

УДК [550.93+551.7]:552.5

## ВОЗРАСТНЫЕ РАМКИ И СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ МИКРОБИОТЫ КАЛТАСИНСКОЙ СВИТЫ НИЖНЕГО РИФЕЯ ВОЛГО-УРАЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2019 г. **В. Н. Сергеев**<sup>1</sup>, **М. А. Семихатов**<sup>1</sup>, **Н. Г. Воробьева**<sup>1, \*</sup>,  
**Н. Д. Сергеева**<sup>2</sup>, **Шарма Мукунд**<sup>3</sup>, **Л. П. Барышникова**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

<sup>3</sup> Институт палеонаук им. Барбала Сани, Лакнау, Индия

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

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

Получена после доработки 20.12.2018 г.

Принята к публикации 25.01.2019 г.

Рассмотрена ассоциация органостенных микрофоссилий калтасинской свиты, представленных морфологически сложно построенными и крупными формами, на основании ранее полученных и новых материалов. По общему облику калтасинская микробиота напоминает многие ассоциации микрофоссилий неопротерозоя (позднего рифея и венда) и при первоначальном описании была ошибочно интерпретирована как позднерифейская, несмотря на то что индекс-таксоны позднего рифея в ее составе отсутствуют, а геологические данные указывают на ее раннерифейский возраст. Раннерифейский возраст калтасинской свиты был подтвержден в серии исследований последних лет с применением Re–Os, U–Pb и других современных методов изотопной геохронологии, а низкие отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и почти инвариантные значения  $\delta^{13}\text{C}$  в ее отложениях сравнимы с изотопными характеристиками мезопротерозойских толщ с возрастом древнее 1300 млн лет. Применение геохимических методов с использованием высокорезагентного железа (FeHR), а также изотопов углерода и серы показало наличие аэробных окислительных условий при накоплении относительно глубоководных отложений арланской подсвиты калтасинской свиты (отношение FeHR/FeT < 0.38). Это противоречит общей концепции существования аноксигенного океана в мезопротерозое, но объясняет присутствие в составе микробиоты морфологически сложно построенных и крупных эвкариотных форм, получивших широкое распространение в окисленных обстановках неопротерозоя.

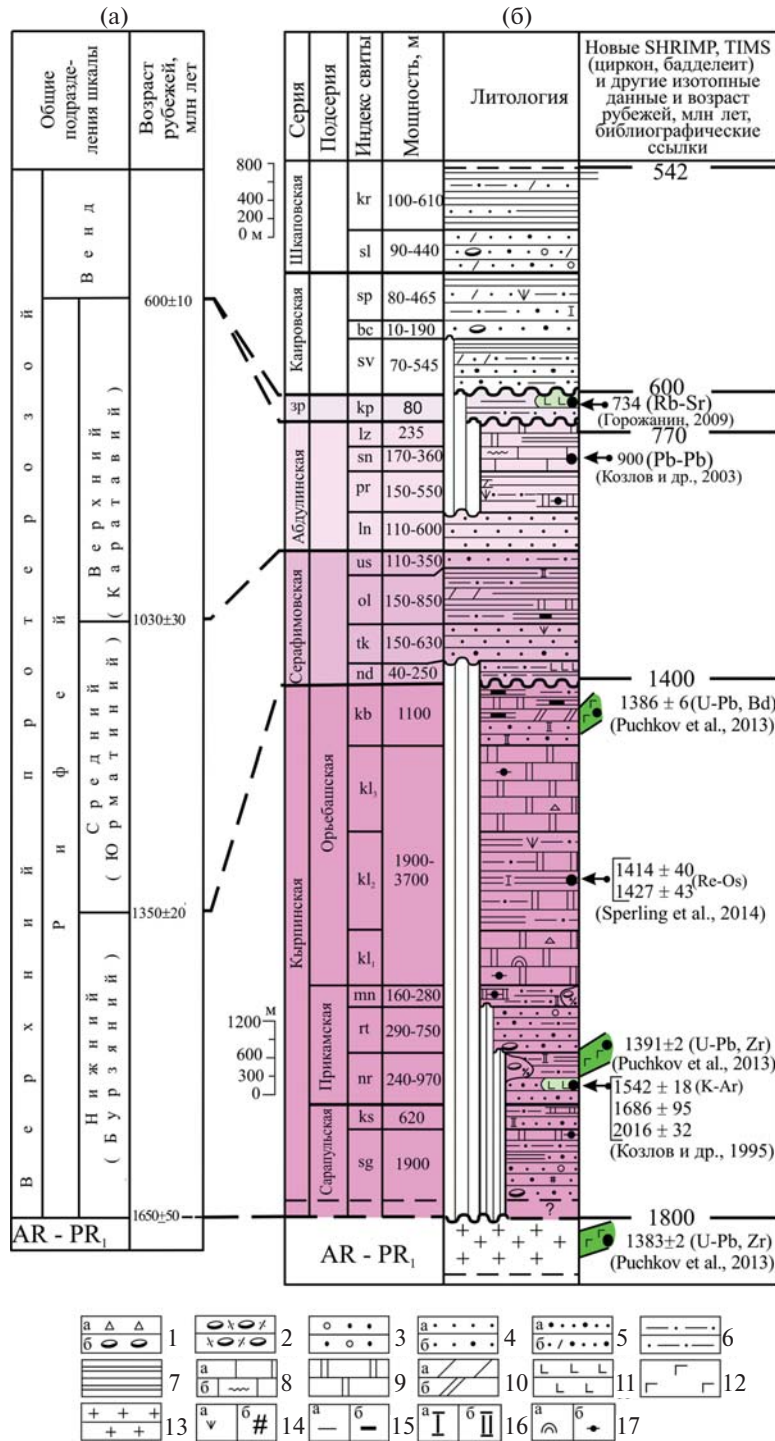
**Ключевые слова:** верхний протерозой, рифей, венд, изотопный возраст, Общая стратиграфическая шкала рифея и венда России.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27536-45>

### ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени в российских публикациях весь набор микрофоссилий из нижнерифейских отложений Северной Евразии рассматривали как представителей различных таксонов цианобактерий, которые в большинстве случаев не имеют стратиграфического значения. В отличие от этого, многие сложно построенные и крупные формы микрофоссилий В.И. Козлов с соавторами (1998) и А.Ф. Вейс с соавторами (2000, 2001) считали представителями более молодой позднерифейской микробиоты, которая, с их точки зрения, была

ошибочно отнесена к нижнему рифею и представлена эвкариотными формами, характерными для верхнего рифея. Однако данные, полученные за последние 10–15 лет, подтвердили высокий уровень эволюционного развития докембрийской микрофлоры уже в раннем рифее (Сергеев 2006; Sergeev, 2009; Сергеев и др., 2010, 2016, 2017). Этот вывод в предлагаемой статье рассматривается на новом материале, который был получен при изучении микробиоты из отложений калтасинской свиты нижнего рифея Волго-Уральской области (рис. 1а, 1б).



**Рис. 1.** (а) Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений рифея и венда России (Семихатов и др., 2015) и (б) строение рифейских и вендских отложений Волго-Уральской области (Краснобаев и др., 2012; Пучков и др., 2016; Сергеева, Пучков, 2016).

1 – конгломерато-брекчии (а) и конгломераты (б); 2 – тиллиты и тиллоиды; 3 – гравелиты; 4, 5 – песчаники кварцевые (4а), полевошпат-кварцевые (4б), аркозовые (5а) и полимиктовые (5б); 6 – алевролиты; 7 – аргиллиты; 8 – известняки (а) и струйчатые известняки (б); 9 – доломиты; 10 – мергели известковые (а) и доломитовые (б); 11 – базальты; 12 – габбро-долериты; 13 – породы кристаллического фундамента; 14 – глауконитсодержащие породы (а) и породы с проявлением ангидритизации (б); 15 – глины и аргиллиты (а) и породы с высоким содержанием углерода (б); 16 – кальцитизированные (а) и доломитизированные (б) породы; 17 – палеонтологические остатки: строматолиты (а) и микрофитолиты (б).

Свиты верхнедокембрийской последовательности Волго-Уральской области: sg – сигаевская, ks – костинская, нг – норкинская, rt – ротковская, mn – минаевская, kl – калтасинская, kb – кабаковская, nd – надеждинская, tk – тукаевская, ol – ольховская, us – усинская, ln – леонидовская, пр – приотовская, sn – шиханская, lz – леузинская, кр – кипчакская, sv – сергеевская, bc – байкибашевская, sp – старопетровская, sl – салиховская, кг – карлинская; зр – завершающий рифей.

## ВОЗРАСТНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И СТРОЕНИЕ КАЛТАСИНСКОЙ СВИТЫ

Калтасинская свита, выделенная К.Р. Тимергазиным (1956), является ключевым подразделением для понимания истории формирования осадочных отложений нижнего рифея Волго-Уральской области.

Оценка возраста калтасинской свиты опирается, с одной стороны, на Re—Os датировки аргиллитов из средних горизонтов этой свиты (из арланской подсвиты в скважине 203 Бедряжская), равные  $1414 \pm 40$  и  $1427 \pm 43$  млн лет (Sperling et al., 2014), а с другой стороны, на ранее полученные хемотратиграфические исследования (Кэй и др., 2007). Последние показали, что присутствующие карбонатным породам калтасинской свиты в скв. 133 Азино-Пальниковская и в скв. 203 Бедряжская низкие отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (около 0.7040) и почти инвариантные значения  $\delta^{13}\text{C}$  (от примерно 0.5‰ в мелководных фациях до примерно 2‰ V-PDB в глубоководных фациях) явно не согласуются с этими параметрами, характерными для средне- и верхнерифейских отложений, и сравнимы с изотопными характеристиками протерозойских отложений с возрастом более 1300 млн лет (Семихатов и др., 2002, 2009; Halverson et al., 2007; Shields, 2007; Кузнецов и др., 2014, 2018).

Кроме того, был определен U—Pb возраст (SHRIMP-II) бадделеита ( $1386 \pm 6$  млн лет; Puchkov et al., 2013) из дайки габбро-долерита, прорывающей отложения кабаковской свиты в скв. 1 Восточно-Аскинская (рис. 1б). Эта датировка определяет минимальный возрастной предел всей кырпинской серии (включая калтасинскую свиту) и служит дополнительным аргументом для отнесения названной серии к нижнему рифею. Этот вывод согласуется как с составом калтасинской микробиоты, так и с возрастными рамками стратотипа нижнего рифея — бурзянской серии Башкирского мегантиклинория (Кузнецов и др., 2005, 2008), уверенно коррелируемого с разрезом Волго-Уральской области по геологическим, геофизическим и новейшим геохронологическим данным (Кэй и др., 2007; Козлов и др., 2011; Puchkov et al., 2012, 2013).

