж* — округлые минеральные составляющие онколита с нитевидными и трубчатыми образованиями: *ж<sub>1</sub>* — ультрамикронеонколит, фрагмент *ж*; *ж<sub>2</sub>*, *ж<sub>3</sub>* — остатки трубчатых микрофоссилий в пределах ультрамикронеонколита, фрагменты *ж*; *ж<sub>4</sub>* — остатки перекристаллизованной нитчатой микрофоссилии, фрагмент *ж*.

жениям приводит факт отсутствия нитчатых бактерий во вмещающих породах и, одновременно, их скопления в единственной, расположенной рядом с онколитом бактериальной пленке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, черные онколиты следует рассматривать как сложные органо-генно-осадочные образования. Они возникли в результате гидродинамических донных процессов, сопровождавшихся жизнедеятельностью преимущественно нитевидных цианобактерий двух разновидностей: относительно крупных нитчатых форм, развивавшихся на их поверхности, и мелких трубчатых образований, формирующих вкрапленники.

В результате движения по дну карбонатное стяжение или колония трубчатых организмов, наподобие снежного кома, облипала осадочным материалом, часть которого осыпалась. На поверхности органо-генно-осадочного образования развивались нитчатые цианобактерии, слизистая масса которых (гликокаликс) частично либо полностью обволакивала онколит. Выемки, возникающие в результате выпавших песчинок, вновь осваивали колонии трубчатых цианобактерий. За счет высокого содержания углерода в организмах и, особенно, в гликокаликсе, еще более концентрировавшемся при обезвоживании слизи, крупные нитевидные цианобактерии формировали концентрическую слоистость с высоким содержанием органического углерода. Последующее перемещение покрытого слизью онколита сопровождалось облипанием его поверхности карбонатным материалом, на которую вновь выбирались наиболее жизнеспособные трихомы и воссоздавали колонию. В результате обезвоживания и уплотнения осадка в процессе литификации возникали четкие, очень темные даже на фоне черного онколита, монолитные концентрические прослои. Разделяющие их минеральные слои также частично разбавлялись органо-генным материалом — колониями трубчатых цианобактерий и микроскопическими остатками прочих организмов. Слоистость онколитов носит более сложный и менее дифференцированный характер по сравнению со строматолитами, в которых минеральный слой практически не содержит остатков организмов. Преобладание округлых форм и выравнивание их усилиями организмов доминируют на каждом этапе роста онколита, что говорит о единстве биотических и абиотических процессов при его формировании.

