

УДК 562:551.72(470.11)

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ВЕРХНЕЭДИАКАРСКОЙ МИКРОБИОТЕ ЗУУН-АРЦ (ЗАВХАНСКИЙ ТЕРРЕЙН, ЗАПАДНАЯ МОНГОЛИЯ)

© 2024 г. П. Ю. Петров^{a,*}, Н. Г. Воробьева^{a,**}, А. Л. Рагозина^b

^aГеологический институт РАН, Москва, 119017 Россия

^bПалеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, Москва, 117647 Россия

*e-mail: petrov-geo-home@rambler.ru

**e-mail: keltma@mail.ru

Поступила в редакцию 18.12.2023 г.

После доработки 16.01.2024 г.

Принята к публикации 16.01.24 г.

Рассмотрены проблематики и микрофоссилии из верхнеэдиакарских отложений свиты Зуун-Арц террейна Завхан Западной Монголии. Впервые из этих отложений описаны разнообразные органические остатки, сохраненные в минерализованных и органико-глинистых тафоценозах. Многочисленные трубчатые микрофоссилии интерпретированы как остатки чехлов гигантских сульфид-окисляющих тиапловых бактерий *Candidatus Marithioploca arausae*. Выделены автохтонные и аллохтонные компоненты микробиот, проанализирована фациально-экологическая структура палеобассейна.

Ключевые слова: водоросли, микрофоссилии, проблематики, тафоценоз, эдиакарий, биостратиграфия

DOI: 10.31857/S0031031X24040014, EDN: SEIEFK

ВВЕДЕНИЕ

В геологической летописи эдиакария стратиграфический интервал продолжительностью от примерно 570 до 538.8 млн лет, между началом самой значительной в истории Земли отрицательной С-изотопной аномалии Шурам и подошвой кембрия, отмечен появлением позднеэдиакарской “фауны мягкотелых” и исчезновением раннеэдиакарских акантоморфных акритарх (Xiao et al., 2016; Xiao, Narbonne, 2020). Последние представляли собой большую группу быстро эволюционировавших организмов эукариотного фитопланктона в раннеэдиакарских бассейнах (Liu, Moszydłowska, 2019). В результате глобальных экосистемных перестроек в позднеэдиакарских (пост-Шурамских) тафоценозах стали повсеместно преобладать цианобактериальные сообщества, во многом сходные с сообществами до-криогения (Якшин, 2002; Arvestål, Willman, 2020; Willman, Slater, 2021; Ouyang et al., 2022; Воробьева, Петров, 2023). В самом конце эдиакарского периода, вследствие так называемого котлинского кризиса, в эпиплатформенных бассейнах Сибири отмечено появление специфической олиготаксонной органостенной ассоциации микрофоссилий, состоящей из

мат-формирующих цианобактериальных сообществ и грибоподобных организмов *Vendomyses*, очевидно, родственных более широко распространенному таксону *Vanavarataenia* (Воробьева, Петров, 2014).

Вместе с тем, в пределах обособленных и, вероятно, очень локальных экологических ниш, в позднеэдиакарское время появляются новые эволюционно продвинутое сообщества преимущественно бентосных, в т.ч. крупных, многоклеточных эукариот. Их макроскопические остатки известны как миаохенский тип ископаемых организмов, большая часть которых, как предполагается, биологически родственна кладе зеленых водорослей (Xiao et al., 2002; Ye et al., 2017). С другой стороны, среди сравнительно бедных цианобактериальных ассоциаций встречены одиночные представители многоклеточных микроводорослей (Ye et al., 2023), а также крупные трубчатые микрофоссилии неопределенной систематической принадлежности (Willman, Peel, 2022; Torper et al., 2022).

В структуре Завханского террейна Западной Монголии (рис. 1, а) вскрывается непрерывная глинисто-карбонатная последовательность отложений свиты Зуун-Арц, которая представляет

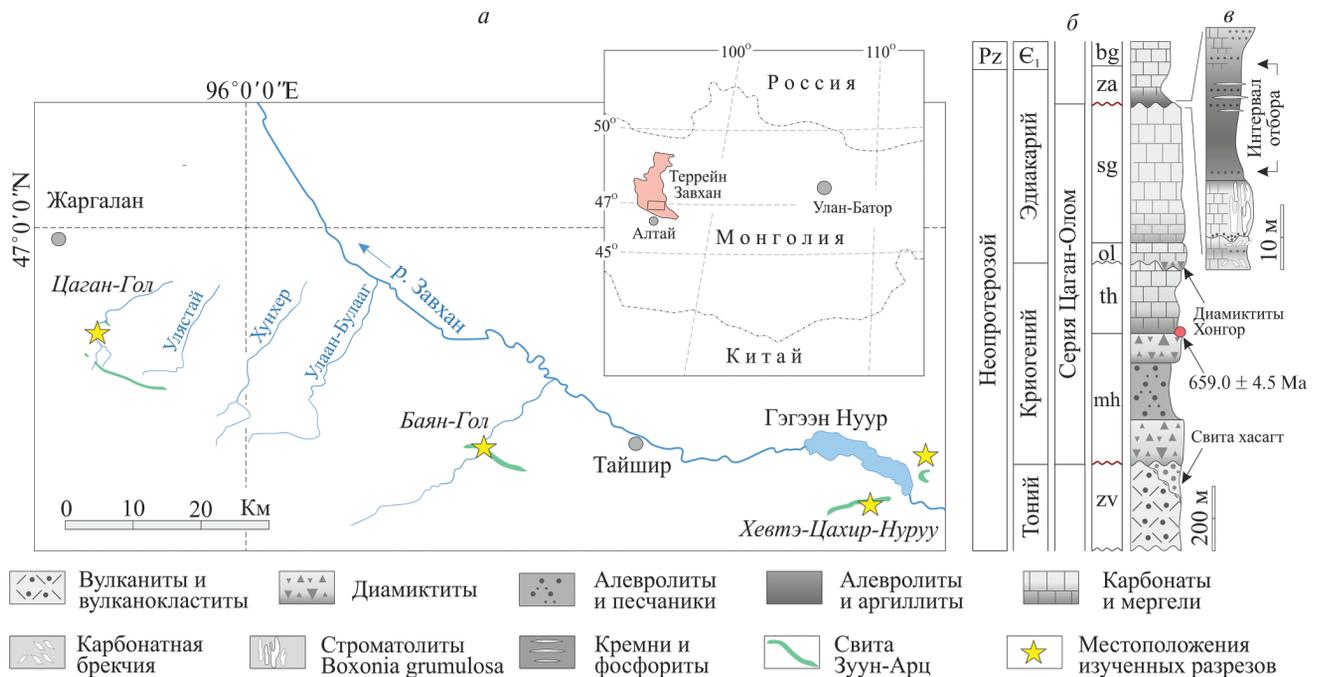


Рис. 1. Географическая схема района работ и местоположения изученных разрезов (а); стратиграфическая схема и последовательность неопротерозойских отложений Завханского террейна (б); разрез нижней части свиты Зуун-Арц в долине р. Цаган-Гол и интервал отбора изученных проб (в). Обозначения свит: zv – завхан, mh – майхан-уул, th – тайшир, ol – ол, sg – шургат, za – Зуун-Арц, bg – баянгол. Изотопная Re-Os датировка в основании свиты тайшир по: Rooney et al. (2015).

собой один из наиболее детально документированных переходных интервалов от самого позднего эдиакария к раннему кембрию (Khomentovsky, Gibsher, 1996; Smith et al., 2015; Topper et al., 2022). Из базальных слоев этой свиты описаны таксономически очень бедные цианобактериальные ассоциации микрофоссилий (Рагозина и др., 2022), среди которых доподлинно документированы лишь сильно разложенные дерновины нитчатых *Siphonophus*, формировавшие обильные цианобактериальные маты и сохранившиеся внутри раннедиагенетически окремненных или фосфатизированных глинистых и глинисто-карбонатных слоев. Нередко эти минерализованные микробиоты в разрезе тесно ассоциируют с поверхностями хардгранулов и горизонтами интракластиков. Наряду с *Siphonophus*, в этих отложениях присутствуют проблематичные микро- и макроостатки *Tasmanites*-, *Pulvinosphaeridium*-, *Tyrasothaenia*-, *Chuaria*- и *Beltanelliformis*-подобных форм (Serezhnikova et al., 2014; Рагозина и др., 2016; Рагозина et al., 2016). Все эти проблематики вряд ли могут рассматриваться в рамках какой-либо палеонтологической систематики, однако часть из них, несомненно, имеет органическую природу и требует дальнейшего изучения. Кроме того, на поверхностях аргиллитовых слоев в основании

разреза свиты были обнаружены лентовидные отпечатки вендотенид, сохраненные в виде тонких алюмосиликатных пленок, развитых по углеродистым компрессиям слоевищ неких водорослей. Эти макрофоссилии были диагностированы как два новых моновидовых рода – *Chinggiskhaania bifurcata* и *Zuunartsphyton delicatum*, отнесенных к неопределенной группе бентосных многоклеточных водорослей (Dornbos et al., 2016). Однако поскольку до настоящего времени палеонтологические описания этих макрофоссилий не представлены, данные таксоны не могут быть признаны валидными. Непосредственно выше по разрезу свиты Зуун-Арц, из известняковых прослоев описан новый род клоудинид *Zuunia chimidtsereni*, интерпретированный как неминерализованные трубки аннелид (Yang et al., 2020).