Новый микропалеонтологический материал получен нами из отложений калтасинской сви-

ты в скв. 203 Бедряжская и скв. 1 Восточно-Аскинская. Кроме того, мы провели переизучение находок А.Ф. Вейса и соавторов (Вейс и др., 2000) из керна скв. 133 Азино-Пальниковская, хранящихся в палеонтологической коллекции ГИН РАН (Москва). В разрезах упомянутых выше скважин калтасинская свита имеет следующие особенности состава и строения.

В скважине 133 Азино-Пальниковская ( $56^{\circ}31'53''$  с.ш.,  $53^{\circ}30'02''$  в.д.), расположенной в 40 км юго-восточнее г. Ижевска (Удмуртская Республика), калтасинская свита представлена терригенно-карбонатными отложениями и делится на три подсвиты (снизу вверх): саузовскую, арланскую и ашитскую (рис. 2). Саузовская подсвита сложена доломитами, нередко обломочными, с прослоями аргиллитов, песчаников и алевролитов субаркозового и полевошпат-кварцевого состава. В породах подсвиты отмечаются стилолитовые швы, заполненные глинистым материалом и метаморфизованными битумоидами, нередко пиритизированными. Мощность подсвиты 500 м. Арланская подсвита представлена неравномерным чередованием доломитов и аркозовых и полевошпат-кварцевых песчаников, а также алевролитов, их доломитовых разностей и аргиллитов. Мощность подсвиты 760 м. Ашитская подсвита существенно карбонатная и по составу и облику пород близка к саузовской подсвите. Остаточная мощность подсвиты 66 м, а мощность всей калтасинской свиты 1326 м.

В скважине 203 Бедряжская ( $56^{\circ}34'08''$  с.ш.,  $55^{\circ}47'59''$  в.д.), расположенной в 25 км севернее г. Куеда (Пермский край), отложения калтасинской свиты представлены преимущественно тонкозернистыми известняками глинистыми, серыми и коричневато-серыми, с прослоями зеленовато- и темно-серых аргиллитов и зеленовато-серых доломитовых мергелей. В коричневато-серых известняках по плоскостям наслоения, в стилолитовых швах и различно ориентированных трещинах отмечается битуминозный материал. Зоны с повышенной относительно фоновой битуминозностью пород встречаются по всему разрезу свиты, а диагностическим признаком этих зон служит присутствие легкого петролейно-эфирного битумоида (Белоконь и др., 1991).

**Рис. 2.** Сопоставление разрезов калтасинской свиты по профилю скважин 133 Азино-Пальниковская, 203 Бедряжская, 1 Восточно-Аскинская. На врезке показано расположение скважин на местности.

1 — зона трещиноватости; 2 — доломитовые интракласты (а) и кремни (б); 3 — битуминозные прослои в калтасинских отложениях; 4 — уровни отбора проб на микрофоссилии; 5 — географическое положение мест отбора проб на микрофоссилии, 6 — Re—Os датировки (Sperling et al., 2014) арланской подсвиты калтасинской свиты (млн лет); 7 — U—Pb датировки (Puchkov et al., 2013) бадделеита (млн лет) из дайки габбро-диорита; 8 — поверхности размыва. Сокращения: as — ашитская подсвита, tk — тукаевская свита. Остальные условные обозначения см. рис. 1.

