

УДК 563.14:56.012

ФОССИЛИЗАЦИЯ СКЕЛЕТОВ РАДИОЛЯРИЙ

© 2014 М.С. Афанасьева, Э.О. Амон

Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН
afanasieva@paleo.ru, amon@paleo.ru

Анализируются вопросы фоссилизации скелетов радиолярий. Полная деструкция первичной органической матрицы скелета и различные условия литогенеза, с одной стороны, вызывают распад скелетов на отдельные составляющие, а с другой – благоприятствуют срастанию соседних минеральных единиц и реализации «стремления» кремнезема к структурному совершенству в последовательном ряду: глобулярный опал → опал-СТ → низкотемпературный тридимит → низкотемпературный кварц. Процесс трансформации глобулярного опала в опал-СТ и кварц контролируется температурой и временем, что позволяет судить о соответствующих условиях постседиментационных процессов: седиментогенез → диагенез → ранний катагенез → поздний катагенез. Большое внимание уделено явлению пиритизации скелетов в условиях сероводородного заражения. Показано вторичное замещение кремнезема в скелетах радиолярий иными минералами.

Ключевые слова: Radiolaria, фоссилизация, вторичное замещение кремнезема, пиритизация, этапы литогенеза.

ВВЕДЕНИЕ

Широко распространенная в литосфере минеральная трансформация «органогенный опал → кварц» происходит, преимущественно, в твердой фазе. Скорость преобразования кремнезема различного генезиса в значительной мере зависит как от температуры, так и от условий захоронения, в том числе от потери воды органической матрицы скелетов, тектоники региона, вулканической деятельности, химизма среды. Но, по мнению ряда

исследователей, для открытых геологических систем наиболее актуальным является не температурный параметр, а геологическое время (Химичева, Плюснина, 1989).

Параметр геологического времени неоспорим при рассмотрении трансформации кремнезема химического генезиса. Однако при изучении изменения кремнезема в скелетах организмов данное правило «не работает» или соблюдается не всегда, ибо встречаются прекрасно сохранившиеся «древние» скелеты радиолярий с первично-глобулярной структурой скелета в палеозойских отложениях (Афанасьева, 1990, 2000) и «молодые» сильно изменившиеся раковины, вплоть до полного уничтожения первичной структуры скелетов, в кварцевой зоне эоцена (Витухин, 1990).

С другой стороны, хорошо известно, что кварц является «геологическим термометром» позволяющим судить о температуре природного процесса минералообразования. Для этого используются полиморфные превращения кремнекислоты, которая при температуре ниже 575 °С и при давлении 1 атм в гидротермальных жилах кристаллизуется в виде низкотемпературного тригонального кварца, образующего длинновытянутые кристаллы, а при более высоких температурах образуется высокотемпературный гексагональный кварц (кварц большинства магматических пород).

Вместе с тем, настоящая прижизненная кристаллизация кремнезема (подобно формированию кварца в минеральном мире) в скелетах радиолярий невозможна, т. к. межглобулярная органическая матрица сдерживает рост кристаллов¹. Поэтому при изучении измененных скелетов радиолярий однозначно выявляется связь между постседиментационными стадиями преобразования кремнезема и палеотемпературами. И поскольку процесс изменения кремнезема в последовательном ряду: глобулярный опал → опал-СТ → тридимит → кварц, обратного движения не имеет, то каждая модификация кремнезема скелетов отражает максимальные значения термобарического влияния на породу в постседиментационных условиях.

Таким образом, ускорение процессов трансформации кремнезема за счет давления и температур с учетом параметра геологического времени, безусловно, имеет место в кремневых объектах любого генезиса. На этом основано наше утверждение о приуроченности скелетов радиолярий с полностью измененной структурой скелета (вплоть до кристаллов кварца) к зонам катагенеза и метаморфизма.

¹ Подробно вопросы биоминерализации скелетов радиолярий рассмотрены в работах: Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990, 2006; Афанасьева, Амон, 2006, и в статье Афанасьева, Амон «Биоминерализация скелетов радиолярий» настоящего сборника.