Предыдущие попытки выделить какие-либо определяемые остатки органостенных микрофоссилий из этих отложений не увенчались успехом. В настоящей статье впервые представлены микрофоссилии необычной объемной формы, выделенные из аргиллитовых слоев с помощью стандартной методики мацерации, а также изученные на поверхностях слоев и в шлифах, ориентированных параллельно слоистости. В статье также рассмотрена природа некоторых

проблематик, ранее описанных в ранге палеонтологических объектов.

ГЕОЛОГИЯ И СТРАТИГРАФИЯ РАЙОНА

Последовательность неметаморфизованных докембрийских отложений террейна Завхан, детально изученная с начала 1960-х гг. (Khomentovsky, Gibsher, 1996), в настоящее время стратиграфически существенно переосмыслена и наполнена новыми геологическими и геохимическими данными (Macdonald et al., 2009; Овчинникова и др., 2012; Bold et al., 2013, 2016a, 2016b, 2020; Кузнецов и др., 2014; Rooney et al., 2015; Smith et al., 2015). Эта последовательность с глубоким размывом залегает на вулканитах свиты завхан (802.1 ± 1.0 и 797.2 ± 1.1 млн лет), а также на вышележащих песчаниках свиты ха-сагт и включает в себя мощную литологически разнородную серию цаган-олом, а также вышележащую глинисто-карбонатную свиту Зуун-Арц (Bold et al., 2016b), охватывая стратиграфический интервал от криогения до терминальных горизонтов эдиакария (рис. 1, б). Однако внутри этой последовательности присутствуют стратиграфические перерывы, продолжительность которых остается неопределенной. В настоящее время принимается, что несогласие, а также горизонт диамиктитов Хонгор, коррелируемых с оледенением Марино (Macdonald et al., 2009), делит серию цаган-олом на две части: нижнюю (поздний криогений) и верхнюю (ранний эдиакарий). В кровле серия ограничена крупным региональным несогласием и перекрыта глинисто-карбонатными отложениями свиты Зуун-Арц (рис. 1, б). Эти отложения представляют собой терминальный горизонт эдиакария и в самой верхней части содержат кембрийскую $\delta^{13}\text{C}$ экскурсию “BACE” (541 млн лет) (Smith et al., 2015; Torper et al., 2022). Поскольку в известняках верхней части серии цаган-олом (свита шургат) отсутствуют следы глобальной отрицательной $\delta^{13}\text{C}$ аномалии Шурам, минимальный возраст серии ограничен 580 млн лет (Bold et al., 2016b). Таким образом, длительность перерыва в основании свиты Зуун-Арц по современным данным составляет более 30 млн лет.

Для всей серии цаган-олом, вмещающей как минимум два гляциогоризонта (Майхан-уул и Хонгор), существует только одна надежная Re-Os датировка по углеродистым известнякам в основании свиты тайшир, равная $659.0 \pm 3.9/4.5$ млн лет (Rooney et al., 2015). Эта датировка обосновывает криогениевый возраст для нижнего гляциогоризонта Майхан-Уул (рис. 1, б). Вышележащий

гляциогоризонт Хонгор коррелируется с терминальным горизонтом криогения “Марино” с возрастом 635 млн лет, а следовательно, вышележащие свиты ол и шургат представляют собой отложения нижнего эдиакария. Такую схему расчленения серии цаган-олом поддерживают современные Sr-Sr изотопные данные (Bold et al., 2016b). С другой стороны, микропалеонтологические исследования органических остатков в кремнях свиты шургат выявили весьма ограниченный набор таксонов, представленных обильными дерновинами *Siphonophycus* и редкими *Mucococcoides*, а также *Eoentophysalis belcherensis*? и специфическими трихомами *Salome hubeiensis* (Anderson et al., 2017). Наши исследования, проведенные по трем разобленным разрезам бассейна Завхан (рис. 1, а), полностью подтвердили полученные ранее результаты. Таким образом, в карбонатной толще верхней половины серии цаган-олом, мощностью более 300 м, присутствуют лишь таксономически очень бедные ассоциации микрофоссилий, характерные для отложений до-эдиакария. Вместе с тем, стоит отметить, что в наиболее детально изученных разрезах Доушаньтоу Южного Китая акантоморфные микробиоты появляются уже в нескольких метрах выше подошвы эдиакария в фациально близких обстановках карбонатного рампа (Liu, Moszyńska, 2019). Сказанное позволяет не исключать возможность отнесения всего разреза серии цаган-олом к криогению. В этом случае длительность перерыва в подошве свиты Зуун-Арц составит более 70 млн лет.

В изученных разрезах свита Зуун-Арц залегает на известняках свиты шургат по сильно расчлененной поверхности, очевидно, карстового происхождения, и в основании содержит латерально невыдержанные слои и линзы песчаников, представляющие собой переотложенные продукты предшествующей коры выветривания. На этих песчаниках, а также непосредственно на эродированных шургатских известняках залегает биостром строматолитов *Woxonia grumulosa*, который представляет собой важный стратиграфический маркер в самой верхней части докембрийского разреза Завхан (Khomentovsky, Gibsher, 1996). Как и у большинства относительно крупных строматолитовых построек протерозоя, у этого биострома, мощностью 15–20 м, вверх по разрезу наблюдается резко выраженная смена мелких столбчатых строматолитовых форм пластовыми формами, которые нередко слагают сравнительно крупные полого-рельефные купола, что, по мнению Н. Адачи с соавт. (Adachi et al., 2019), является признаком

углубления бассейна. В нашей интерпретации, рост биострома происходил на фоне обмеления в результате быстрого заполнения бассейнового пространства карбонатными осадками на ранней фазе трансгрессии и в условиях “карбонатной самоизоляции” этой части шельфа от потоков силикокластики, поступавших из прибрежных зон бассейна. Над биостромом *Voxonia* по резкой, но не эрозионной границе залегает пачка мощностью около 30 м зеленовато-серых аргиллитов с обособленными горизонтами кремней и фосфоритов (рис. 1, *в*). Эта пачка является вторым хорошо выдержанным маркирующим горизонтом в этой части разреза свиты (Khomentovsky, Gibsher, 1996). Последовательность этой пачки отражает затопление шельфа на второй фазе трансгрессии, где максимум затопления, очевидно, приходится на нижнюю треть ее разреза. Подъем уровня моря в начале этой фазы трансгрессии обусловил увеличение потока тонкозернистой силикокластики и угнетение карбонатогенерации во внутренних частях шельфа. Глубина шельфа во время максимума трансгрессии, вероятно, не выходила за пределы эвфотической зоны. Вся вышележащая и преимущественно карбонатная толща свиты Зуун-Арц представляет собой последовательность обмеления, которая накопилась в ходе нормальной морской регрессии. На протяжении этого времени формировались карбонатные платформы с преобладанием пелоид-ооидных литофаций, а проградационные зоны этих платформ были отмечены локальным развитием склоновых деформационных, подводно-оползневых и обломочно-потоковых отложений. Уже в нижней части этой карбонатной толщи появляются трубчатые фоссилии и первые примитивные ихнофоссилии, включающие в себя U-образные “норы” *Arenicolites* (Smith et al., 2015; Oji et al., 2018; Topper et al., 2022). В самой верхней части разреза свиты Зуун-Арц распространены наиболее мелководные фации ооидных отмелей, в отложениях которых встречены остатки протоконодонт *Protohertzina anabarica* и *P. unguiformis*, а также клоудинииды *Zuunia chimidtsereni* (Topper et al., 2022). Известняки свиты Зуун-Арц без признаков перерыва перекрыты трансгрессивными карбонатно-силикокластическими отложениями свиты баянгол нижнего кембрия (Smith et al., 2015; Topper et al., 2022). В целом, трансгрессия, наблюдаемая в основании свиты Зуун-Арц, очевидно, имела эвстатическую природу и явилась последней крупной глобальной трансгрессией в истории протерозоя, следы которой отмечены на многих палеоконтинентах того времени.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Представленный здесь материал происходит из естественных обнажений разрезов аргиллитовой пачки свиты Зуун-Арц, вскрытой в трех местоположениях: Хевтэ-Цахир-Нуруу (левый борт долины р. Завхан, 46°38'34.7"N 96°50'35.3"E), р. Баян-Гол (46°42'36.4"N 96°18'34.4"E) и р. Цаган-Гол (46°49'14.8"N 95°48'8.0"E) (рис. 1, *а*). Дополнительно были изучены разрезы свиты правого борта долины р. Завхан.

Лабораторная подготовка проб, выделение микрофоссилий и изготовление препаратов были выполнены по стандартной методике, описанной в нашей предыдущей публикации (Воробьева, Петров, 2020). При изучении мацерированных остатков и шлифов были использованы световые микроскопы Zeiss Axio Imager A1 и RME-5 с камерами Axio-CamMRC-5 и Canon EOS 300D и сканирующие электронные микроскопы EVO-50 Zeiss с микроанализатором INCA Oxford 350 (ПИН РАН) и TesScan MV-2300 SEM с микроанализатором INCA-200 (ГИН РАН). Органические остатки были также изучены на поверхностях аргиллитовых слоев и в петрографических шлифах аргиллитов, кремней и фосфоритов с использованием комбинированного освещения. Минеральный состав глинистых фракций, вмещающих фоссилии, был дополнительно изучен с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker. Материал хранится в Геологическом институте РАН (ГИН РАН, Москва), палеонтологическая коллекция № 14716.

