

БАКТЕРИАЛЬНАЯ ПАЛЕОНТОЛОГИЯ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

© 2023 г. А. Ю. Розанов^{а,*}

^аПалеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, Москва Россия

*E-mail: aroza@paleo.ru

Поступила в редакцию 21.07.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 20.08.2023 г.

В статье кратко отражён путь развития бактериальной палеонтологии. Автор описывает, как с усовершенствованием методов исследований подтверждались или опровергались выдвинутые ранее теории. Обращается внимание на роль древних бактерий в формировании осадочных пород, значение бактериальной палеонтологии для изучения возникновения и эволюции кор выветривания и палеопочв. Подчёркнута важность внедрения этой науки в программы вузов, что поможет привлечь к исследованиям молодых специалистов.

Ключевые слова: бактериальная палеонтология, осадочные породы, микроскопия, протисты, эукариоты, ископаемые.

DOI: 10.31857/S0869587323090104, **EDN:** BAZMPQ

Человечество уже давно осознало и доказало огромную роль бактерий на Земле. Если не считать историю изучения влияния бактерий в медицине, то реальное понимание их важности в формировании, например, осадочных горных пород стало складываться лишь в конце XIX в. Так, академик Н.И. Андрусов полагал, что серные месторождения и месторождения бурых железняков, несомненно, связаны с деятельностью бактерий. А о формировании осадочных пород писал ещё В.И. Вернадский: “В геологической истории Земли не удаётся обнаружить периода — сколь угодно древнего — когда образование всех известных для него осадков происходило бы заведомо абиогенным путём. Причём биосфера Земли сформировалась с самого начала как сложная система, с большим количеством видов организмов, каждый из которых выполнял свою роль в общей си-

стеме. Без этого биосфера вообще не могла бы существовать, то есть стойкость её существования была сразу обусловлена её сложностью” [1]. Аналогичной позиции придерживался академик Г.А. Заварзин [2].

Ряд исследователей при изучении древних осадочных пород находили в них образования, похожие на коккоидные бактерии. Например, А.Г. Вологдин обнаружил их в железистых кварцитах Курской магнитной аномалии. Во второй половине XX в. стали появляться публикации с описанием возможных древних органических остатков, обычно интерпретируемых как следы жизни без рассмотрения их реальной систематической принадлежности [3]. Существенный вклад в формирование картины развития органического мира в истории древней Земли внесли американские [4] и советские учёные. Последние (И.Н. Крылов, М.Е. Раабен, М.А. Семихатов и другие) создали выдающуюся школу строматолитчиков, которая, к сожалению, в настоящее время практически сошла на нет. Мощным стимулом к формированию бактериальной палеонтологии в 1970-х годах послужило широкое внедрение электронно-сканирующей и электронно-томографической микроскопии [5, 6]. Важным этапом стало применение этих методов при изучении метеоритов (углистых хондритов) [7, 8]. Первые результаты (например, определение возраста по ним подразделений рифея) весьма обна-



РОЗАНОВ Алексей Юрьевич — академик РАН, советник РАН.

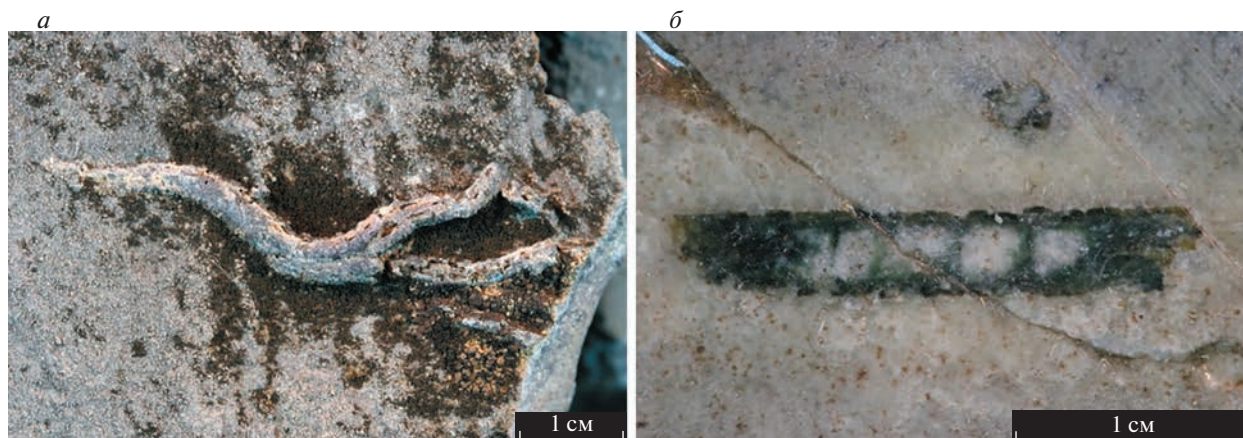


Рис. 1. Общий вид *Udokania* (а) и пришлифовка, на которой видны днища внутри трубки (б)

дѣживали, однако часто вызывали и довольно жѣсткую критику.