МОДЕЛЬ ФОССИЛИЗАЦИИ СКЕЛЕТОВ РАДИОЛЯРИЙ

Сохранение и разрушение скелетов радиолярий в ископаемом состоянии связано с изменением характера взаимоотношений органической и минеральной составляющей скелета. Переход скелетов живых организмов в ископаемое состояние представляет собой непрерывный процесс, зависящий от геологической обстановки.

На избирательную сохранность скелетов радиолярий влияют фактор перехода скелета из водной среды в донный осадок и дальнейшие процессы литогенеза, которые продолжаются в течение всего времени пребывания фоссилий сначала в составе донных осадков на стадии седиментогенеза, затем в литифицированных отложениях периода диагенеза и вплоть до физико-химически измененных пород этапов катагенеза (Кеннетт, 1987; Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006). Причина подобного явления заключается, по-видимому, в изменении характера взаимоотношений органического и минерального компонентов в процессе фоссилизации скелета.

Постепенное преобразование остаточной органической матрицы сопровождается, с одной стороны, ее полной деструкцией и, как следствие, распадом скелетов на отдельные структурные элементы, а с другой – дублированием, обугливанием органических ламелл, увеличивающим прочность раковин. При этом из сложной конструкции проводящих каналов измененная органическая матрица превращается в систему разграничивающих ламелл, удельный вес которых в объеме фоссилизированного скелета не превышает 1 % (Голубев, 1981).

Дальнейшее практически полное разрушение обугленных ламелл благоприятствует срастанию соседних мелких минеральных единиц в более крупные, что отвечает, вероятно, твердофазному диффузионному процессу (Голубев, 1981), происходившему в условиях повышенных температур и давления в течение длительного периода геологического времени. Однако это обстоятельство совершенно не учитывается и не отмечается при палеонтологическом изучении органических остатков.

Полная деструкция первичной органической матрицы скелета и различные условия литогенеза, с одной стороны, вызывают распад скелетов на отдельные составляющие, а с другой – благоприятствуют срастанию соседних минеральных единиц и реализации «стремления» кремнезема к структурному совершенству в последовательном ряду: глобулярный опал → опал-СТ → низкотемпературный тридимит → низкотемпературный кварц (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; Bohrmann et al., 1994; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006). Процесс трансформаций глобулярного опала в опал-СТ и кварц контролируется температурой и временем (табл. 1). Для полной трансформации глобулярного опала в

Таблица 1. Трансформация кремнезема в скелетах радиолярий и постседиментационные условия преобразования осадочных пород

Модификации кремнезема в скелетах радиолярий и палеотемпературы		Стадии литогенеза		
глобулярный опал	+20°C	седиментогенез		
опал-СТ	+40°C	диагенез		
		+30°C		
призматический низкотемпературный тридимит	+120°C	катагенез	ранний	+50°C
				+100°C
			поздний	+150°C
дипирамидально-призматический низкотемпературный кварц	> +180°C			
> +200°C				

кварц необходимо 30–40 млн. лет в зонах с высокой степенью седиментации и 60-70 млн. лет в зонах со средней степенью (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; De Wever et al., 1994; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006). Трансформация кремнезема в скелетах радиолярий на стадиях диагенеза и катагенеза позволяет судить о постседиментационных условиях преобразования осадочных пород (табл. 1).

Скелетные остатки организмов в процессе фоссилизации постоянно находятся под воздействием температуры, давления и времени. Теоретически и экспериментально установлено (Сеньковский, 1977; Голубев, 1981; Логвиненко, Орлова, 1987; Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; Архипенко и др., 1996; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006), что интенсивность изменений минералов в осадочных породах и скелетных остатках организмов, при прочих равных условиях, зависит от длительности геологических процессов: даже самые незначительные изменения минеральной составляющей скелетов, происходящие с ничтожной скоростью, если они продолжаются достаточно долго (в геологическом масштабе времени), могут привести к ощутимым результатам. С другой стороны, те же изменения минералов могут проявиться при кратковременном, но сильном воздействии температур: согласно эмпирическому правилу Вант-Гоффа, повышение температуры системы на 10 °C увеличивает скорость протекания реакции в 2–4 раза (Киреев, 1951).