МИКРОФОССИЛИИ И ПРОБЛЕМАТИКИ СВИТЫ ЗУУН-АРЦ

Среди минерализованных (главным образом, окремненных) структур и микроструктур в качестве палеонтологических объектов нами диагностированы только полые чехлы нитчатых микрофоссилий *Siphonophucus*, слагающие редкие уцелевшие фрагменты разложенных дерновин цианобактериальных матов (рис. 2, *а*). В них резко преобладают две формы: *S. kestron* и *S. typicum*, реже встречаются более крупные чехлы *S. solidum*, при этом в ассоциации отсутствуют какие-либо признаки сфероморфных микрофоссилий. Микрообъекты округлой формы и различного размера (от 5 до 300 мкм) представляют собой либо остатки мелких бактериальных колоний, напоминающие проблематики *Navifusa* или *Sprumasina* (рис. 2, *в*, *г*) и представляющие собой пелоидную фракцию осадка, либо фрагменты дезинтегрированных цианобактериальных матов.

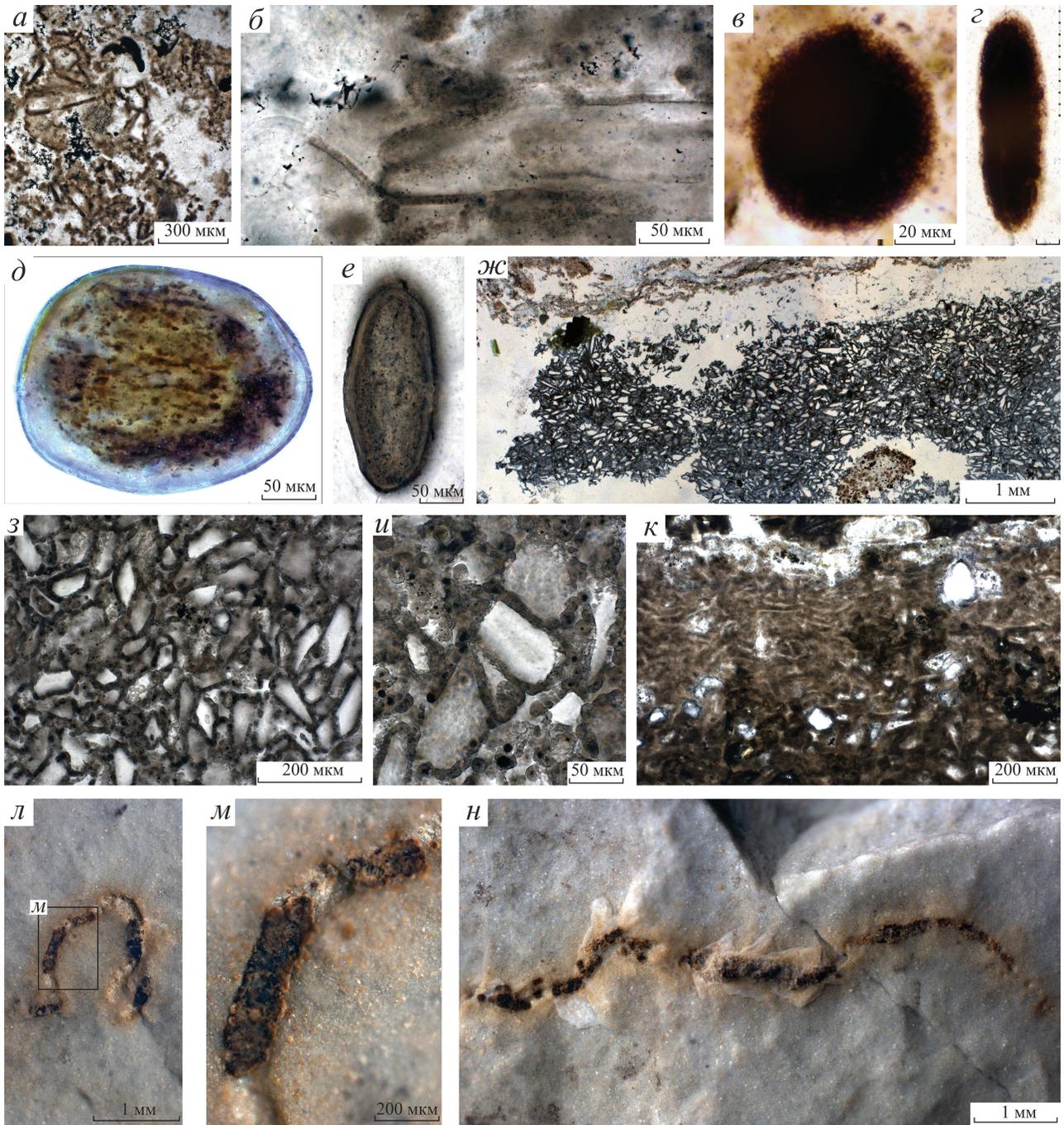


Рис. 2. Минерализованные органические остатки, псевдофоссилии и проблематика в кремнях свиты Зуун-Арц: *a, б* – одиночные полые чехлы *Siphonophucus* внутри сильно разложившегося цианобактериального мата с обилием органико-формирующих пелоидных частиц; *в, z* – *Spumasina*- и *Navifusa*-подобные органические пелоиды; *д, e* – поверхностные ооидные зерна с ядрами в виде округлых и эллипсоидальных фрагментов деструктурированных микробных матов; *ж, з* – мозаичные агрегаты плотно упакованных обломочных зерен кварца, имитирующие ячеистые структуры; *и* – кварцевые зерна, окаймленные оторочками сферолитов; *к* – прерывисто слоистые “червячковые” структуры с обилием пелоидных частиц; *л–н* – углеродистые компрессии нитчатых фоссилий на поверхностях аргиллитовых слоев.

Наиболее крупные такие фрагменты часто имеют очень тонкие (5–15 мкм) внешние концентрические рубашки и представляют собой поверхностные ооидные зерна (рис. 2, *д, e*).

Среди микроструктур особо выделяются необычные мозаичные агрегаты, имитирующие ячеистые структуры (рис. 2, *ж*) и ранее описанные как слоевища красных водорослей *Thallophycooides* sp. (Рагозина и др., 2016; Ragozina

et al., 2016). Подобные полигональные клеточные структуры, вероятно, принадлежащие протерозойским макроводорослям, известны из отложений свиты Gaoyuzhuang Сев. Китая с возрастом 1.56 млрд лет (Zhu et al., 2016). В некоторой степени сходные структуры из фосфоритов Центральной Индии (Vindhyan Supergroup) были интерпретированы как остатки древнейших (1.6 млрд лет) красных водорослей *Ramathallus lobatus* (Bengtson et al., 2017). Эти структуры также известны в эдиакарии Южного Китая и Сибири. В нашем случае псевдоячеистые структуры Зуун-Арц состоят из плотно упакованных угловатых обломочных зерен кварца и полевых шпатов размером 10–100 мкм, окаймленных оторочками сферолитов диаметром 8–12 мкм (рис. 2, з–и). Эти структуры не имеют ничего общего с псевдопаренхиматозной клеточной структурой, однако необычный состав и текстуры агрегатов предполагают участие биогенной составляющей в их происхождении. Отсутствие каких-либо признаков слоистости, плотная упаковка и заливообразные очертания зерен указывают на то, что первичная структура и текстура осадка впоследствии были значительно преобразованы. Вероятно, формирование наблюдаемых структур происходило внутри осадочного слоя в результате деятельности неких интерстициальных бактериальных сообществ, скорее, чем в результате пассивного улавливания и связывания зерен поверхностью мата. Метаболизм таких сообществ приводил к избирательному растворению поверхности зерен силикокластики и формированию сферолит-инкрустирующих оторочек между зернами. Почти полное растворение зерен исходного алеврит-песчаного осадка приводило к формированию прерывисто слоистых “червячковых” структур с обилием пеллоидных частиц (рис. 2, к). Все эти структуры в разрезе тяготеют к поверхностям хардграундов и тесно ассоциируют с остатками непрерывнослоистых цианобактериальных матов.

Помимо минерализованных форм сохранности, в районе Хевте-Цахир-Нуруу на поверхностях аргиллитовых слоев обнаружены крупные обособленные углеродистые компрессии сильно разложенных нитчатых фоссилий (рис. 2, л–н). Форма большинства остатков подчеркнута окислами железа, вероятно, образовавшимися при окислении пирита, рассеянного внутри компрессий. Ширина лент колеблется от 50 до 300 мкм, а видимая длина достигает 1 см. Четкие контуры и выдержанная ширина компрессий указывают на то, что они скорее являются

остатками индивидуальных организмов или колоний, чем обрывками цианобактериальных матов.

В долине р. Цаган-Гол, в аргиллитах небольшого обнажения (рис. 3, а) обнаружены многочисленные скопления нитчатых микрофоссилий, которые представляют собой специфическую объемную форму сохранности, не характерную для органостенных тафоценозов про- и эукариотных микробиот протерозоя. Эти формы не были “законсервированы” внутри син- и раннедиагенетических кремневых или фосфатных конкреций, и вместе с тем, не были сплюснены при последующем уплотнении глинистого осадка.