Среди наиболее выдающихся исследований в период перехода от оптической микроскопии к электронной следует отметить работы Ф. Вестала, М. Велша, Р. Гувера, а также российских учёных из Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН и Института микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН [8–12]. Полученные ими данные были необычными и сразу затронули сферы палеонтологии самых древних толщ Земли и палеонтологического изучения космического материала. Так, после публикации командой Д. Маккея [13] результатов исследования возможных обломков с Марса огромный интерес к этой проблеме проявили как российские, так и американские учёные. В конце 1990-х годов мы с Г.А. Заварзиним сформулировали новое научное направление — *бактериальную палеонтологию* [14]. В США на базе международного объединения учёных “Общество оптики и фотоники” (SPIE)

Р. Хувером была организована специальная секция астробиологии, а в России созданы лаборатории в ПИН им. А.А. Борисяка РАН и Совет по астробиологии РАН. Удалось поставить специальный курс бактериальной палеонтологии в МГУ. К 2002 г. опубликована первая книга “Бактериальная палеонтология”, второй том которой вышел в свет в 2021 г. [5, 6].

Разнообразные новые данные по бактериальной палеонтологии возбудили интерес к возобновлению поисков более сложных по сравнению с бактериями и протистами организмов, в том числе к оставленным ими следам (Trace Fossils). Следы движения или сверления сантиметровой размерности служат достаточно надёжным свидетельством существования целомат¹. Такие следы зафиксированы в отложениях возрастом 1.4 и 1.6 млрд лет [15]. Переосмыслены и стали подробнее изучаться многие образования, которые заведомо были эукариотами [16, 17]. Более того, многолетний спор о возникновении организмов рода *Udokania*² завершился в пользу их метазойного (целенторатного) происхождения (рис. 1).

В последнее время в районе происхождения *Udokania* в отложениях того же возраста описываются примитивные губки, что говорит о существовании кораллоподобных и губковых организмов уже 2 млрд лет назад (рис. 2). Данные находки интересны и с другой точки зрения: фактически они демонстрируют первую попытку построения скелета у метазоа (многоклеточных животных). В этих же отложениях возрастом чуть более 2 млрд лет из галек фосфоритов описаны очевидные празиофи-



Рис. 2. Губка из района и отложений того же возраста, где найдены *Udokania*

¹ Целоматы — трипобластные животные, обладающие целомом, то есть вторичной внутренней полостью, ограниченной третьей тканью, которая дифференцируется во время эмбрионального развития, — мезодермой. Именно в этой полости омывается большинство органов.

² В 1960-х годах в горах Удокана (север Забайкальского края и юго-запад Якутии) найдены ископаемые в виде трубочек в известняке. В 1965 г. эти образования впервые описал геолог А.М. Лейтес.