Для сравнения прочности скелетов современных и позднепалеозойских радиолярий и с целью примерного моделирования начальных стадий вторичного изменения скелетов был использован метод высокотемпературного отжига. Отжиг в некоторой степени моделирует изменения, которые могли происходить в процессе фоссилизации скелетов в геологическом масштабе времени (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006). Отжиг, т. е. высокотемпературное прокаливание скелетов радиолярий, проводился: 1) на воздухе при температуре около 500 °С в течение 48 ч, на подложке из стандартного кварцевого лабораторного стекла; 2) в муфельной печи при температуре около 1000 °С в течение 25 ч, в стандартных лабораторных тиглях.

Седиментогенез

Вторичное преобразование скелетов радиолярий в естественных условиях и при искусственном отжиге может быть связано с нарушением характера взаимоотношения органической и минеральной составляющих скелета. Эти изменения начинаются с разрушения самых тонких органических ламелл, окружающих наименьшие структурные элементы скелета.

Остаточная, неминерализованная, органическая матрица, по-видимому, представляла собой «консервирующее» вещество, способствовавшее сохранению в латентном состоянии первичной структуры рентгено-аморфного опала в течение стадии седиментогенеза при температурах не более 20 °С и на глубинах недр земли до 1000 м (Мельник и др., 1973; Сеньковский, 1977; Голубев, 1981, 1987; Вассоевич, 1986, 1990; Логвиненко, Орлова, 1987).

После смерти организма и распада цитоплазмы клетки нефоссилизированные раковины радиолярий сохранили свою форму только благодаря «цементации» глобул кремнезема органическими ламеллами, которые препятствовали контакту и слиянию соседних минеральных единиц (табл. I).

Диагенез

Глобулярный аморфный опал раковин радиолярий, находящийся в латентном состоянии в период седиментогенеза, трансформируется в глобулярный опал-СТ в процессе диагенеза. Повышение температуры недр (на глубинах 1000–1500 м) в течение диагенеза до 20–40 °С в совокупности с длительным периодом геологического времени, вероятно, способствовало началу изменения остаточной органической матрицы, находившейся в достаточно инертном состоянии при температурах до 20 °С.

Вторичное преобразование скелетов радиолярий в естественных условиях и при искусственном отжиге может быть связано именно с нарушением характера взаимоотношения органической и минеральной составляющих скелета. Эти изменения начинаются с разрушения самых тонких органических ламелл, окружающих наименьшие структурные элементы скелета. Поверхностный тонкий слой эпривитриума начинает разрушаться

первым, обнажая более крупнозернистую поверхность скелетов (Bjørklund, Goll, 1986). Примером этому могут служить радиолярии из естественных верхнепалеозойских обнажений, отличающиеся хорошо сохранившейся глобулярной структурой скелетов (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006) (табл. I, фиг. 1–4; табл. II, фиг. 1–4; табл. III, фиг. 1–5).

В результате искусственного отжига (25 часов в муфельной печи в стандартных лабораторных тиглях при температуре 1000 °С) скелетов современных радиолярий *Heliodiscus asteriscus* Haeckel, *Dictyocoryne profunda* Ehrenberg и *Spongaster tetras* Ehrenberg произошло расширение пор скелетов и отделение слоев с наружной поверхности скелета, что привело к истончению его стенок (табл. IV, фиг. 3–5; табл. V, фиг. 3–5, 9–11). С этим же, по-видимому, связано явление, когда в сходных условиях тонкостенные мелкие раковины разрушаются, а у крупных скелетов наблюдается только изменение характера скульптуры.

Ранний катагенез

На ранней стадии катагенеза в условиях повышения температур от 40 до 120 °С в недрах земли на глубинах 1500-4000 м может происходить преобразование биогенного глобулярного опала-СТ скелетов радиолярий в призматические таблички низкотемпературного тридимита (Сеньковский, 1977; Вассоевич, 1986, 1990; Логвиненко, Орлова, 1987). Данное явление, по-видимому, обусловлено изначальным присутствием в сложной структуре органической матрицы полисахаридных пластин². Гексагональное очертание этих пластин и система их вертикального расположения, перекликающаяся с характером чередования слоев в упаковке тридимита, вероятно, способствует образованию таблитчатых элементов ультраструктуры скелета **В**, которые, в свою очередь, в условиях повышенных температур ранней стадии катагенеза могут трансформироваться в призматические таблички низкотемпературного тридимита (табл. II, фиг. 5, 6).