Органические остатки, наблюдаемые на поверхностях слоев и внутри шлифов толщиной 30–60 мкм, состоят из извилистых нитей красного или черного цвета, которые окружены оболочками с диффузной внешней границей (рис. 3, б, в). Ширина нитей в шлифах варьирует от 20 до 110 мкм, а ширина оболочек — от 35 до 275 мкм. Размерные характеристики черных и красных нитей очень незначительно, но статистически все же различаются между собой (рис. 4, а). Все нити изгибаются в трехмерном пространстве, но это пространство ограничено толщиной слоя не более 0.5 мм (рис. 3, г–л). Различаются два типа пространственной геометрии таких нитей: нити, которые “мандрируют” преимущественно в одной плоскости (синусоидальный тип) (рис. 3, г, е), и нити, которые “закручены” по спирали в трех плоскостях (геликоидальный тип) (рис. 3, и–л). В тафоценозе резко преобладают синусоидальные нити, лежащие в плоскости слоя. Нередко синусоида внезапно заканчивается округлым сечением (рис. 3, д), которое, очевидно, является сечением самой нити, резко изгибающейся под углом 90° по отношению к слою. Иногда в шлифах наблюдаются поперечные сечения сближенных групп нитей, ориентированных нормально к слоистости (рис. 3, з), а нити, синусоидально изгибающиеся в плоскости, перпендикулярной слою, в срезе образуют подобие четковидных структур (рис. 3, м). В единичных экземплярах среди скоплений гладких и протяженных нитей присутствуют более крупные (шириной до 150 мкм) отчетливо сегментированные тела (рис. 3, ж, н).

При HF-мацерации внешние оболочки нитей разрушаются и выделяются многочисленные объемные фрагменты нитей красного цвета, состоящие из углеродисто-кремнеземной субстанции, иногда с незначительной примесью гематита и вторичных Al-Mg-Fe-фторидов. Все

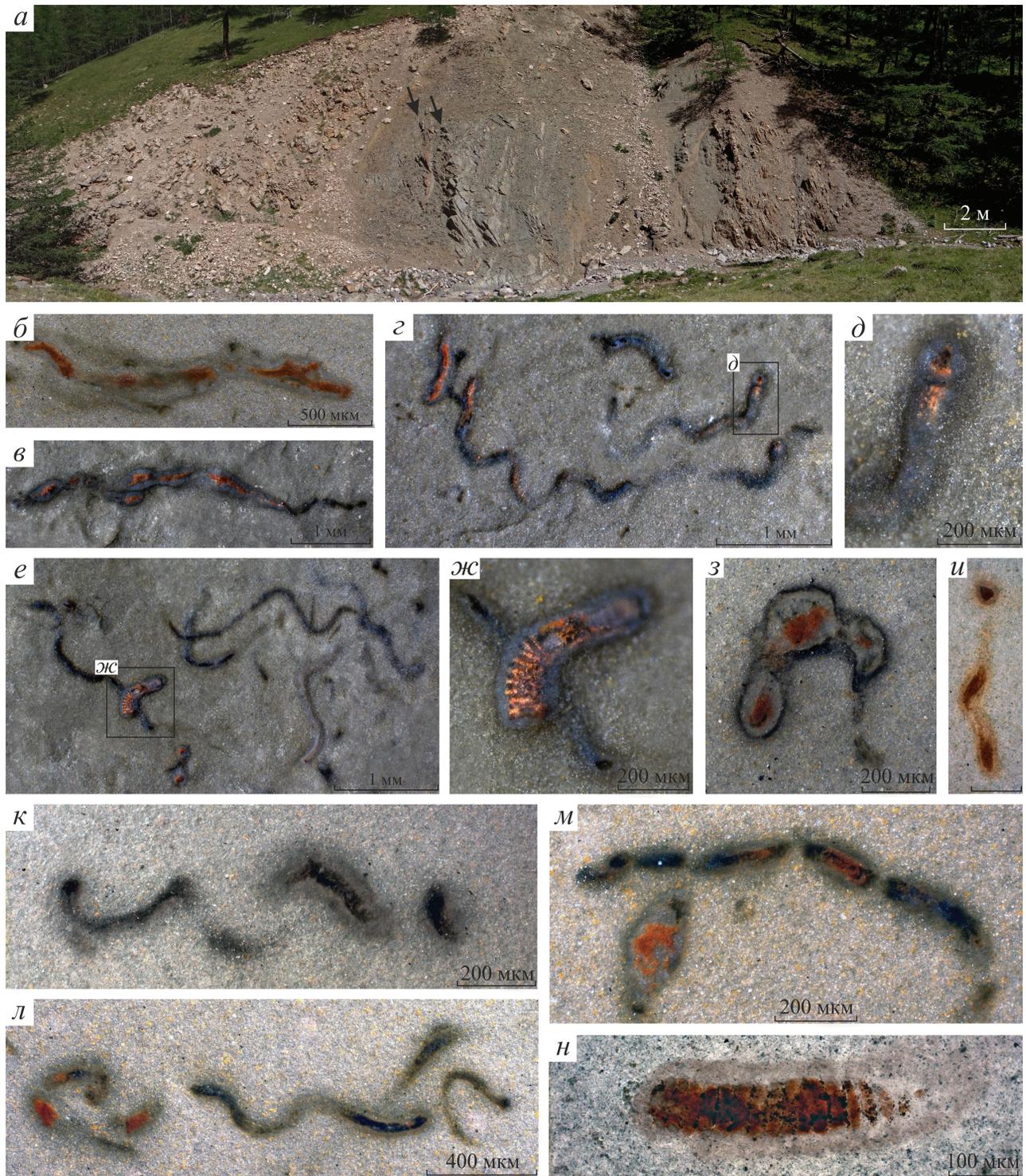


Рис. 3. Микрофоссилии в аргиллитах свиты Зуун-Арц: *a* – обнажение аргиллитов с одиночными горизонтами кремней и фосфоритов (показаны стрелками) в базальной части свиты Зуун-Арц, долина р. Цаган-Гол; *б–н* – нитчатые микрофоссилии: *б, з–н* – в петрографических шлифах строго параллельно слоистости; *в–ж* – на поверхности аргиллитовых слоев. Масштабная линейка на (*u*) равна 200 мкм.

эти остатки представляют собой изгибающиеся, иногда перекрученные трубки, заполненные минеральной субстанцией. Несмотря на плохую

сохранность, маскирующую детали строения, выделяются три морфологические группы таких трубок. Наиболее многочисленную группу

представляют одиночные трубки с однородной скульптурой поверхности (Форма 1, табл. I, фиг. 1, 2). Их диаметр варьирует от 30 до 110 мкм и остается постоянным на всем видимом протяжении трубки. Различие в 13% между гистограммами распределения толщины нитей в шлифах и диаметром трубок в препаратах обусловлен статистическим занижением измеренных значений случайных сечений трубок в шлифах (рис. 4, б). Толщина стенки трубок, иногда наблюдаемая в поперечном сечении в шлифах, вероятно, составляла всего 2–4 мкм (табл. I, фиг. 3). Вторая группа – парные, или “сдвоенные” трубки, также не обнаруживающие каких-либо упорядоченных скульптурных элементов поверхности (Форма 2, табл. I, фиг. 4–6). Пары трубок по всей длине плотно соприкасаются друг с другом или, возможно, они имели общую стенку в области соприкосновения (табл. I, фиг. 12). Третью немногочисленную группу составляют трубки с неявными признаками сегментации (Форма 3, табл. I, фиг. 7–9). Такая сегментация более отчетливо заметна в шлифах (табл. I, фиг. 10, 11).

Все нитевидные микрофоссилии имеют близкий между собой состав и зональное строение, наблюдаемое в шлифах (рис. 5, а, б). Трубки состоят из кремнезема ($\text{SiO}_2 > 90\%$) с небольшой (1–5%) примесью Fe_2O_3 (рис. 5, в). Внутри трубок нередко присутствуют скопления органического (углеродистого) вещества (рис. 5, б). Внешняя оболочка трубки содержит значительное количество железа (до 37% Fe_2O_3), которое находится в составе Fe-хлорита, возможно, бертьерина, и свободных окислов железа. По периферии внешней оболочки наблюдаются

сравнительно крупнокристаллические выделения аутигенного иллита, хорошо заметного в скрещенных николях (рис. 5, б). Глинистая фракция аргиллита, вмещающего микрофоссилии, состоит из Mg–Fe-хлорита и слюдистых минералов (рис. 5, г), где доля Fe_2O_3 не превышает 10%, хотя некоторые аргиллитовые слои содержат заметную примесь тонкодисперсного гематита. Таким образом, форма сохранности микрофоссилий в тафоценозе Цаган-Гол представлена кремневыми слепками по органическим остаткам, захороненным в приповерхностном слое донного ила. Формирование этих слепков на ранних стадиях диагенеза сопровождалось кристаллизацией аутигенных глинистых минералов и осаждением окисных форм железа преимущественно в узких зонах, окружавших слепки.

Помимо трубок, в мацерированных препаратах встречаются единичные крупные объемные микрофоссилии серповидных очертаний (табл. I, фиг. 13). Их ширина от центральной части к периферии постепенно уменьшается от 100–80 до 30 мкм. Сравнительно немногочисленную группу микрофоссилий представляют собой плотно закрученные спирали, отнесенные к виду *Obruchevelia ditissima* Schipitzyn et Yakschin (табл. I, фиг. 14–17). Диаметр спиралей варьирует от 80 до 120 мкм, что статистически заметно превышает диаметр описанных выше трубок, в т.ч. и их “сегментированных” разновидностей (рис. 4, б). По размерам этот вид разделяется на два подвида, которые различаются диаметром спирали при постоянном диаметре трубок (рис. 4, в).