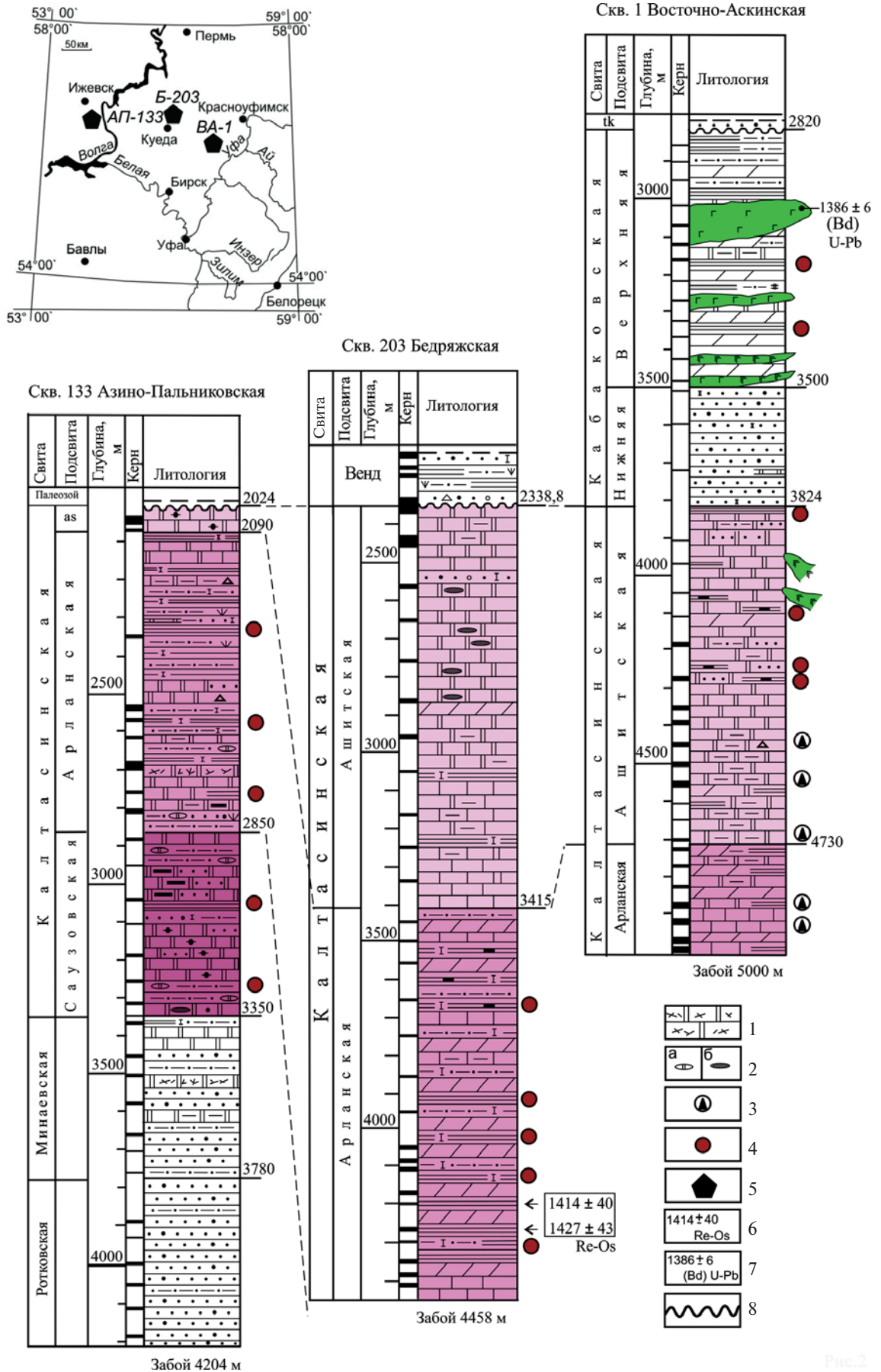


Рис. 2

По особенностям состава и порядку напластования отложений калтасинская свита подразделяется в скв. 203 Бедряжская на три последовательные подсвиты (снизу вверх): (1) саузовскую, сложенную в основном тонкозернистыми известняками серыми и коричневатосерыми, с прослоями зеленовато-серых аргиллитов, вскрытой мощностью 58 м; (2) арланскую, представленную неравномерным чередованием аргиллитов, доломитовых мергелей, доломитизированных известняков и алевролитов мощностью 985 м; (3) ашитскую, представленную тонкозернистыми серыми известняками и доломитами и доломитовыми мергелями розовато- и зеленовато-серого цвета. Породы подсвиты местами окремненные и содержат гравийную примесь полупрозрачного кварца. Мощность подсвиты около 1076 м, а всей калтасинской свиты достигает 2119 м.

В скв. 1 Восточно-Аскинская (56°5'38" с.ш., 59°42'10" в.д.), расположенной на севере Республики Башкортостан вблизи границы с Пермским краем (рис. 1), отложения калтасинской свиты представлены серыми и темно-серыми доломитами, доломитовыми мергелями и известняками с подчиненными прослоями аргиллитов и песчаников. Породы свиты тонко- и неравномерно-слоистые, отмечаются стилолитовые швы и тонкие темно-бурые и черные слои глинистого и углеродисто-глинистого материала, часто пропитанные битумом. Нижняя граница свиты не вскрыта бурением. По литологическому составу и соотношению пород в переслаивании калтасинская свита расчленена на подсвиты: (1) арланскую, в составе которой преобладают доломиты, известняки и доломитовые мергели с подчиненными прослоями аргиллитов, мощностью 270 м, и (2) ашитскую, сложенную доломитами и доломитовыми мергелями с подчиненными прослоями аргиллитов и песчаников. Мощность ашитской подсвиты 906 м, а всей калтасинской свиты 1176 м.

Некоторые фациальные особенности калтасинской свиты, связанные с увеличением терригенной примеси в осадках скв. 133 Азино-Пальниковская в сравнении с породами этой свиты в скв. 203 Бедряжская и скв. 1 Восточно-Аскинская (рис. 1, 2), обусловлены положением скважин в осадочном бассейне. Скв. 203 Бедряжская и скв. 1 Восточно-Аскинская, по-

видимому, располагались на большем удалении от береговой зоны калтасинского осадочного бассейна, чем скв. 133 Азино-Пальниковская (рис. 1).

#### МИКРОБИОТА КАЛТАСИНСКОЙ СВИТЫ И ОБСТАНОВКИ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

Для микропалеонтологических исследований нами был отобран представительный материал из отложений калтасинской свиты в скв. 133 Азино-Пальниковская, скв. 203 Бедряжская и скв. 1 Восточно-Аскинская, в которых стратиграфическая позиция и возраст этих отложений получили надежное обоснование. В ходе проведенных работ был установлен таксономический состав микробиоты из арланской и ашитской подсвит калтасинской свиты и сопоставлен с составом одновозрастных ассоциаций микрофоссилий из других микробиот Сибири, а также Китая и Австралии (Sergeev et al., 2016). Проведенные исследования показали, что в калтасинской микробиоте доминируют остатки относительно крупных микроорганизмов, многие из которых представляют собой несомненные эвкариоты ввиду большого размера и своеобразной морфологии, которые исключают возможность рассматривать их как пустые колонии прокариот.