Эмпирических данных о последовательных стадиях фоссилизации любых скелетных остатков просто не существует. Однако при длительном отжиге (48 часов) при температуре 500°С на подложке из лабораторного кварцевого стекла наблюдалась вторичная кристаллизация части скелетов современных *Heliodiscus echiniscus* Haeckel (табл. IV, фиг. 9–11) и раннепермских *Bientactinosphaera strangulata* (Nazarov et Ormiston) (табл. II, фиг. 5–8). Первичный глобулярный опал и опал-тридимит скелетов этих радиолярий был вторично замещен призматическими табличками низкотемпературного тридимита.

Нахождение в естественных отложениях позднепалеозойского возраста раскристаллизованных скелетов радиолярий подтвердило эксперимен-

² См. сноску 1.

тальные данные. Сравнительный анализ раннепермских *Bientactinosphaera strangulata* (Nazarov et Ormiston), *Ruzhencevispongus plumatus* Nazarov et Ormiston, *Copicyntra acilaxa* Nazarov и раннекаменноугольных представителей рода *Caspiaza* (*C. aculeata* Afanasieva, *C. urceus* Afanasieva) из верхнепалеозойских отложений северного борта Прикаспийской впадины и естественных обнажений Южного Урала и Тянь-Шаня показало существенные отличия в характере и степени сохранности их скелетов. Радиолярии из естественных обнажений, характеризующих стадию диагенеза, имеют, как правило, раковину с хорошо сохранившейся глобулярной структурой скелета (табл. I, фиг. 1–4; табл. II, фиг. 1–4; табл. III, фиг. 1–5). Плохая сохранность скелетов радиолярий, отобранных из верхнепалеозойских отложений Северного Прикаспия с глубин 3000–4000 м, связана, скорее всего, со вторичными изменениями структуры скелетов в условиях ранней стадии катагенеза (табл. I, фиг. 5–8).

Поздний катагенез

Дальнейшая трансформация призматического низкотемпературного тридимита в структурно более совершенные дипирамидально-призматические кристаллы низкотемпературного кварца, возможно, происходила в течение поздней стадии катагенеза при температурах выше 120 °С, т.е. за порогом устойчивости низкотемпературного тридимита, что наблюдается в естественных условиях в недрах Земли на глубинах более 4000 м (Сеньковский, 1977; Вассоевич, 1986, 1990; Логвиненко, Орлова, 1987) или в результате метаморфизма древних отложений в зонах глубинных разломов (Braun, Amon, 1991; Афанасьева, Амон, 2012, 2013).

В постседментационных процессах литогенеза в течение длительного геологического времени (сотни миллионы лет) радиолярии перестают вести себя как представители биосферы (органическая матрица их скелетов к этому времени уже давно разрушена) и становятся объектами литосферы. В условиях диагенеза и катагенеза скелет может быть полностью растворен (выщелочен) или подвергнуться перекристаллизации, или метасоматозу.

Удручающе плохая сохранность и перекристаллизация скелетов вплоть до образования удлинённых дипирамидально-призматических кристаллов низкотемпературного кварца является отличительной особенностью радиолярий девона из зоны зеленокаменного метаморфизма Южного Урала и Западных Мугоджар (Афанасьева, Амон, 2013) и каменноугольных–раннепермских радиолярий из кернов скважин глубокого бурения Северного Прикаспия (глубины 4000–6000 м) (табл. I, фиг. 9–12) (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; Afanasieva et al., 2005; Афанасьева, Амон, 2006).