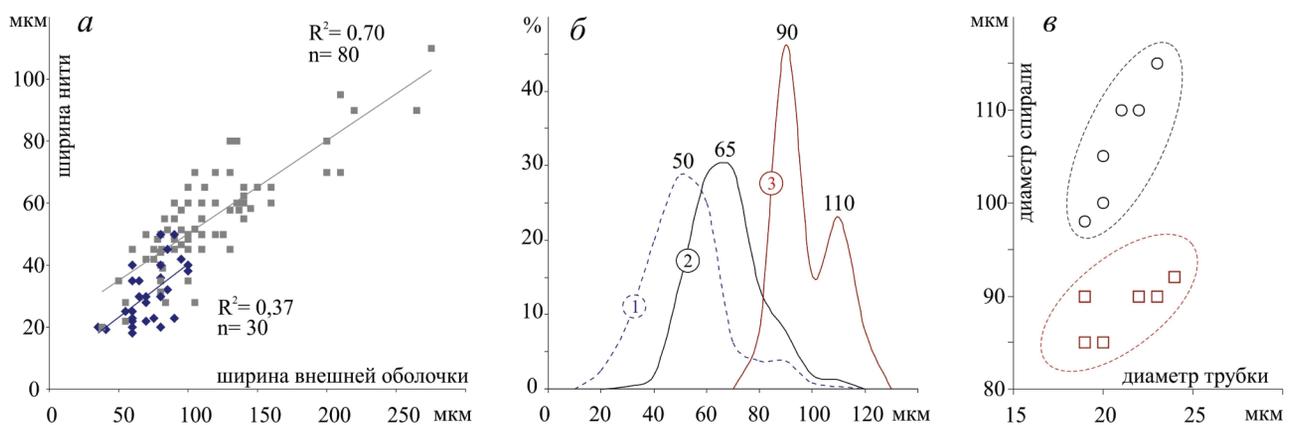


Рис. 4. Размеры микрофоссилий свиты Зуун-Арц: а – ширина нитей, наблюдаемая в шлифах ($n = 30$ – черные нити, $n = 80$ – красные нити); б – гистограммы распределения: 1 – ширина нитей в шлифах ($n = 30$), 2 – диаметр трубок в мацерированных препаратах ($n = 254$), 3 – диаметр спирали *Obruchevelia ditissima* ($n = 13$); в – соотношение диаметра трубки с диаметром спирали *O. ditissima*.

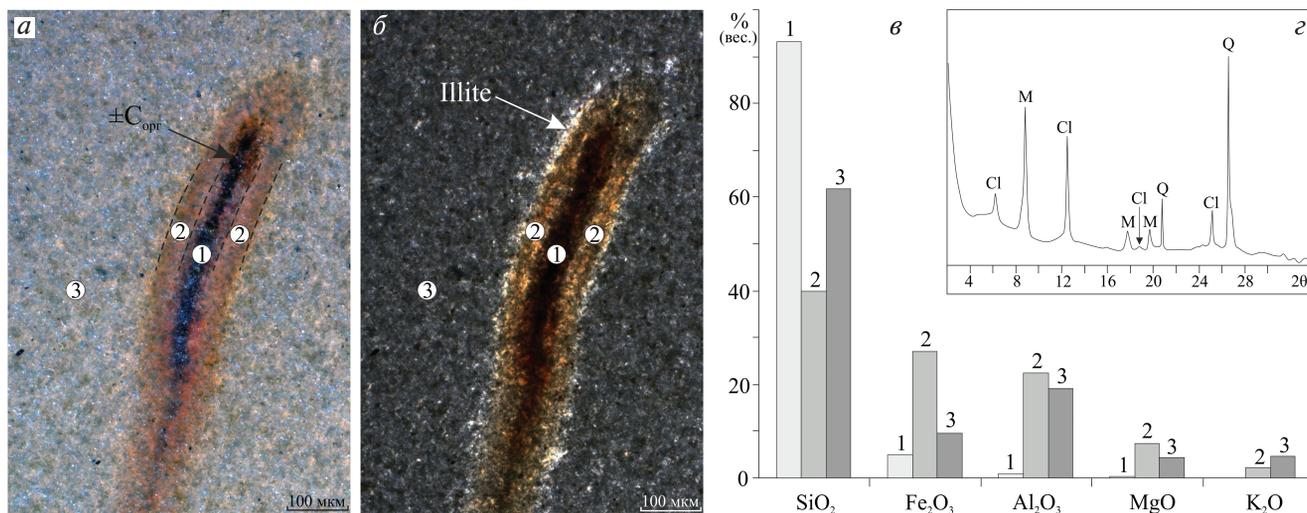


Рис. 5. Химический и минеральный состав нитевидных микрофоссилий и вмещающего аргиллита: *a, б* – фотографии нити в шлифе при комбинированном освещении (*a*) и в проходящем свете при скрещенных николях (*б*); *в* – средний химический состав нити (1), ее внешней оболочки (2) и вмещающего аргиллита (3) по данным микрозондового анализа без учета органического углерода; *г* – минеральный состав аргиллита по данным рентген-дифракционного анализа (ориентированный препарат, излучение CuK α): Cl – Fe-хлорит, M – иллит + обломочная слюда, Q – кварц.

В шлифах обнаружены единичные формы, которые не сохраняются при мацерации. Они включают в себя крупные и короткие сегментированные трубки, схожие с представителями рода *Pararenicola* Wang (табл. I, фиг. 18), трихомы с клетками удлиненно-цилиндрической формы высотой 12–35 мкм, аналогичные *Nochtuija prima* Yakschin (табл. I, фиг. 19), а также однорядные бусиноподобные нити, предположительно, *Norodyskia minor* Dong et al. (табл. I, фиг. 21). В шлифе также встречена крупная одиночная трубка, диагностированная как *Zuunia chimditsereni* Yang et al. (табл. I, фиг. 20).

ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОБИОТЫ ЗУУН-АРЦ И ПАЛЕОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МИКРОФОССИЛИЙ

Анализ ассоциаций микрофоссилий, захороненных в минерализованных тафоценозах (конкреции раннедиагенетических кремней и фосфоритов) свиты Зуун-Арц, показал резкое доминирование нитчатых мат-формирующих цианобактериальных сообществ, при отсутствии колоний бентосных коккоидных форм и сфероморфных акритарх. Судя по размерам, нитчатые микрофоссилии *Siphonophycus* представляли собой полые чехлы осцилляториевых и, возможно, носточковых цианобактерий.

В органико-глинистых тафоценозах (аргиллиты) сохраняются лишь редкие аллохтонные и сильно деградировавшие фрагменты,

предположительно, таких же цианобактериальных матов. Однако, наряду с ними, здесь присутствуют обильные крупные и разнообразные органические остатки, лишь небольшая часть которых относится к осцилляториевым цианобактериям *Obruchevella ditissima*, а доминирующей популяцией являются трубчатые микрофоссилии неопределенной биологической (филогенетической) принадлежности. Описанные выше трубки статистически заметно превышают размеры чехлов гормогониевых цианобактерий (30–120 мкм против 0.5–64 мкм, соответственно), но в целом значительно уступают по размерам трубчатым фоссилиям неопротерозоя, которые обычно интерпретируются как остатки многоклеточных водорослей или животных (Butterfield, 2004; Cunningham et al., 2015; Yang et al., 2020; Willman, Peel, 2022). По размерам и морфологии отдельно взятые фрагменты трубок из свиты Зуун-Арц близки к микрофоссилиям *Portfjeldia aestatis* Willman et Peel, которые описаны как остатки водорослей из отложений эдиакария Северной Гренландии. Вместе с тем, особенности изученного тафоценоза позволяют предложить иную интерпретацию.

Пространственное (трехмерное) распределение трубок, наблюдаемое внутри слоев, свидетельствует о захоронении организмов *in situ* в приповерхностном слое осадка, поскольку при аллохтонном захоронении остатки этих организмов были бы ориентированы строго вдоль отдельных микрослоев. С учетом значительного

коэффициента компактности глинистых илов, такой поверхностный слой осадка во время своего формирования мог достигать, по крайней мере, нескольких мм толщины. Поскольку значительная часть железа в этих слоях находится в окисной форме в составе синформационного гематита, наддонная водная толща бассейна Зуун-Арц была кислородсодержащей. С этим выводом согласуется присутствие позднеэдиакарских роющих билатерий, следы которых описаны из этих отложений (Oji et al., 2018), а также U-Мо-изотопные данные, указывающие на глобальное распространение оксигенизации шельфовых морей в позднем эдиакарии (Kendall et al., 2015). В этих условиях в бассейне Зуун-Арц богатые органикой слои донного ила представляли собой транзитные кислород-аноксигенные (H_2S-O_2) зоны. В современных обстановках такие зоны обычно населены сообществами так называемых “градиентных” организмов, среди которых особо выделяются сообщества тиобиоса (Заварзин, 2003). Они включают в себя специфическую группу гигантских серных (сульфид-окисляющих) бактерий, размеры которых достаточны для того, чтобы пересекать границу между двумя зонами и получать возможность метаболически окислять H_2S (Salman et al., 2013). Среди этих организмов в современных бассейнах широко распространены колониальные (политрихоминые) подвижные бактерии *Thioploca*, заключенные в прочный внешний чехол (Maier, Gallardo, 1984; Jørgensen, Gallardo, 1999; Kojima et al., 2003; Salman et al., 2011). В донных илах шельфа северного побережья Чили политрихоминые нити тиапловых бактерий *Candidatus Marithioploca araucae* (Gallardo et al., 2013) по размерам, “меандрирующим” очертаниям и распределению в осадке идентичны трубкам, наблюдаемым в свите Зуун-Арц. Для них характерно сочетание плавных “меандр”, лежащих в плоскости слоя, с резкими (под углом 90° к слою) изгибами трубок, что наблюдается на поверхности слоев и в шлифах (рис. 3, *г*, *д*, *и*). Очевидно, такая конфигурация была обусловлена существованием бактерий в условиях очень резкой кислород-аноксигенной границы, почти совпадающей с поверхностью раздела осадок-вода. Трихомы протыкали эту границу и, по образному выражению Г.А. Заварзина (2003), “торчали над поверхностью дна, как газон”. Некоторые трубки объединялись в слабозавитые и плотно прилегающие друг к другу пары. Возможно, поверхность чехла в области прилегания трубок была общей для обоих трихомов (табл. I, фиг. 12). Важно отметить, что в слоях, содержащих эти микрофоссилии,