В калтасинской свите установлены следующие таксоны микрофоссилий: *Leiosphaeridia tenuissima* и *L. crassa* (здесь и далее табл. I, фиг. 1), *L. minutissima*, *Leiosphaeridia* sp. (фиг. 2), *L. ternata* (фиг. 3), *L. atava* (фиг. 4), *L. jacutica*, *L. wimani* (фиг. 6), *Pterospermopsimorpha pileiformis* (фиг. 5), *Eosolena minuta* (фиг. 7), *Rectia magna* (фиг. 8), *Rectia* sp. (фиг. 14), *Tortunema patomica* (фиг. 9), *Polytrichoides lineatus* (фиг. 10), *Siphonophycus punctatum* (фиг. 11), *S. typicum*, *S. robustum*, *S. solidum*, *S. kestron*, *Spiromorpha* aff. *segmentata* (фиг. 12), *Pseudodendron anteridium* (фиг. 13), *Pellicularia tenera* (фиг. 15), *Navifusa* sp. (фиг. 16), *Spumosina rubiginosa*, *Synsphaeridium* sp., *Oscillatoriopsis longa*, *Cephalophytarion* sp., (?) *Moyeria* sp., *Rugosoopsis* sp., незазванные формы 1–5 (фиг. 17) (Sergeev et al., 2016).

Приведенные таксоны обладают достаточно широким стратиграфическим распространением и, по современным данным, типичны для раннего рифея, хотя местами поднимаются до позднего рифея, но морфологически сложные ин-

**Таблица I.** Микрофоссилии калтасинской свиты.

1 – *Leiosphaeridia tenuissima* (большой светлый диск) и *L. crassa* (меньший темный диск); 2 – *Leiosphaeridia* sp.; 3 – *Leiosphaeridia ternata*; 4 – *Leiosphaeridia atava*; 5 – *Pterospermopsimorpha pileiformis*; 6 – *Leiosphaeridia wimani*; 7 – *Eosolena minuta*; 8 – *Rectia magna*; 9 – *Tortunema patomica*; 10 – *Polytrichoides lineatus*; 11 – *Siphonophycus punctatum*; 12 – *Spiromorpha* aff. *segmentata*; 13 – *Pseudodendron anteridium*; 14 – *Rectia* sp.; 15 – *Pellicularia tenera*; 16 – *Navifusa* sp.; 17 – сфероморфные акритархи с проблематичными шипами. Длина одинарной масштабной линейки 10 мкм, двойной – 100 мкм.

Таблица I



декс-таксоны позднерифейского возраста здесь отсутствуют. Это исключает ранее сделанное А.Ф. Вейсом (2000, 2001) заключение о позднерифейском возрасте калтасинской свиты и некоторых других толщ, развитых в авлакогенах Восточно-Европейской платформы.

Важные результаты были получены при изучении палеоэкологических обстановок формирования калтасинской микробиоты с применением новейших методик на оборудовании Гарвардского университета (США). Применение геохимических методов с использованием в первую очередь высокорегентного железа (FeHR), а также изотопов углерода и серы показало наличие аэробных окислительных условий при накоплении относительно глубоководных отложений (на что указывает отсутствие следов штормовой активности или подводных течений) арланской подсвиты калтасинской свиты (отношение  $FeHR/FeT < 0.38$ ; Sperling et al., 2014, Fig. 3). Этот вывод согласуется как с данными органической геохимии, так и с набором биомаркеров, присутствующих в этих породах (Sperling et al., 2014, Table 1). Следует заметить, что понятие “глубоководные отложения” для протерозоя отличается от такового для фанерозоя: в протерозое глубоководными считаются толщи, накопившиеся в пределах средней части

открытого шельфа. В калтасинской свите присутствуют и мелководные фации (песчаники, гравелиты), но микрофоссилии в них обнаружены не были.

Результаты изотопных исследований противоречат общепринятой концепции существования в возрастном интервале примерно от 2 до 0.6 млрд лет назад преимущественно анаэробного океана (Canfield, 1998). Согласно этой концепции, свободный кислород, появившийся в атмосфере после Великого окислительного события 2.4–2.2 млрд лет назад (Шопф, 2014), присутствовал только в самой верхней части океанов, а более глубокие части бассейнов оставались анаэробными, напоминая современное Черное море (Brasier, Lindsay, 1998; Anbar, Knoll, 2002; Johnston et al., 2012). До последнего времени эта концепция подтверждалась данными органической и неорганической геохимии, но выявленное наличие свободного кислорода в осадках калтасинской свиты заставляет пересмотреть эту модель и принять, что в раннем протерозое и рифее распределение кислорода в относительно глубоководных частях бассейна (до первых сотен метров или немного ниже уровня штормового воздействия волн (Gilly et al., 2013; Sperling et al., 2014)) носило “мозаичный” характер, и окислительные условия латерально были сопряжены с анаэробными обстановками. Вероятно, в условиях глобального распространения анаэробных придонных обстановок подобная ситуация могла возникнуть только в частично изолированном бассейне, в котором в результате окислительного фотосинтеза цианобактерий были созданы локальные аэробные условия. Ранее была предложена модель частично изолированного калтасинского бассейна (Сергеев и др., 2016, 2017) рифтового типа, зеркально отражающего ситуацию придонных обстановок современного Черного моря (рис. 3). Эта модель предусматривает существование частично изолированных аэрированных бассейнов и может быть применена для объяснения эмпирически установленного присутствия в нижнем рифее двух главных типов органостенных микробиот (Сергеев, 2006; Сергеев и др., 2010). В одних микробиотах, приуроченных к анаэробным условиям, доминировали мелкие, по-видимому, прокариотные микроорганизмы (например, микробиоты саткинской и бакальской свит Южного Урала или омахтинской свиты Учуро-Майского региона), в то время как в кислородных обстановках широким распространением пользовались эвкарисные относительно крупные микроорганизмы, присутствующие в калтасинской, котуйканской, усть-ильинской свитах и некоторых других толщах раннего рифея.