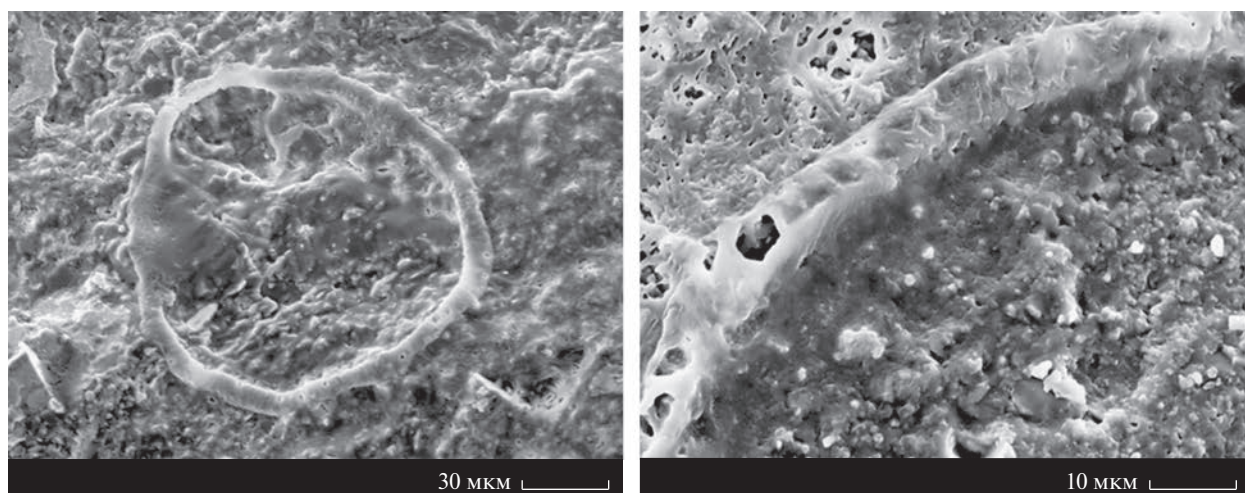


Рис. 3. Pechengia, 2,2 млрд лет

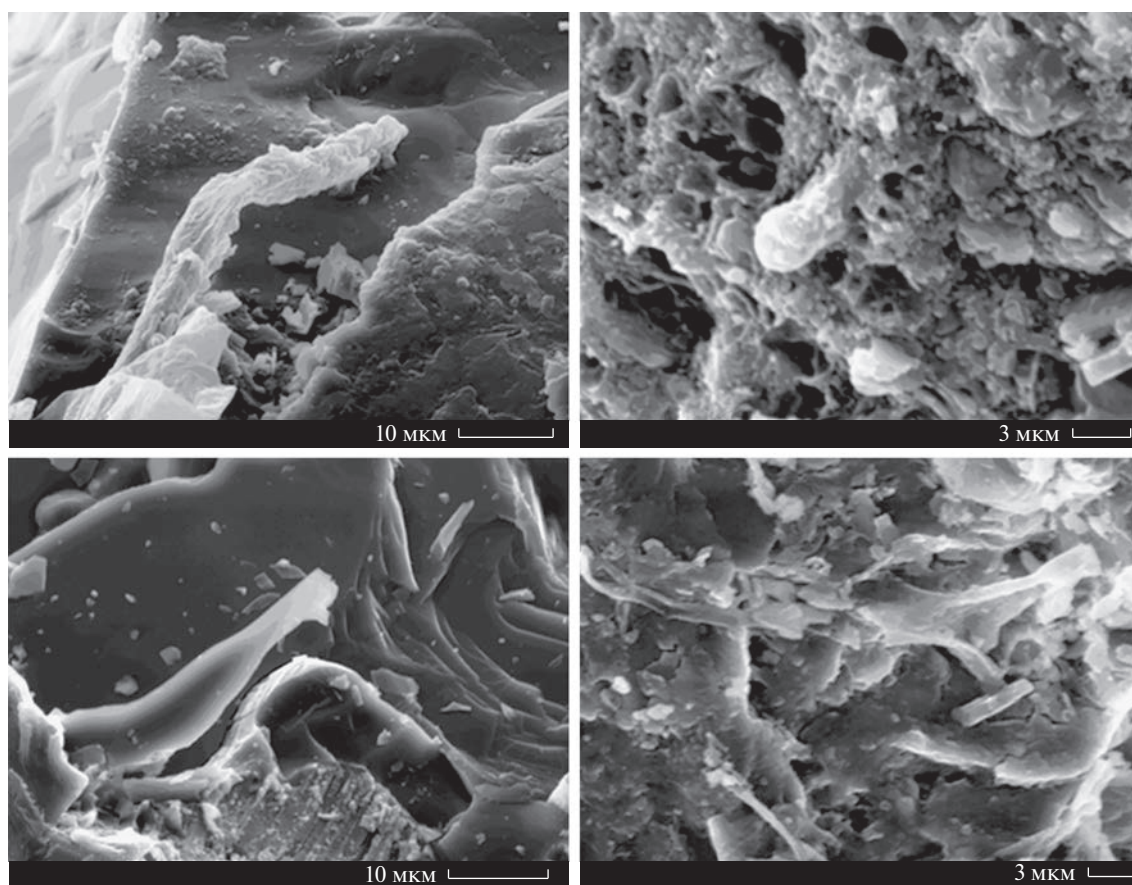


Рис. 4. Прокариоты, коры выветривания архея

ты (Pechengia, одноклеточные зелёные водоросли) [16] (рис. 3), а в корях выветривания³ архея

³ Кора выветривания — материнские породы верхней части литосферы (магматические, метаморфические или осадочные), преобразованные в континентальных условиях различными факторами выветривания.

Карелии [18] — многочисленные примитивные организмы неясной систематической принадлежности (прокариоты) (рис. 4). Кроме того, в этих же корях найдены ископаемые амёбы (рис. 5) по крайней мере двух разных видов [18], то есть эукариоты. Данные находки вновь повлекли дис-