отсутствуют агрегаты раннеэдиакарского пирита, обычно широко распространенного в стратиграфически смежных слоях, что предполагает заметное влияние позднеэдиакарского тиобиоса на геохимию и, прежде всего, на редокс-потенциал донных илов. Вероятно, процессы окисления в приповерхностном слое донного ила могли быть триггером избирательного осаждения ранних фаз кремнезема, что явилось причиной объемных форм сохранности микрофоссилий тафоценоза Цаган-Гол.

Недавно аналогичные “извивающиеся” нити были описаны из верхнего эдиакария Бразилии (около 563 млн лет) и также были интерпретированы как слепки сульфид-окисляющих бактерий (Becker-Kerber et al., 2021). Примечательно, что значения среднестатистического диаметра для одновозрастных бразильских и монгольских трубок совпадают между собой с удивительной точностью (68.8 мкм против 67.2 мкм соответственно).

Резко подчиненным автохтонным компонентом этого прокариот-образующего тафоценоза, очевидно, являлись эукариотные бентосные организмы, сохраненные в виде однорядных цепочек мелких разобщенных сфероидов, предположительно отнесенных к виду *Norodyskia minor* (табл. I, фиг. 21). Другие более крупные единичные септированные трубчатые формы (табл. I, фиг. 18), в т.ч. заметно компрессированные клаудиноподобные трубки *Zuunia chimidtsereni* (табл. I, фиг. 20), вероятно, представляли собой аллохтонный компонент тафоценоза, перенесенный течениями из более мелководных зон рампа. Таким образом, в фациально-палеоэкологической структуре бассейна Зуун-Арц на ранней трансгрессивной стадии его развития выделялись две крупные и контрастные зоны. Во внешней мелководной зоне были повсеместно распространены бентосные фототрофные, главным образом, осцилляториевые цианобактериальные сообщества и подчиненные таксономически бедные сообщества эдиакарских эукариот. Во внутренней, сравнительно глубоководной зоне бассейна, преобладали сообщества хемотрофных прокариот с угнетенной бентосной флорой и фауной. В этой структуре нет признаков присутствия как эукариотного, так и прокариотного фитопланктона, характерного для предшествующих бассейнов раннеэдиакарского возраста. Вероятно, подобный облик таких морских экосистем был характерен и для других палеобассейнов того времени, существовавших в преддверии эдиакарий–кембрийской “агрономической революции”.

ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Род *Horodyskia* Yochelson et Fedonkin, 2000

Horodyskia minor? Dong et al., 2008

Табл. I, фиг. 21

Horodyskia minor: Dong et al., 2008, с. 368–371, рис. 3; Zhang et al., 2023, рис. 2A, 2D.

Голотип – Virginia Polytechnic Institute Geosciences Museum, слайд 06JM-4; коорд. 143.8 × 15.8; катал. № VPIGM-4606; Южный Китай, восточная часть Гуйчжоу; верхний эдиакарий, свита Лючапо (*Liuchapo Fm*); Dong et al., 2008, рис. 3а.

Описание. Серия линейно расположенных сферических образований, разделенных промежутками и образующих цепочки наподобие бус. Нити прямые или изогнутые, видимой длины до 2.5 мм. Диаметр “бусин” от 25 до 70 мкм, в одной нити их размер примерно одинаков. Расстояние между соседними “бусинами” сопоставимо с их размерами и составляет 20–70 мкм. В одной цепочке наблюдается до 25 “бусин”. В нескольких образцах бусины соединены между собой органическими нитями. Некоторые нити окружены ореолом, по ширине вдвое превышающим размер бусин.

Замечания. У монгольских экземпляров размер “бусин” несколько меньше, чем в образцах из Китая. Тем не менее, общий план строения, наличие соединительных нитей и ореола позволяет отнести эти находки к *H. minor*.

Распространение. Верхний эдиакарий, свита Лючапо, Гуйчжоу, Южный Китай. Эдиакарий, свита Зуун-Арц, р. Цаган-Гол, Завхан, Монголия.

Материал. Шесть экз. из свиты Зуун-Арц в шлифах.

Род *Obruchevella* Reitlinger, 1948, emend. Yakschin et Luchinina, 1981, emend. Kolosov, 1984, emend.

Yankauskas, 1989, emend. Burzin, 1995, emend. Nagovitsin, 2000

Obruchevella ditissima Schipitzyn et Yakschin, 1981

Табл. I, фиг. 14–17

Obruchevella ditissima: Якшин, Лучинина, 1981, табл. X, фиг. 4, 5; Городничев, Дробкова, 1991, табл. II, фиг. 1.

Голотип – ИГиГ, № 309, шлиф 2219-М/3; Кузнецкий Алатау, верховья р. Томь; венд, енисейская серия, мартюхинская свита; Якшин, Лучинина, 1981, табл. X, фиг. 4.

Описание. Трубка, закрученная в правильную цилиндрическую спираль с плотно прилегающими друг к другу витками. Внешний диаметр спиралей от 85 до 115 мкм, наблюдаемая длина фрагментов спиралей до 500 мкм, количество

витков до 30. Трубки без сегментации, их диаметр от 19 до 24 мкм. Толщина стенки трубок до 5 мкм.

Распространение. Венд, мартюхинская свита енисейской серии, Алтае-Саянская область, Россия; венд, олхинская свита, скв. Иркутская I, гл. 2022, Иркутский амфитеатр, Россия. Эдиакарий, свита Зуун-Арц, р. Цаган-Гол, Завхан, Монголия.

Материал. 14 экз. удовлетворительной сохранности из свиты Зуун-Арц в шлифах и препаратах.

Род *Zuunia* Yang et al., 2020

Zuunia chimidtsereni Yang et al., 2020

Табл. I, фиг. 20

Zuunia chimidtsereni: Yang et al., 2020, рис. 1A–P; 2C1–C2; 3C1; 4; Topper et al., 2022, рис. 4C; 8; 9K–S.

Голотип – Ин-т Геологии Китайской академии геологических наук (IGCAGS), № BGol-N68G1-07 BYN1108; Монголия, Завхан, р. Баян-Гол; верхний эдиакарий, свита Зуун-Арц; Yang et al., 2020, рис. 1A.

Описание. Фрагмент косога среза трубки длиной 3.4 мм, диаметром 0.72 мм. Стенки трубки толщиной 25–30 мкм, внутренняя поверхность стенок гладкая. Поперечные кольцевые выступы на поверхности трубки сохранились в виде плавно изогнутых гребней толщиной около 20 мкм и высотой до 45 мкм. Расстояние между кольцами от 120 до 180 мкм.

Замечания. У имеющегося единственного экземпляра поперечные кольцевые структуры расположены на большем расстоянии, чем у остатков из типовой коллекции (Yang et al., 2020). Опубликованный образец из того же местонахождения (Topper et al., 2023, рис. 8) имеет еще более крупные размеры. Вероятно, что вид *Z. chimidtsereni* имеет более широкий размерный диапазон.

Материал. Один экз. в шлифе.

Шесть экз. удовлетворительной и плохой сохранности в шлифах из свиты Зуун-Арц определены как *Gen. et sp. indet.* 1 (табл. I, фиг. 18). Трубки однорядные, прямые или изогнутые, разделенные поперечными пережимами на сегменты, свободно сообщающиеся друг с другом. Диаметр поперечного сечения трубок от 90 до 140 мкм, наибольшая длина неполного фрагмента 540 мкм. Пережимы имеют ширину 2–4 мкм, а расстояние между ними (высота сегментов) 20–30 мкм. Ширина трубки немного уменьшается к

окончаниям. Один конец трубки открытый, второй – замкнутый, закругленный.

Данные микроостатки имеют сходство с представителями рода *Pararenicola* Wang (наличие поперечных колец, отверстие на одном конце и закругленное окончание на другом), но описанный нами экземпляр в несколько раз меньше *Pararenicola*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье рассмотрены проблематики и микрофоссилии из верхнеэдиакарских трансгрессивных отложений базальной аргиллитовой пачки свиты Зуун-Арц террейна Завхан Западной Монголии. Среди этих микрофоссилий впервые описаны органические остатки необычной объемной формы сохранности, выделенные из аргиллитовых слоев с помощью стандартной методики мацерации, а также изученные на поверхностях слоев аргиллита и в параллельно-ориентированных шлифах.