**Рис. 3.** Принципиальная модель, объясняющая локальное аэрирование калтасинского палеобассейна при общем анаэробном характере океана в раннерифейское время (а), по аналогии с современным бассейном Черного моря (б).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное изучение микробиоты калтасинской свиты позволило уточнить таксономический состав этой микробиоты, подтвердить ее раннерифейский возраст и сделать оригинальный вывод о ее палеоэкологической приуроченности. Было показано, что в составе калтасинской микробиоты встречаются остатки как прокариотных цианобактерий, так и эвкариотных микроорганизмов крупных размеров, с относительно сложной морфологией. Наличие последних привело А.Ф. Вейса и его коллег к заключению о позднерифейском возрасте калтасинской свиты, что противоречило имеющимся данным по биостратиграфии, изотопной геохронологии и региональной геологии этой свиты, свидетельствующим о ее раннерифейском возрасте. Новые микропалеонтологические исследования, как и более ранние, не выявили в калтасинской микробиоте индекстаксонов позднего рифея, но показали преобладание в ее составе остатков микроорганизмов, характерных как для ниже-, так и для верхнерифейских отложений. Раннерифейский возраст калтасинской свиты был установлен с применением Re–Os метода ( $1414 \pm 40$  и  $1427 \pm 43$  млн лет; Sperling et al., 2014). Было также показано (Кэй и др., 2007), что низкие (0.7040) отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и почти инвариантные значения  $\delta^{13}\text{C}$  (0.5–2.0‰ V-PDB) в карбонатах калтасинской свиты из скв. 133 Азино-Пальниковская и скв. 203 Бедряжская не согласуются с этими показателями, характерными для средне- и верхнерифейских отложений, и сравнимы с изотопными характеристиками мезопротерозойских толщ с возрастом более 1300 млн лет (Семихатов и др., 2015). Кроме того, возраст дайки габбро-долерита (U–Pb (SHRIMP-II) метод по бадделеиту,  $1386 \pm 6$  млн лет; Puchkov et al., 2013), прорывающей отложения верхней подсвиты кабаковской свиты, перекрывающей карбонаты калтасинской свиты в скв. 1 Восточно-Аскинская, позволяет рассматривать не только калтасинскую, но кабаковскую свиту в составе нижнего рифея.

Важные выводы были получены при изучении фациальных особенностей калтасинской ассоциации микрофоссилий. Текстурно-структурные характеристики пород арланской подсвиты калтасинской свиты, содержащих данную ассоциацию микрофоссилий, указывают на сравнительно глубоководное ее положение (в пределах первых сотен метров). Установленный в ходе изотопно-геохимических исследований “мозаичный” характер распределения окисленных и анаэробных обстановок в раннерифейских бассейнах заставляет отказаться от существующей парадигмы эволюции биосферы Земли, предполагающей развитие в начале раннего протерозоя—конце до-

кембрия так называемого “сульфидного океана”, в котором кислород локализовался преимущественно в приповерхностном слое при глобальном сероводородном заражении и анаэробных условиях глубоководных его участков.

Комплексное изучение калтасинской микробиоты и сопоставление таксономического состава этой микробиоты с условиями ее обитания позволило объяснить парадокс сосуществования в раннем рифее крупных и сложно построенных эвкариотных форм, обитавших в окисленных обстановках, и комплекса мелких и морфологически простых прокариотных микроорганизмов, пользовавшихся распространением в анаэробных условиях.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность член.-корр. РАН В.Н. Пучкову (Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург), член.-корр. РАН А.Б. Кузнецову и Е.С. Зайцевой (ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург) за полезные замечания, которые помогли улучшить данную публикацию.

**Источники финансирования.** Исследования проведены в соответствии с планами научно-исследовательских работ ИГ УФИЦ РАН (тема гос. задания № 0252-2014-0002), при поддержке грантов РФФИ 17-55-45081\_ИНД, 17-05-00254 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 17.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоконь Т.В., Козлов В.И., Дулепов Ю.А., Коблова А.З., Козлова Е.В. Геохимия пород и флюидов додевонских отложений северо-востока Урало-Поволжья. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1991. 40 с. (Препринт).
- Вейс А.Ф., Ларионов Н.Н., Воробьева Н.Г., Ли Сень-Джо. Микрофоссилии в стратиграфии рифея Южного Урала и Приуралья // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2000. Т. 8. № 5. С. 3–28.
- Вейс А.Ф., Петров П.Ю., Воробьева Н.Г. Геохронологический и биостратиграфический подходы к реконструкции истории докембрийской биоты: новые находки микрофоссилий в рифее западного склона Анабарского поднятия // Докл. АН. 2001. Т. 378. № 4. С. 511–517.
- Горожанин В.М. Rb–Sr датирование неопротерозойских вулканитов по поствулканическому селадониту: скв. Кипчак 1, Серноводско-Абдулинский авлакоген // Материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии “Изотопные системы и время геологических процессов.” Тезисы докладов. СПб., 2009. С. 145–147.
- Козлов В.И., Муслимов Р.Х., Гатиятуллин Н.С., Генина Л.А., Сергеева Н.Д., Ларионов Н.Н., Михай-