Во вмещающей онколиты породе небольшое количество относительно равномерно рассеянного по площади биогенного материала (остатки коккоидных микрофоссилий и бактериальные пленки) придает ей темно-серую, несколько пятнистую окраску, иногда с элементами строматолитовой текстуры.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Геологического ин-та РАН “Периодизация протерозоя и роль глобальных изменений среды и климата в эволюции докембрийской биосферы” (FMMG-2023-0004).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьева Н.Г., Сергеев В.Н., Чумаков Н.М.* Новые находки ранневендских микрофоссилий в уринской свите: пересмотр возраста патомского комплекса средней Сибири // Докл. Акад. наук. 2008. Т. 419. № 6. С. 782–787.
- Герман Т.И.* Находки массовых скоплений трихомов в рифее // Микрофоссилии протерозоя и раннего палеозоя СССР. Л.: Наука, 1974. С. 6–10.
- Головёнок В.К.* Докембрийские кремневые конкреции: морфология, генезис, значение для познания древнего органического мира // Конкреции докембрия. Сб. науч. трудов. Л.: Наука, 1989. С. 94–102.
- Голубкова Е.Ю., Раевская Е.Г., Кузнецов А.Б.* Нижневендские комплексы микрофоссилий Восточной Сибири в решении стратиграфических проблем региона // Стратигр. Геол. корреляция. 2010. Т. 18. № 4. С. 3–27.
- Давыдов Ю.В.* Рифейские карбонатные отложения юго-востока Сибирской платформы и ее обрамления (состав и происхождение). Новосибирск: Наука, 1975. 107 с.
- Дольник Т.А.* Строматолиты и микрофитолиты юга Сибирской платформы. Новосибирск: СО РАН, 2000. 319 с.
- Журавлева З.А.* Онколиты и катаграфии рифея и нижнего кембрия Сибири и их стратиграфическое значение. М.: Наука, 1964. 75с. (Тр. Геол. ин-та АН СССР. Вып. 114).
- Колосов П.Н.* Стратиграфия верхнего докембрия юга Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 155 с.
- Колосов П.Н.* Древние нефтегазоносные толщи юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1977. 90 с.
- Колосов П.Н.* Фациально-генетические типы органо-генных карбонатных пород и потенциальные коллекторы нефти и газа в каланчевской свите неопротерозоя Предпатомской нефтегазоносной области // Отечеств. геол. 2010. № 6. С. 49–56.
- Колосов П.Н.* Новые микроорганизмы из венда (эдиакария) Березовского прогиба (юг Сибирской платформы) // Палеонтол. журн. 2016. № 6. С. 11–18.
- Колосов П.Н., Рожин С.С.* Биохемогенные микрофитолиты неопротерозоя среднего течения реки Лены // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та. 2020. № 4. С. 11–22.
- Колосов П.Н., Троегубова И.Н.* Онколитоподобные образования в каланчевской свите неопротерозоя северо-восточной окраины Патомского нагорья: ультрамикроструктуры и органические остатки // Отечеств. геол. 2016. № 4. С. 29–34.
- Королюк И.К.* Строматолиты нижнего кембрия и протерозоя Иркутского амфитеатра // Тр. ИГиРГИ АН СССР. 1960. Т. 1. С. 112–161.
- Литвинова Т.В.* Новые данные по строению и составу строматолитовых построек (С. Прианбарье) // Литол. и полезн. ископ. 2009. № 4. С. 428–437.