Габитус кристаллов кварца определяется шестигранной призмой и двумя ромбоэдрами, грани которых комбинируются на обеих головках в две характерные «пирамидки». В процессе вторичного преобразования структуры скелета кристаллы одним концом прикреплены к стенке скеле-

та радиолярий и поэтому имеют только одну головку. Как правило, грани головки нарастают быстрее призмы, и получаются кристаллы вытянутого облика – от короткопризматического до игольчатого (табл. I, фиг. 9). Реже случается наоборот: быстрее растет призма. Тогда преобладающими становятся грани ромбоэдров (табл. I, фиг. 12).

Выше уже говорилось, что срастание кристаллических единиц в результате разрушения обугленных органических ламелл отвечает твердофазному диффузионному процессу, который имеет большое значение на стадии катагенеза, но не учитывается при палеонтологическом исследовании фоссилий. Однако на основании изучения раскристаллизованных остатков скелетов радиолярий из кернов скважин глубокого бурения и, принимая во внимание результаты высокотемпературного отжига раковин, можно говорить о чисто твердофазных изменениях структуры скелета. Длительный отжиг раковин позднепалеозойских радиолярий при температуре 1000 °С в муфельной печи вызвал «оплывание» глобулярной поверхности скелетов *Biantactinosphaera strangulata* (Nazarov et Ormiston) (табл. II, фиг. 9–11) и *Ruzhencevispongia plumatus* Nazarov et Ormiston (табл. III, фиг. 6–8). В результате отжига произошел диффузионный обмен между минеральными единицами скелета радиолярий, вызвавший срастание и спонтанное цементирование кремнеземом большинства поровых отверстий скелетов *Biantactinosphaera strangulata* (Nazarov et Ormiston) (табл. II, фиг. 9–11).

Совместные с радиоляриями находки конодонтов из девонских отложений зоны зеленокаменного метаморфизма Западных Мугоджар подтверждают возможность вторичного формирования кристаллов кварца в скелете радиолярий в условиях высоких температур (Афанасьева, Амон, 2013). На поверхностях слоистости кремнистых пород шулдакской свиты среднего девона обнаружены бесцветные, белесые и черные экземпляры конодонтов (Иванов, 1983). Черный цвет конодонтов по шкале Эпштейн (Epstein et al., 1977) отвечает индексу ИОК 5, а матово-белый соответствует индексу ИОК 7. Это свидетельствует, по-видимому, о нагреве пород, превышавшем 300 °С и, возможно, достигавшем 500 °С (Иванов, 1983).

ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СКЕЛЕТОВ РАДИОЛЯРИЙ

Первично-опаловый скелет радиолярий, как и скелет кремневых губок, нередко подвергается процессам метасоматоза и замещается другими минералами вследствие различных причин: изменение условий обитания, например, сероводородное заражение вод, или в результате катагенеза и метаморфизма древних отложений (Афанасьева, 1990, 2000; Afanasieva, 1990; Braun, Amon, 1991).

Происходит так называемая **перекристаллизация**, результаты которой, как правило, плачевны: сохранность катастрофически ухудшается, утрачивается первичная структура и форма скелета, что существенно сни-

жает возможность видовой и родовой идентификации радиолярий. Перекристаллизованные скелеты радиолярий особенно присущи палеозойским комплексам, составляя нередко львиную долю общего числа экземпляров в пробе. Весьма часто перекристаллизованные скелеты отмечают литологи при изучении карбонатных и кремнистых пород в шлифах, однако специалисты радиоляриологи, за редкими исключениями, оставляют подобные факты без внимания, предпочитая работать с перекристаллизованными формами хорошей сохранности.

Вторичное замещение кремнезема в скелетах радиолярий

Полевые и лабораторные наблюдения позволили сделать заключение, что радиоляриям из многих местонахождений фанерозоя весьма свойственно явление замещения первичного органогенного опала скелетов минералами из групп низкотемпературного кварца (включая халцедон), железа, марганца, карбонатов, иногда флюорита и граната и даже золота (Афанасьева, 1990, 2000; Braun, Amon, 1991).

По мнению А. Брауна и других исследователей радиолярий замещающими минералами служат гематит, пирит, органическое вещество³ (Braun, 1990a,b,c; Braun, Schmidt-Effing, 1993), доломит (Holdsworth, 1966; Braun, 1990a,b,c), кальцит (Pessagno, 1977; Braun, Amon, 1991), хлорит (Dehmer et al., 1989).