- лов П.Н., Баранов В.В. Верхний докембрий восточных районов Татарстана и перспективы его нефтегазоносности. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 1995. 218 с.
- Козлов В.И., Вейс А.Ф., Сергеева Н.Д., Воробьева Н.Г., Генина Л.А., Михайлов П.Н. Литолого-петрографическая характеристика и микрофоссилии верхнедокембрийских отложений, вскрытых параметрической скважиной 133 Азино-Пальниковская в Удмуртии // Ежегодник 1996 (информационные материалы). Уфа: ИГ УНЦ РАН, 1998. С. 63–70.
- Козлов В.И., Иванова Т.В., Горохов И.М., Масгутов Р.Х., Сергеева Н.Д., Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Генина Л.А., Михайлов П.Н., Илеменова О.Д. Литолого-петрографическая характеристика и перспективы нефтегазоносности доверхнедевонских отложений, вскрытых скважиной 1 Леузинская (северо-восток платформенного Башкортостана). Уфа: УНЦ РАН, ООО “ИКБашНИПИнефть”; СПб.: ИГГД РАН, 2003. 40 с. (Препринт).
- Козлов В.И., Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Нехорошева А.Г., Бушарина С.В. Аршиний – новый стратон рифея в стратотипических разрезах Южного Урала // Геологический сборник № 9. Уфа: ДизайнПолиграф-Сервис, 2011. С. 3–8.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В. Новые данные по цирконовой геохронологии аршинских вулканитов (Южный Урал) // Литосфера. 2012. № 4. С. 127–140.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Крупенин М.Т., Горохов И.М., Маслов А.В., Каурова О.К., Эльмис Р. Формирование и преобразование карбонатных пород и сидеритовых руд бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал): Sr-изотопная характеристика и Pb–Pb возраст // Литология и полезн. ископаемые. 2005. № 3. С. 227–249.
- Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Семихатов М.А., Горохов И.М., Каурова О.К., Крупенин Т.М., Васильева И.М., Гороховский Б.М., Маслов А.В. Sr-изотопная характеристика и Pb–Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2008. Т. 16. № 2. С. 16–34.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Возможности стронциевой изотопной хемотратиграфии в решении проблем стратиграфии верхнего протерозоя (рифея и венда) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2014. Т. 22. № 6. С. 3–25.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Стронциевая изотопная хемотратиграфия: основы метода и его современное состояние // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2018. Т. 26. № 4. С. 3–23.
- Кэй Л.С., Крофорд Д.С., Бартли Д.К., Козлов В.И., Сергеева Н.Д., Пучков В.Н. С- и Sr-изотопная хемотратиграфия как инструмент для уточнения возраста рифейских отложений Камско-Бельского авлакогена Восточно-Европейской платформы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2007. Т. 15. № 1. С. 15–34.
- Пучков В.Н., Сергеева Н.Д., Карасева Т.В. Сводный литолого-стратиграфический разрез и оценка перспектив нефтегазоносности отложений верхнего докембрия Волго-Уральской области // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии, Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. Уфа: ДизайнПресс, 2016. № 11. С. 64–73. (Материалы и доклады XI Межрегиональной научно-практической конференции, посвященной 65-летию Института геологии УНЦ РАН, Уфа, 17–19 мая 2016 г.).
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Горохов И.М., Константинова Г.В., Мельников Н.Н., Подковыров В.П., Кутявин Э.П. Низкое отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в гренвилевском и постгренвилевском палеоокеане: определяющие факторы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2002. Т. 10. № 1. С. 3–46.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Маслов А.В., Горохов И.М., Овчинникова Г.В. Стратотип нижнего рифея – бурзянская серия Южного Урала: литостратиграфия, палеонтология, геохронология, Sr- и C- изотопные характеристики карбонатных пород // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 6. С. 17–45.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифея и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16–27.
- Сергеев В.Н. Окремненные микрофоссилии докембрия: природа, классификация и биостратиграфическое значение. М.: ГЕОС, 2006. 280 с.
- Сергеев В.Н., Семихатов М.А., Федонкин М.А., Воробьева Н.Г. Основные этапы развития докембрийского органического мира: Сообщение 2. Поздний протерозой // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2010. Т. 18. № 6. С. 3–33.
- Сергеев В.Н., Воробьева Н.Г., Сперлинг Э.А. Новые данные о ранней эволюции эукариотных водорослей: нижнерифейские (мезопротерозойские) ассоциации органостенных микрофоссилий Урала и Сибири // Водоросли в эволюции биосферы. Материалы II Палеоальгологической конференции. Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 2016. С. 152–153.
- Сергеев В.Н., Воробьева Н.Г., Петров П.Ю., Семихатов М.А. Таксономический состав и биостратиграфическое значение раннерифейской ассоциации органостенных микрофоссилий усть-ильинской свиты Анабарского массива, Северная Сибирь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25. № 3. С. 3–18.
- Сергеева Н.Д., Пучков В.Н. Стратиграфия рифея и венда Волго-Уральской области (изменения и дополнения) // Общая стратиграфическая шкала и методические проблемы разработки региональных стратиграфических шкал России. Материалы Межведомственного рабочего совещания, Санкт-Петербург, 17–20 октября 2016. Отв. ред. Толмачева Т.Ю. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2016. С. 157–159.
- Тимергазин К.Р. Очерки по истории башкирской нефти. Уфа: Башкнигоиздат, 1956. 91 с.
- Шонф Дж.В. Геологические доказательства оксигенного фотосинтеза и биотические изменения в ответ на “Великую кислородную революцию” 2400–2200 млн. лет назад // Биохимия. 2014. Т. 70. № 3. С. 223–238.