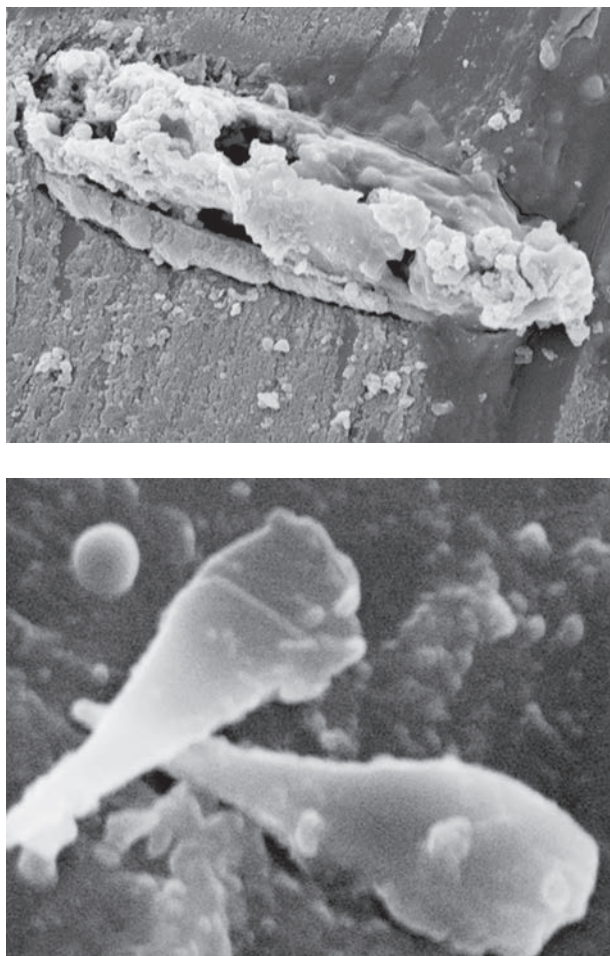


Рис. 5. Панцерные амёбы, коры выветривания

куссии о том, что имел место не выход организмов из моря на сушу, а наоборот.

На первом этапе становления электронно-микроскопической бактериальной палеонтологии особое внимание уделялось осадочным полезным ископаемым. Все изученные образцы продемонстрировали несомненное участие бактерий в их образовании. Здесь можно привести классический пример фосфоритов, которые послужили первым и главным источником информации об удивительной сохранности бактерий (составляющих основу этого вида сырья) в ископаемом состоянии. Как позже показали исследования, организованные Э. Школьником [10], мировые фосфориты всех возрастов формируются при активном участии биогенного, прежде всего бактериального фактора. Убедительные материалы получены также по бокситам, шунгитам, а самым интересным фактом можно считать установленное бактериальное происхождение ювелирных опалов Австралии. По аналогии с опалами А.М. Беляев и П.В. Юхалин предполагают участие бактерий в образовании моховых агатов [19].

Они же описывают находки “колониальных” прокариот из вулканогенно-осадочных пород возрастом 1.64 млрд лет [20]. Не менее ценны результаты исследования участия бактерий в формировании Томторского редкометалльного месторождения [21, 22].

Огромное значение имело изучение цианобактерий в гейзеритах Камчатки. Показано, что утверждение о хемогенной (в результате химических процессов) природе гейзеритов ошибочно. Оказалось, что их микроструктура неоднородна: в высокотемпературной части источников в районе грифонов (прорывов на поверхность) коллоидный кремнезём отлагается чисто хемогенным путём, а в области распространения термальных микроорганизмов — биогенным. Цианобактериальные маты служат своеобразной матрицей, по которой происходит ускоренная опализация в зоне смачивания термальными водами. Биоморфную структуру гейзеритов из разных термопроявлений Камчатки образуют многочисленные остатки фоссилизированных микроорганизмов, в первую очередь цианобактерий [23, с. 27, 28]. Крайне любопытные результаты получены и при исследованиях бактериальной активности в горячих источниках Исландии [5], что стимулировало дальнейшее изучение деятельности бактерий на и под поверхностью территорий с горячими источниками.

В дальнейшем бактериальная палеонтология, несомненно, будет играть большую роль в решении вопроса возникновения и эволюции древних кор выветривания и палеопочв [24]. Исключительная сохранность организмов микронной размерности, впервые показанная на примере бактерий фосфоритов озера Хубсугул (Монголия) [25] и многократно подтвердившаяся при изучении древних осадочных пород и ископаемых, содержащихся в метеоритах, привела к очень серьёзному выводу: организмы микронной размерности (особенно не имевшие скелета или оболочки спорополненнинового⁴ типа) прекрасно сохраняются. Можно предположить, что ранняя биосфера Земли была преимущественно бактериально-протистовой, достаточно устойчивой и жизнеспособной во времени из-за огромной скорости размножения этих организмов.

Многочисленные исследования углистых хондритов (метеоритов) показали, что они содержат в основном фоссилизированные остатки различного рода бактерий и протистов, среди которых встречаются празиофиты (зелёные водоросли) и альвеолиты (надтип протистов, объединяющий ряд таксономических групп, в том числе инфузрий, споровиков и динофлагеллят) [26, 27]. Как

⁴ Спорополленин — химически стойкое высокополимерное вещество, нерастворимое в органических растворителях и не изменяющееся при воздействии минеральных (неорганических) кислот и щелочей.

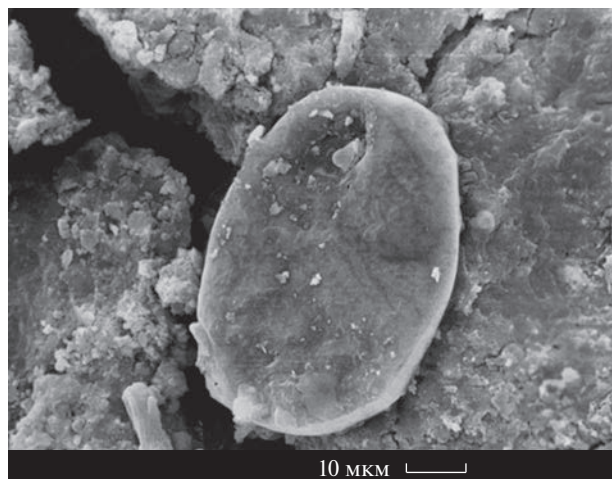


Рис. 6. Альвеолиты, метеорит Оргей

ни парадоксально, метеоритная и архейско-раннепротерозойская микронная биота изучена лучше, чем более молодая. Поэтому нам, вероятно, необходимо переосмыслить ещё и особенности развития биосферы позднего докембрия и фанерозоя (рис. 6, 7). Конечно, не следует забывать, что ранее сделанные находки в архее, протерозое и метеоритах нуждаются в уточнении их систематической принадлежности.