- Литвинова Т.В.* Биогенные ультрамикроструктуры, их происхождение и роль цианобактерий в образовании строматолитов // Современная микропалеонтология. Сб. трудов XVI Всеросс. микропалеонтол. совещ. Калининград, 2015. С. 444–453.
- Литвинова Т.В.* К вопросу о роли микроорганизмов в формировании структурно-текстурных особенностей строматолитов // *Lethaea rossica*. Росс. палеобот. журн. 2018. Т. 16. С. 1–16.
- Литвинова Т.В.* Особенности минерализации цианобактериальных матов // Органическая минералогия. Матер. Всеросс. совещ. с международным участием. Пушино, 2019. С. 58.
- Литвинова Т.В., Сергеев В.Н.* Биогенные микрообразования в строматолитах Байкало-Патомского нагорья: результаты комплексного изучения // Литол. и полезн. ископ. 2018. № 2. С. 171–183.
- Маслов В.П.* Карбонатные проблематики округлой формы // Тр. Ин-та геол. наук АН СССР. Сер. геол. 1955. Вып. 155. № 66. С. 156–163.
- Микрофоссилии докембрия СССР. Л.: Наука, 1989. 187 с.
- Орлеанский В.К., Герасименко Л.М., Сумина Е.Л.* Лабораторные цианобактериальные маты и минеральные прослои // Водные экосистемы и организмы. Матер. конф. М.: МАКС Пресс, 2000. С. 56.
- Сергеев В.Н.* Окремненные микрофоссилии докембрия и кембрия Урала и Средней Азии. М.: Наука, 1992. 139 с.
- Стратиграфия нефтеносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Новосибирск: Гео, 2005. 428 с.
- Сумина Е.Л.* Экспериментальное изучение сообщества нитчатых цианобактерий и проблема изучения морфогенеза строматолитов. Автореф. ... канд. биол. наук. М., 2007. 26 с.
- Чумаков Н.М.* Стратиграфия и тектоника юго-западной части Вилуйской впадины // Тектоника СССР. Т. IV. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 345–460.
- Чумаков Н.М., Семихатов М.А., Сергеев В.Н.* Опорный разрез вендских отложений юга Сибирской платформы // Стратигр. Геол. корреляция. 2013. Т. 21. № 4. С. 26–51.
- Greensmith J.T.* Petrology of the Sedimentary Rocks. Oxford: George Allen & Unwin Ltd, 1988. 241 p.
- Hallam A.* Facies Interpretation and the Stratigraphic Record. San Francisco: W.H. Freeman and Co, 1981. 291 p.
- Horodyski R.J., Donaldson J.A.* Microfossils from the middle Proterozoic Dismal lakes group, Arctic Canada // Polar Res. 1980. V. 11. P. 125–159.
- Litvinova T.V.* Biogenic–abiogenic interactions in stromatolitic geosystems and their mineralization // Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems. Springer, 2016. P. 55–66. <http://avxhome.se/ebooks/3319249851.html>.
- Litvinova T.V.* Biogenic–abiogenic interactions in stromatolites: Study possibilities and outlooks // Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. Springer, 2020. P. 207–221.
- Litvinova T.V., Sergeev V.N.* Integrated study of microfossils in stromatolites of the Vendian Chench Formation, Central Siberia // Paleontol. J. 2019. V. 53. № 9. P. 977–982.
- Melezhik V.A., Pokrovsky B.G., Fallick A.E. et al.* Constraints on  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$  of Late Ediacaran seawater: insight from Siberian high-Sr limestones // J. Geol. Soc. London. 2009. V. 166. P. 183–191.
- Moczydlowska M., Nagovitsin K.* Ediacaran radiation of organic-walled microbiota recorded in the Ura Formation, Patom Uplift, East Siberia // Precamb. Res. 2012. V. 198–199. P. 1–24.
- Odum H.T.* Biochemical deposition of strontium // Publ. Inst. Mar. Sci. Univ. Texas. 1957. V. 4. № 2. P. 38–114.
- Pia J.* Die Erhaltung der fossilen Pflanzen. Thallophyta // Handbuch der Paläobotanik. München, Berlin, 1927. Bd 1. S. 31–136.
- Schopf J.W.* Microflora of the Bitter Springs Formation. Late Precambrian, Central Australia // Paleontology. 1968. V. 42. № 3. P. 651–688.
- Selley R.C.* An Introduction to Sedimentology. L.: Acad. Press, 1977. 408 p.
- Semikhatov M.A., Raaben M.E.* Proterozoic stromatolite taxonomy and biostratigraphy // Microbial Sediments. Berlin: Springer, 2000. P. 295–307.
- Sergeev V.N., Knoll A.H., Vorob'eva N.G.* Ediacaran microfossils from the Ura Formation, Baikal-Patom Uplift, Siberia: taxonomy and biostratigraphic significance // J. Paleontol. 2011. V. 85. № 5. P. 987–1011.
- Twenhofel W.H.* Pre-Cambrian and Carboniferous algal deposits // Amer. J. Sci. 1919. V. 48. № 4. P. 339–345.
- Wilson J.L.* Carbonate Facies in Geologic History. Heidelberg: Springer, 1975. 471 p.

## Fossil Organisms and Their Role in the Formation of Black Oncolites of Kalancha Formation of Vendian in the Baikal-Patom Highlands of Eastern Siberia

T. V. Litvinova

Geological Institute, RAS, Moscow, 119017 Russia

With the help of an electron microscope, the remains of microorganisms and biogenic ultramicrostructures were identified in the black oncolites of the Kalancha Formation and the rocks containing them. As a result of the research it was revealed that only in oncoliths as opposed to containing rocks are other remnants of microorganisms widely distributed: recrystallized filamentous cyanobacteria, fossilized colonies of tubular organisms, as well as individual coccoid formations of biogenic origin. Based on the new factual material, the features of the vital activity of organisms and their participation in the construction of the concentric structure of black oncoliths are analyzed, the features of the interaction of biogenic and abiogenic factors are established.

**Keywords:** oncolites, electron microscopy, microfossils, biogenic ultramicrostructures, ediacarium, Eastern Siberia