- Anbar A.D., Knoll A.H.* Proterozoic ocean chemistry and evolution: a bioinorganic bridge? // *Science*. 2002. V. 297. P. 1137–1142.
- Brasier M.D., Lindsay J.F.* A billion years of environmental stability and the emergence of eukaryotes: new data from northern Australia // *Geology*. 1998. V. 26. P. 555–558.
- Canfield D.E.* A new model for Proterozoic ocean chemistry // *Nature*. 1998. V. 396. P. 450–453.
- Gilly W.F., Beman J.M., Litvin S.Y., Robison B.H.* Oceanographic and biological effects of shoaling of the oxygen minimum zone // *Ann. Rev. Marine Sci.* 2013. V. 5. P. 393–420.
- Halverson G.P., Dudas F.O., Maloof A.C., Bowring S.A.* Evolution of the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  composition of Neoproterozoic seawater // *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.* 2007. V. 256. № 3/4. P. 103–129.
- Johnston D.T., Poulton S.W., Goldberg T., Sergeev V.N., Podkovyrov V., Vorob'eva N.G., Bekker A., Knoll A.H.* Late Ediacaran redox stability and metazoan evolution // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. V. 335–336. P. 25–35.
- Puchkov V.N., Krasnobaev A.A., Kozlov V.I., Sergeeva N.D.* New isotope ages of volcanics in the standard section of the Riphean and Vendian of the Southern Urals: consequences for stratigraphy and tectonics // *Materials for the IX Republican Conference on Geology and Environment*. Ufa: Institute of Geology, 2012. P. 52–56.
- Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R.E., Kozlov V.I., Krasnobaev A.A., Söderlund U., Wingate M.T.D., Postnikov A.V., Sergeeva N.D.* The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals // *Lithos*. 2013. V. 174. P. 109–124.
- Sergeev V.N.* The distribution of microfossil assemblages in Proterozoic rocks // *Precambrian Res.* 2009. V. 173. P. 212–222.
- Sergeev V.N., Knoll A.H., Vorob'eva N.G., Sergeeva N.D.* Microfossils from the lower Mesoproterozoic Kaltasy Formation, East European Platform // *Precambrian Res.* 2016. V. 278. P. 87–107.
- Shields G.A.* The marine carbonate and chert isotope records and their implications for tectonics, life and climate on the early Earth // *Earth's oldest rocks*. Eds. Van Kranendonk M.J., Smithies R.H., Bennett V.C. *Developments in Precambrian Geology*. 2007. V. 15. P. 971–983.
- Sperling E.A., Rooney A.D., Hays L., Sergeev V.N., Vorob'eva N.G., Sergeeva N.D., Selby D., Johnston D.T., Knoll A.H.* Redox heterogeneity of subsurface waters in the Mesoproterozoic ocean // *Geobiology*. 2014. V. 12. Iss. 5. P. 373–386.

Рецензенты Т.С. Зайцева, А.Б. Кузнецов, В.Н. Пучков

## AGE CONSTRAINTS AND STRATIGRAPHIC SIGNIFICANCE OF THE MICROBIOTES OF THE KALTASA FORMATION OF THE LOWER RIPHEAN OF THE VOLGO-URAL REGION

V. N. Sergeev<sup>1</sup>, M. A. Semikhatov<sup>1</sup>, N. G. Vorobyeva<sup>1</sup>, N. D. Sergeeva<sup>2</sup>, Sharma Mukund<sup>3</sup>, L. P. Baryshnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Geology, Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia*

<sup>3</sup> *Barbal Sahni Palaeobotanical Institute, Lucknow, India*

Based on previously obtained and new materials, the association of organ-walled microfossils represented by morphologically complex and large forms from the Kaltasa Formation is considered. In general, the Kaltasa microbiota resembles many associations of Neoproterozoic microfossils (late Riphean and Vendian). It was mistakenly interpreted as Late Riphean in its initial description, although the late Riphean index taxons were absent, and geological data indicated its early Riphean age. The early Riphean age of the Kaltasinskaya Formation has been confirmed in a series of studies in recent years using Re–Os, U–Pb and other modern methods of isotopic geochronology. Additionally, the low ratios of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and almost invariant  $\delta^{13}\text{C}$  values in the surrounding sediments are comparable with the isotopic characteristics of Mesoproterozoic strata that are older than 1300 million years. The use of geochemical methods using high-reagent iron (FeHR), as well as carbon and sulfur isotopes showed the presence of aerobic conditions during the deposition of relatively deep-water sediments of the Arlan Member of the Kaltasinskaya Formation (FeHR/FeT ratio <0.38). This contradicts the general concept of the existence of an anoxic ocean in the Mesoproterozoic, but explains the presence in the microbiota composition of morphologically complex and large eukaryotic forms that are widely distributed in oxygenic environments of the Neoproterozoic.

**Keywords:** Upper Proterozoic, Riphean, Vendian, isotopic age, General Riphean and Vendian Stratigraphic Scale of Russia.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-592X27536-45>