Бактериальная палеонтология позволяет принципиально корректировать палеогеографические построения. Один из ярких результатов представлен в статье [14]. В этом контексте уместно привести сравнительные характеристики палеогеографии в раннем кембрии (рис. 8).

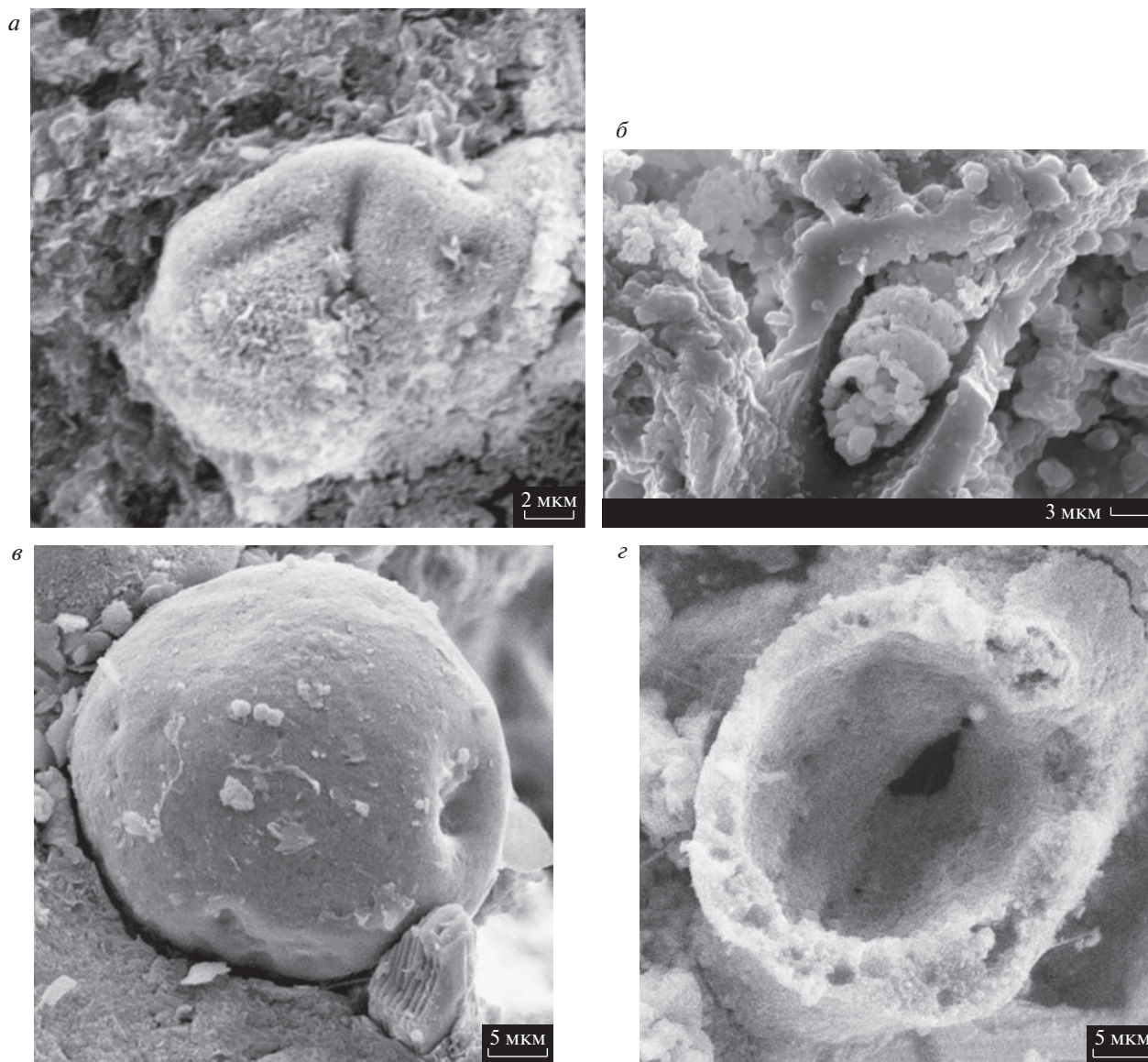


Рис. 7. Ископаемые остатки организмов в метеорите Оргей

а — спороподобное образование, диаметр 6–7 мкм; б — спиралеобразный *Obruchivela*-подобный организм; в — *Tasmanites*-подобный празиофит; з — празиофит, напоминающий *Pechengia*