В изученных минерализованных тафоценозах (конкреции раннедиагенетических кремней и фосфоритов) преобладают исключительно остатки мат-формирующих нитчатых микрофоссилий *Siphonophycus kestron*, а также более редкие *S. turicum* и *S. solidum*, которые представляют собой полые чехлы осцилляториевых и, возможно, ностоковых цианобактерий. Проблематики, описанные ранее как остатки одиночных сфероморфид и слоевищ многоклеточных водорослей, представляют собой пелоид-ооидные органико-минеральные зерна и осадки, первичные структуры которых были преобразованы эндобионтными микробными сообществами.

В органико-глинистых тафоценозах на поверхности и внутри аргиллитовых слоев присутствуют обильные крупные и разнообразные органические остатки, большая часть которых представлена трубчатыми микрофоссилиями неопределенной систематической принадлежности. Мы интерпретируем их как остатки чехлов гигантских сульфид-окисляющих тиапловых бактерий, аналогичных современным морским бактериям *Candidatus Marithioploca araucae*. Подчиненным автохтонным компонентом этого тафоценоза являлись остатки эпибентосных организмов, отнесенных к виду *Norodyskia minor*. Аллохтонный компонент тафоценоза представлен в различной степени деструктурированными остатками осцилляториевых цианобактерий *Obruchevella ditissima*, трихомами цианобактериальной природы, предположительно, *Nochtiija prima*, а также крупными септированными

трубками, среди которых по размерам выделяются сплюснутые клаудино-подобные трубки *Zuunia chimidtsereeni*. Очевидно, эти два компонента изученного тафоценоза представляли собой различные бентосные населения внешних и внутренних зон палеобассейна. Вероятно, что такая фациально-палеоэкологическая структура бассейна была характерна для морских экосистем позднего эдиакария незадолго до кембрийской экспансии эукариот.

Авторы выражают глубокую признательность Е.А. Лужной и А.Ю. Иванцову (ПИН РАН) за ценные замечания в процессе написания статьи, Б. Энхбаатар, Г. Алтаншагай и Б. Баярмаа (Ин-т палеонтологии и геологии Монгольской академии наук) за всестороннюю помощь при проведении полевых работ, а также Л.В. Зайцевой (ПИН РАН) и Н.В. Горьковой (ГИН РАН) за выполнение электронно-микроскопических исследований, и Е.В. Покровской за проведение рентгенофазового анализа.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проведены в соответствии с планами научно-исследовательской работы Геологического института Российской академии наук, тема № АААА-А20-123032400065-4. Экспедиционные работы и сбор материалов проведены за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований 29-0-55-44010 Монг_а.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьева Н.Г., Петров П.Ю.* Род *Vendomyces* Burzin и фациально-экологическая специфика старореченской микробиоты позднего венда Анабарского поднятия Сибири и ее стратиграфических аналогов // Палеонтол. журн. 2014. № 6. С. 80–92. <https://doi.org/10.1134/S003103011406015X>
- Воробьева Н.Г., Петров П.Ю.* Микробиота баракунской свиты и биостратиграфическая характеристика дальнотайгинской серии: ранний венд Уринского поднятия Сибири // Стратигр. Геол. корреляция. 2020. Т. 28. № 4. С. 26–42. <https://doi.org/10.1134/S0869593820040103>
- Городничев В.И., Дробкова Е.Л.* Обручевеллы из отложений олхинской и чорской свит Иркутского амфитеатра // Поздний докембрий и ранний палеозой

- Сибири. Сибирская платформа и ее обрамление. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1991. С. 120–129.
- Заварзин Г.А.* Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М.* Возможности стронциевой изотопной хемотратиграфии в решении проблем стратиграфии верхнего протерозоя (рифей и венда) // Стратигр. Геол. корреляция. 2014. Т. 22. № 6. С. 3–25.
- Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М. и др.* U-Pb возраст и Sr-изотопная характеристика надтиллитовых известняков неопротерозойской цаганоломской свиты, бассейн р. Дзабхан, Западная Монголия // Стратигр. Геол. корреляция. 2012. Т. 20. № 6. С. 28–40.
- Рагозина А.Л., Доржнамжаа Д., Серезникова Е.А. и др.* Ассоциация макро- и микрофоссилий в вендских (эдиакарских) постледниковых отложениях Западной Монголии // Стратигр. Геол. корреляция. 2016. Т. 24. № 3. С. 27–37.
<https://doi.org/10.1134/S0869593816030059>
- Рагозина А.Л., Доржнамжаа Д., Лужная (Серезникова) Е.А. и др.* Цианобактериальные сообщества завханской ассоциации позднего венда и палеообстановки формирования вендо-кембрийских отложений Западной Монголии // Палеонтол. журн. 2022. Т. 56. № 4. С. 3–11.
<https://doi.org/10.1134/s0031030122040098>
- Якшин М.С.* Водорослевые микрофоссилии из опорного разреза венда Патомского нагорья (Сибирская платформа) // Новости палеонтологии и стратиграфии. Приложение к журналу “Геология и геофизика”. 2002. Т. 43. Вып. 5. С. 12–31.
- Якшин М.С., Лучинина В.А.* Новые данные по ископаемым водорослям семейства Oscillatoriaceae // Пограничные отложения докембрия и кембрия Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1981. С. 28–34.
- Adach N., Ezaki Y., Li J. et al.* Late Ediacaran *Voxnia*-bearing stromatolites from the Gobi-Altay, western Mongolia // Precamb. Res. 2019. V. 334. 105470.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105470>
- Anderson R.P., McMahon S., Bol U. et al.* Palaeobiology of the early Ediacaran Shuurgat Formation, Zavkhan Terrane, south-western Mongolia // J. Syst. Palaeontol. 2017. V. 11. P. 947–968.
<http://dx.doi.org/10.1080/14772019.2016.1259272>
- Arvestål E.H.M., Willman S.* Organic-walled microfossils in the Ediacaran of Estonia: biodiversity on the East European platform // Precamb. Res. 2020. V. 341. P. 1–27.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105626>
- Becker-Kerber B., de Barros G.E.B., Paim P.S.G. et al.* In situ filamentous communities from the Ediacaran (approx. 563 Ma) of Brazil // Proc. Roy. Soc. B. Biol. Sci. 2021. V. 288. № 1942. P. 20202618.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2618>
- Bengtson S., Sallstedt T., Belivanova V., Whitehouse M.* Three-dimensional preservation of cellular and subcellular structures suggests 1.6 billion-year-old crown-group red algae // PLoS Biol. 2017. V. 15. № 3. P. 2000735.
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2000735>
- Bold U., Ahm A.C., Schrag D.P. et al.* Effect of dolomitization on isotopic records from Neoproterozoic carbonates in southwestern Mongolia // Precamb. Res. 2020. V. 350. P. 105902.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105902>
- Bold U., Crowley J.L., Smith E.F. et al.* Neoproterozoic to early Paleozoic tectonic evolution of the Zavkhan terrane of Mongolia: Implications for continental growth in the Central Asian orogenic belt // Lithosphere. 2016a. V. 8. № 6. P. 729–750.
<https://doi.org/10.1130/L549.1>
- Bold U., Macdonald F.A., Smith E.F. et al.* Elevating the Neoproterozoic Tsagaan-Olom Formation to a Group // Mongolian Geoscientist. 2013. V. 39. P. 89–94.
- Bold U., Smith E.F., Rooney A.D. et al.* Neoproterozoic stratigraphy of the Zavkhan terrane of Mongolia: the backbone for Cryogenian and early Ediacaran chemostratigraphic records // Amer. J. Sci. 2016b. V. 316. P. 1–63.
<https://doi.org/10.2475/01.2016.01>
- Butterfield N.J.* A vaucheriacean alga from the middle Neoproterozoic of Spitsbergen: implications for the evolution of Proterozoic eukaryotes and the Cambrian explosion // Paleobiology. 2004. V. 30. P. 231–252.
[https://doi.org/10.1666/0094-8373\(2004\)030<0231:AVAFTM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/0094-8373(2004)030<0231:AVAFTM>2.0.CO;2)
- Cunningham J.A., Vargas K., Liu P. et al.* Critical appraisal of tubular putative eumetazoans from the Ediacaran Weng’an Doushantuo biota // Proc. Roy. Soc. B. 2015. V. 282. P. 20151169.
<http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2015.1169>
- Dong L., Xiao S., Shen B., Zhou Ch.* Silicified *Horodyskia* and *Palaeopascichnus* from Upper Ediacaran cherts in South China: Tentative phylogenetic interpretation and implications for evolutionary stasis // J. Geol. Soc. 2008. V. 165. № 1. P. 367–378.
<https://doi.org/10.1144/0016-76492007-074>
- Dornbos S.Q., Oji T., Kanayama A., Gonchigdorj S.* A new Burgess shale-type deposit from the Ediacaran of western Mongolia // Sci. Rep. 2016. V. 6. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1038/srep23438>
- Jørgensen B.B., Gallardo V.A.* *Thioploca* spp.: filamentous sulfur bacteria with nitrate vacuoles // FEMS Microbiol. Ecol. 1999. V. 28. P. 301–313.
<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1999.tb00585.x>
- Kendall B., Komiya T., Lyons T.W. et al.* Uranium and molybdenum isotope evidence for an episode of widespread ocean oxygenation during the late Ediacaran Period // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 156. P. 173–193.
- Khomentovsky V.V., Gibsher A.S.* The Neoproterozoic–Lower Cambrian in northern Gobi-Altay, western Mongolia: Regional setting, lithostratigraphy, and biostratigraphy // Geol. Mag. 1996. V. 133. P. 371–390.
<https://doi.org/10.1017/S001675680000755X>