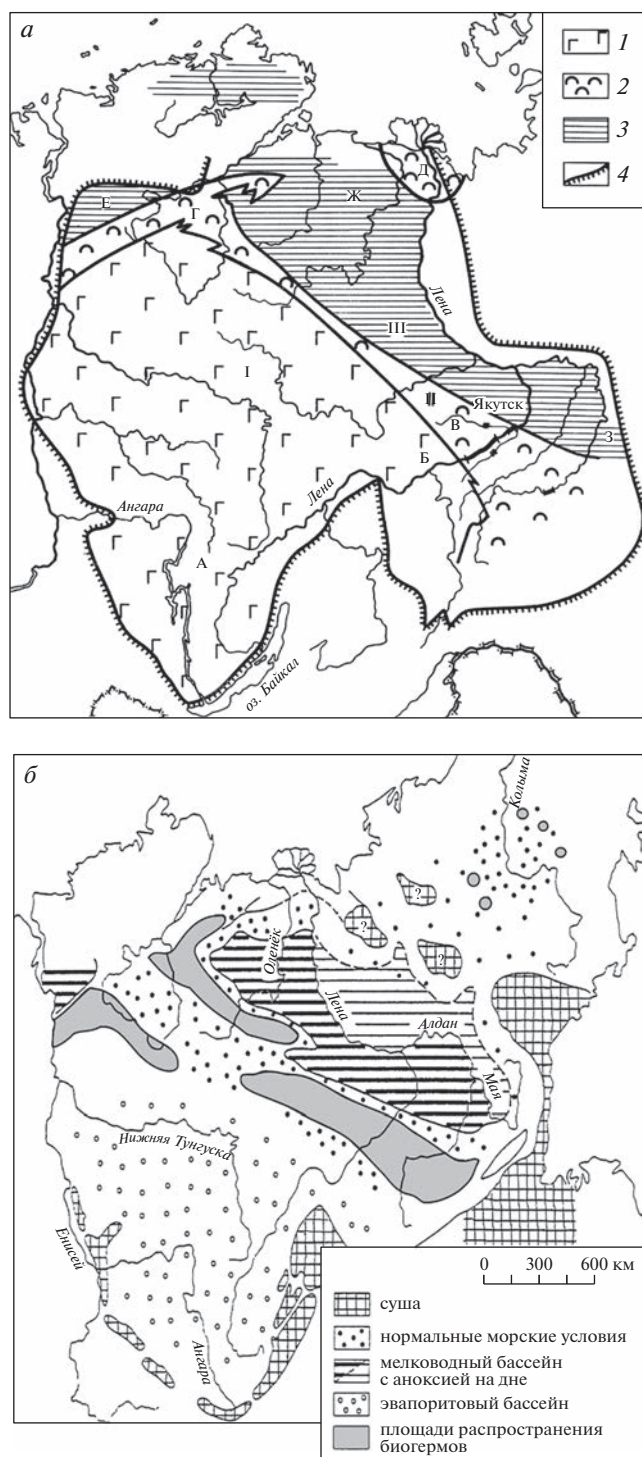


Рис. 8. Палеогеография Сибирской платформы в раннем кембрии
 а — традиционная трактовка (по В.Е. Савицкому и В.А. Асташкину): 1 — отложения лагунного типа; 2 — рифогенные отложения; 3 — доманиковые отложения шельфа открытого моря; 4 — граница Сибирской платформы; б — после обнаружения цианобактериальных матов (по А.Ю. Розанову и Г.А. Заварзину)

Другой важнейший итог работы в области бактериальной палеонтологии — возможность приблизительно представить общую картину разви-

тия органического мира в докембрийское время. Так, с появлением достоверных осадочных пород возрастом около 4 млрд лет было зафиксировано существование (согласно изотопным данным М.В. Шидловского), вероятно, красных водорослей, а может, и зелёных водорослей ганфлинского типа. Многочисленные находки описаны на основе материалов из Австралии и Южной Африки (3.3–3.4 млрд лет) [3, 28], которые в ранних работах обычно характеризуются как следы жизни или артефакты. Сегодня благодаря большому объёму исследований с помощью бактериально-палеонтологических методов в этих образцах можно уверенно распознать разные эукариотические организмы.

М.М. Астафьева зафиксировала и описала цианобактериальные образования в архейских породах Курской магнитной аномалии [29]. Можно предположить, что и древние архейские строматолиты, описанные разными авторами [26, 30], вероятно, тоже свидетельствуют о достаточно широком распространении цианобактериальных образований. Кроме того, детальное изучение материалов, связанных с так называемой большой оксигенизацией атмосферы (приблизительно 2.5 млрд лет назад), доказывает, что традиционные представления, попавшие в учебники всех стран, не подтверждаются.

Как отмечалось выше, обосновано представление о появлении несомненных метазоа не позднее 2 млрд лет назад, а дополнительное тщательное изучение следов, оставленных древними организмами, показало, что целоматные организмы появились не позднее, чем 1.6 млрд лет назад [15, 26]. Это подтверждается публикациями по акритархам⁵, в частности, при повторном обращении к коллекции Б.В. Тимофеева и его книге “Микрофитофоссилии раннего докембрия” [31]. К сожалению, ранее в его результаты никто не поверил. Эта информация также хорошо согласуется с данными по хемофоссилиям, следы метазоа в которых были датированы 2 млрд лет. Следует отметить, что биохимические данные нефтяников также не противоречат этому факту.

Сегодня уже не подвергается сомнению огромная роль бактерий и протистов в формировании осадочных полезных ископаемых (включая докембрийские) и доказана полная состоятельность убеждений В.И. Вернадского. Но всё вышесказанное подтверждает необходимость проведения специальных исследований, способствующих биостратиграфическому обоснованию корреляции осадочных толщ докембрия, с которыми в Сибири, вероятно, связаны огромные запасы углеводородов (рис. 9).

⁵ Акритархи — кажущиеся одноклеточными ископаемые остатки микроскопических организмов, на самом деле — настоящие эукариоты.

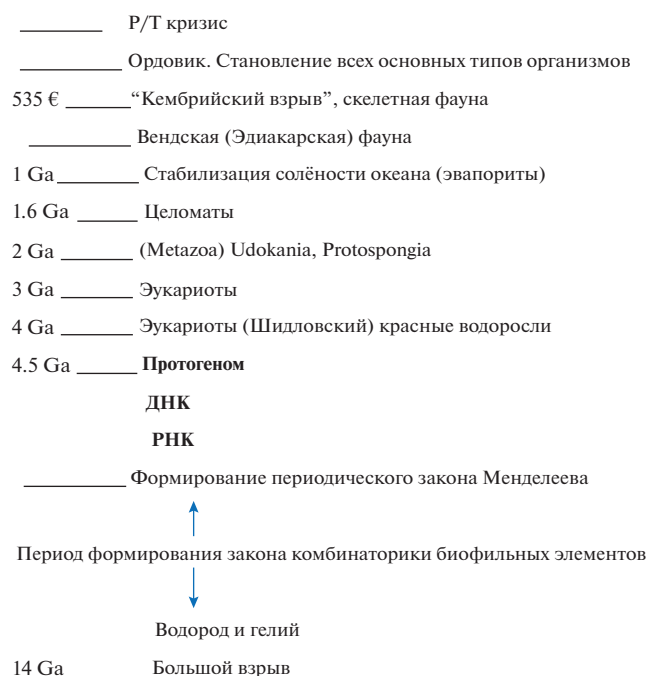


Рис. 9. Схема последовательности важнейших биотических событий в истории Земли

С зарождением бактериальной палеонтологии открылись потенциально перспективные возможности палеонтологического и, соответственно, биостратиграфического изучения древних толщ. Подтверждением раннего появления эукариот на Земле служат результаты исследования их фоссилизованных остатков на других телах планетного типа возрастом старше Земли (метеорит Оргей) [27].

Для решения задачи корреляционной качественной сопоставимости с палеозоем, что можно осуществить в течение 10–15 лет, необходимо подготовить предложения по планомерному систематическому изменению образовательной системы. Важно прививать интерес к электронно-микроскопическим и томографическим исследованиям у школьников и студентов. Естественно, это потребует налаживания кооперации вузов с научными учреждениями, дооснащения их соответствующей аппаратурой. Надо вводить специальные курсы в вузах и восстановить специальность “геологическая съёмка”. В курсы палеонтологии должны быть включены разделы по микронным объектам палеонтологического толка.

В связи с новизной предлагаемых приёмов изучения древних пород возникает потребность в разработке ряда методических рекомендаций, которые следует опубликовать в виде возможных наставлений: по примеру опубликованных в 1950–1960-е годы по отдельным группам фауны и