- Kojima H., Teske A., Fukui M.* Morphological and phylogenetic characterizations of freshwater *Thioploca* species from Lake Biwa, Japan, and Lake Constance, Germany // *Appl. Environ. Microbiol.* 2003. V. 69. P. 390–398. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.1.390-398.2003>
- Liu P., Moczyłowska M.* Ediacaran microfossils from the Doushantuo Formation chert nodules in the Yangtze Gorges area, South China, and new biozones // *Fossils and Strata.* 2019. V. 65. P. 1–172. <https://doi.org/10.1002/9781119564225.ch1>
- Macdonald F.A., Jones D.S., Schrag D.P.* Stratigraphic and tectonic implications of a newly discovered glacial diamictite–cap carbonate couplet in southwestern Mongolia // *Geology.* 2009. V. 37. P. 123–126. <https://doi.org/10.1130/G24797A.1>
- Maier S., Gallardo V.A.* *Thioploca araucae* sp. nov. and *Thioploca chileae* sp. nov. // *Intern. J. Syst. Bacteriol.* 1984. V. 34. № 4. P. 414–418. <https://doi.org/10.1099/00207713-34-4-414>
- Oji T., Dornbos S.Q., Yada K. et al.* Penetrative trace fossils from the late Ediacaran of Mongolia: early onset of the agronomic revolution // *Roy. Soc. Open Sci.* 2018. V. 5. P. 172250. <https://doi.org/10.1098/rsos.172250>
- Ouyang Q., Zhou C.M., Pang K., Chen Z.* Silicified *Polybessurus* from the Ediacaran Doushantuo Formation records microbial activities within marine sediments // *Palaeoworld.* 2022. V. 31. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2021.03.001>
- Ragozina A.L., Dorjnamjaa D., Serezhnikova E.A. et al.* Prasinophyte green algae *Tasmanites* and problematic fossils in the Upper Vendian biota of the Zavkhan Basin, Western Mongolia // *Paleontol. J.* 2016. V. 50. № 12. P. 1314–1320. <https://doi.org/10.1134/S0031030116120157>
- Rooney A.D., Strauss J.V., Brandon A.D., Macdonald F.A.* A cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations // *Geology.* 2015. V. 43. № 5. P. 459–462. <https://doi.org/10.1130/G36511.1>
- Salman V., Amann R., Girth A.C. et al.* A single-cell sequencing approach to the classification of large, vacuolated sulfur bacteria // *Systematic and Applied Microbiol.* 2011. V. 34. № 4. P. 243–259. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2011.02.001>
- Salman V., Bailey J.V., Teske A.* Phylogenetic and morphologic complexity of giant sulphur bacteria // *Antonie van Leeuwenhoek.* 2013. V. 104. P. 169–186. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-9952-y>
- Serezhnikova E.A., Ragozina A.L., Dorjnamjaa D., Zaitseva L.V.* Fossil microbial communities in Neoproterozoic interglacial rocks of western Mongolia // *Precamb. Res.* 2014. V. 245. P. 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.01.005>
- Smith E.F., Macdonald F.A., Petach T.A. et al.* Integrated stratigraphic, geochemical, and paleontological late Ediacaran to early Cambrian records from southwestern Mongolia // *GSA Bull.* 2015. V. 128. P. 442–468. <https://doi.org/10.1130/B31248.1>
- Topper T., Betts M.J., Dorjnamjaa D. et al.* Locating the BACE of the Cambrian: Bayan Gol in southwestern Mongolia and global correlation of the Ediacaran–Cambrian boundary // *Earth-Sci. Rev.* 2022. V. 29. P. 104017. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104017>
- Willman S., Peel J.S.* Problematic tubular fossils from the Portfeld Formation (Ediacaran) of North Greenland // *J. Paleontol.* 2022. Online first 02 June 2022. <https://doi.org/10.1017/jpa.2022.43>
- Willman S., Slater B.J.* Late Ediacaran organic microfossils from Finland // *Geol. Mag.* 2021. V. 158. P. 2231–2244. <https://doi.org/10.1017/S0016756821000753>
- Xiao S., Narbonne G.M.* The Ediacaran Period // *Geologic Time Scale / Eds. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M.* Oxford: Elsevier, 2020. V. 1. P. 521–561. <https://www.doi.org/10.1016/B978-0-12-824360-2.00018-8>
- Xiao S., Narbonne G.M., Zhou C. et al.* Towards an Ediacaran Time Scale: Problems, protocols, and prospects // *Episodes.* 2016. V. 39. № 4. P. 540–555. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2016/v39i4/103886>
- Xiao S., Yuan X., Steiner M., Knoll A.H.* Macroscopic carbonaceous compressions in a terminal Proterozoic shale: a systematic reassessment of the Miaohu biota, South China // *J. Paleontol.* 2002. V. 76. P. 347–376. <https://doi.org/10.1017/S0022336000041743>
- Yang B., Steiner M., Schiffbauer J.D. et al.* Ultrastructure of Ediacaran cloudinids suggests diverse taphonomic histories and affinities with non-biomineralized annelids // *Sci. Rep.* 2020. V. 10 (535). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56317-x>
- Ye Q., An Z., Yu Y. et al.* Phosphatized microfossils from the Miaohu Member of South China and their implications for the terminal Ediacaran biodiversity decline // *Precamb. Res.* 2023. V. 388. P. 107001. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107001>
- Ye Q., Tong J., An Z. et al.* A systematic description of new macrofossil material from the upper Ediacaran Miaohu Member in South China // *J. Syst. Palaeontol.* 2017. V. 17. P. 183–238. <https://doi.org/10.1080/14772019.2017.1404499>
- Zhang Y., Chang Sh., Feng Q., Zheng Sh.* A diverse microfossil assemblage from the Ediacaran–Cambrian deep-water chert of the Liuchapo Formation in Guizhou Province, South China // *J. Earth Sci.* 2023. V. 34. № 2. P. 398–408. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1485-0>
- Zhu S., Zhu M., Knoll A.H. et al.* Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China // *Nature Commun.* 2016. V. 7. № 1. P. 11500. <https://doi.org/10.1038/ncomms11500>

Объяснение к таблице I

Микрофоссилии свиты Зуун-Арц, эдиакарий.

Фиг. 1–3. Трубка, форма 1: 1 – экз. ГИН 14716-248, обр. 22075-18; 2 – экз. ГИН 14716-62, преп. 22075-1, т. 2; 3 – поперечный срез, экз. ГИН 14716-215, шлиф 22075-13, т. 9.

Фиг. 4–6, 12. Трубка, форма 2: 4 – экз. ГИН 14716-239, обр. 22075-8; 5 – экз. ГИН 14716-237, обр. 22075-6; 6 – экз. ГИН 14716-67, преп. 22075-2, т. 5; 12 – экз. ГИН 14716-182, шлиф 22075-11, т. 4.

Фиг. 7–11. Трубка, форма 3: 7 – экз. ГИН 14716-238, обр. 22075-7; 8 – экз. ГИН 14716-247, обр. 22075-17; 9 – экз. ГИН 14716-249, обр. 22075-19; 10 – экз. ГИН 14716-193, шлиф 22075-11, т. 16; 11 – экз. ГИН 14716-209, шлиф 22075-13, т. 3.

Фиг. 13. Микроостаток серповидной формы, экз. ГИН 14716-80, преп. 22075-2, т. 17.

Фиг. 14–17. *Obruchevella ditissima* Schipitzyn et Yakschin: 14 – экз. ГИН 14716-78, преп. 22075-2, т. 15; 15 – экз. ГИН 14716-82, преп. 22075-3, т. 3; 16 – экз. ГИН 14716-87, преп. 22075-3, т. 8; 16а – увеличенный фрагмент; 17 – экз. ГИН 14716-93, преп. 22075-3, т. 14.

Фиг. 18. Gen. et sp. indet. 1, экз. ГИН 14716-166, шлиф 22075-10, т. 10.

Фиг. 19. *Nochtuija prima* Yakschin, экз. ГИН 14716-57, шлиф 22073-2, т. 11.

Фиг. 20. *Zuunia chimidtsereni* Yang et al., 2020, экз. ГИН 14716-282, шлиф 22075-П1, т. 1.

Фиг. 21. *Norodyskia minor?* Dong et al., экз. ГИН 14176-58, шлиф 22073-3, т. 1.

New Data on the Upper Ediacaran Microbiota of Zuun-Arts (Zavkhan Terrane, Western Mongolia)

P. Yu. Petrov¹, N. G. Vorob'eva¹, A. L. Ragozina²

¹*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

²*Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117647 Russia*

The microfossils and problematica from the Upper Ediacaran deposits of the Zuun-Arts Formation of the Zavkhan terrane of Western Mongolia are considered. For the first time, various organic remains preserved in mineralized and organic-clay taphocenoses have been described from these deposits. Numerous tubular microfossils are interpreted as remains of the sheaths of the giant sulfide-oxidizing Thioploca bacteria *Candidatus Marithioploca araucae*. Autochthonous and allochthonous components of microbiota were identified, and the putative facies-ecological structure of the paleobasin was analyzed.

Keywords: Algae, Microfossils, Problems, Taphocenosis, Vendian, Ediacaran, Biostratigraphy