флоры, которые послужили прекрасным подспорьем для работающих на геологической съёмке и любых стратиграфических работах. Подготовку таких материалов должны взять на себя учреждения, где подобная деятельность уже налажена. Безусловно, на первых порах необходимы регулярные совещания и семинары для формирования единообразной методики исследования. Стоит попробовать организовать подготовку новых учебных пособий, учитывающих хотя и фрагментарный, однако новый и важный комплекс добытых за последнее время знаний. Кроме того, палеонтологам и стратиграфам, нужно провести тщательный анализ состояния реально действующих кадров и выявить лакуны, которые образовались в результате деградации организационной структуры и разрушения науки в учреждениях РАН и вузах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Мысль, 1967.
2. Заварзин Г.А. Планета бактерий // Вестник РАН. 2008. № 4. С. 328–336; Zavarzin G.A. A Planet of Bacteria // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2008. № 2. P. 144–151.
3. Wacey D. Early Life on Earth. Springer, 2009.
4. Earth's biosphere, its origin and evolution / Ed. by J.W. Schopf. Princeton: Princeton Univ. Press, 1983.
5. Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2002.
6. Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2021.
7. Герасименко Л.М., Жегалло Е.А., Жмур С.И. и др. Бактериальная палеонтология и исследования углистых хондритов // Палеонтологический журнал. 1999. № 4. С. 103–125.
8. Астафьева М.М., Герасименко Л.М., Гейтнер А.Р. и др. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Науч. ред. А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. М.: ПИН РАН, 2011.
9. Astafieva M.M., Rozanov A.Yu., Hoover R.B. Multicellular algae from Lower Proterozoic (2.45 Ga) weathering crusts of Kola Peninsula // Proc. SPIE. 2011. V. 8152. 815204-1-815204-10.
10. Школьник Э.Л., Тяньфу Т., Еганов Э.А. и др. Природа фосфатных зёрен и фосфоритов крупнейших бассейнов мира. Владивосток: Дальнаука, 1999.
11. Сергеев В.Н., Семихатов М.А., Федонкин М.А. и др. Основные этапы развития докембрийского органического мира: сообщение 1. Архей и ранний протерозой // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2007. № 2. С. 25–46.
12. Розанов А.Ю. Псевдоморфозы по микробам в метеоритах // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009.
13. McKay D.S., Gibson E.K., Thomas-Keptra J. et al. Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001 // Science. 1996. V. 273. P. 926–930.
14. Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. Бактериальная палеонтология // Вестник РАН. 1997. № 3. С. 241–245;

- Rozanov A. Yu., Zavarzin G. A.* Bacterial Paleontology // Herald of the Russian Academy of Sciences. 1997. № 2. P. 109–113.
15. *Kauffman E. G., Steidtmann J. R.* Are these the oldest metazoan trace fossils? // J. Paleontol. 1981. № 5. P. 923–947.
 16. *Розанов А. Ю., Астафьева М. М.* Празинофиты (зелёные водоросли) из нижнего протерозоя Кольского полуострова // Палеонтологический журнал. 2008. № 4. С. 90–93.
 17. *Розанов А. Ю.* Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы // Палеонтологический журнал. 2003. № 6. С. 41–49.
 18. Биogeография и эволюционные процессы // Материалы LXVI сессии ВПО. 2020. С. 349.
 19. *Беляев А. М., Юханин П. В.* Древняя глубинная биосфера Земли // Труды LXIX сессии ВПО. 2023. С. 14–16.
 20. *Беляев А. М., Юханин П. В.* Находки микрофоссилий колониальных прокариот в кремнистых породах хугландской вулканогенно-осадочной формации (1640 млн лет) // Труды LXVII сессии ВПО. 2021. С. 12–14.
 21. *Жегалло Е. А., Розанов А. Ю.* Редкоземельно-ниобиевые руды Томтора // Бактериальная палеонтология / Под ред. А. Ю. Розанова. М.: ПИН РАН, 2021.
 22. *Жмур С. И., Кравченко С. М., Розанов А. Ю., Жегалло Е. А.* О генезисе богатых редкоземельно-ниобиевых руд Томтора (север Сибирской платформы) // ДАН. 1994. № 3. С. 372–375.
 23. *Жегалло Е. А., Зайцева Л. В., Карпов Г. А., Самылина О. С.* Современная фоссилзация и гейзериты Камчатки // Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2021.
 24. *Алексеев А. О., Алексеева Т. В.* Астропедология и палеопочвенные архивы Земли. Тезисы докладов // 4-я Всероссийская конференция по астробиологии. Пушкино, 2023. С. 7–9.
 25. *Розанов А. Ю., Жегалло Е. А.* К проблеме генезиса древних фосфоритов Азии // Литология и полезные ископаемые. 1989. № 3. С. 67–82.
 26. Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009.
 27. Метеорит Оргей (атлас микрофоссилий) / Отв. ред. А. Ю. Розанов. М.: ОИЯИ, 2020.
 28. Fossil and Recent Biofilms. A Natural History of Life on Earth / Ed. by W. E. Krumbein, D. M. Paterson, G. A. Zavarzin. KLUWER, 2003.
 29. *Астафьева М. М.* Железистые кварциты (джеспилиты) // Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН, 2021.
 30. *Hofmann H. J.* Archaean stromatolites as microbial archives // Microbial sediments. Berlin: Springer, 2000.
 31. *Тимофеев Б. В.* Микрофитофоссилии раннего докембрия. Л.: Наука, 1982.

BACTERIAL PALEONTOLOGY TODAY AND TOMORROW

A. Yu. Rozanov^{1, #}

¹The Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]E-mail: aroza@paleo.ru

The history of bacterial paleontology is outlined. The author describes how the refinement of methods has lead to confirmation or rejection of proposed hypotheses. The role of ancient bacteria in the genesis of sedimentary rocks and the importance of bacterial paleontology for understanding the origin and evolution of weathering rinds and paleosols are emphasized. Incorporating this discipline into university curricula is important to attract young researchers to this field of study.

Keywords: bacterial paleontology, sedimentary rocks, microscopy, protists, eukaryotes, fossils.