Уникальный случай замещения кремнезема скелета радиолярий гранатом был установлен Е.А. Кузнецовым (1947) в шлифах кварцитовых сланцев девона зеленокаменной полосы Южного Урала. Скелеты радиолярий «состоят из мельчайших кристалликов граната, многочисленные мелкие додекаэдры которых рассеяны в массе породы» (Кузнецов, 1947, с. 127).

Подавляющее большинство микрофауны в баженовских глинисто-кремнисто-карбонатных отложениях позднеюрского-раннемелового моря Западной Сибири представлено скелетами радиолярий удовлетворительной и плохой сохранности (Амон, 2011). Радиолярии либо рассеяны в породе в виде единичных экземпляров, либо образуют тонкие линзовидные скопления и пропластки с таким обилием скелетов, что вмещающая порода может быть названа радиоляритом. Скелетная ткань раковин радиолярий почти полностью замещена халцедоном (перекристаллизация).

Апатит также замещает кремнезем скелетов радиолярий, что было, например, установлено по материалам рудовмещающей толщи Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения на Среднем Урале (Ярославцева и др., 2012).

³ Природу органического вещества А. Браун не раскрывает “amorphous organic substance” (Braun, 1990a, p. 363; Braun, Schmidt-Effing, 1993, p. 378), однако нельзя исключить, что это углистые пленки.

Вторично измененные остатки радиолярии широко распространены в органично-литогенных фосфоритовых желваках и в фосфатном цементе песчаных фосфоритов верхнего мела (сеноман и кампан) Брянской области. При этом скелеты радиолярий, как правило, фосфатизированы целиком, замещены курскиком (минералом группы фторкарбонатапатитов). Иногда сохраняются участки с реликтовым опаловым составом (Мануковский, Беляев, 2000).

В нижнемеловых глауконитовых песчаниках и фосфоритах Вятско-Камского фосфоритоносного бассейна обнаружены случаи замещения скелетов глауконитом. Наблюдается полное замещение скелетов радиолярий сульфидами, железом, марганцем, кальцитом, реже родохрозитом и другими карбонатами. Интересны случаи нахождения в ископаемом состоянии остатков центральных капсул скелетов, где хитиновидное вещество превращено в углистый пигмент (Титоренко, Горина, 2011).

Многие радиолярии в процессе литификации вмещающих отложений могут быть подвергнуты микробиальной коррозии и микритизации. Первичный опаловый скелет радиолярий может замещаться кальцитом. Попадая при отмирании радиолярий в щелочную среду карбонатного субстрата, опал начинает растворяться. Происходит постепенная кальцитизация скелетов радиолярий, однако замещение кальцитом происходит, скорее всего, диффузионным путем, т. к. кальцит стенок и раковинного пространства выполнен кальцитом разной структуры. Причем у одних раковин могут сохраняться шипы и фрагменты внутренней зоны скелета радиолярий, а у других мы видим лишь пелитоморфную оболочку – результат биокоррозии (Антошкина, 2013). Эти сферы часто принимают за остатки примитивных мелких фораминифер, водоросли или органы их размножения. Очень часто кальцитизированные скелеты радиолярий относят к фораминиферам с секреторными кремнисто-апатитовыми стенками (Чувашов и др., 2012). Подобные определения являются предметом постоянных дискуссий и не принимаются радиоляристами (Вишневская, Седаева, 2002; Седаева, Вишневская, 2008; Афанасьева, Амон, 2012).

Пиритизация скелетов радиолярий

В условиях сероводородного заражения первичный аморфный опал скелетов различных организмов мог замещаться пиритом. Б.Б. Назаров отмечал, что «характерной особенностью позднеордовикских радиолярий Эстонии является замещение их кремнистого скелета пиритом или гидротетитом» (Назаров, Нылвак, 1983, с. 2).

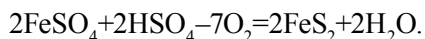
Скелеты радиолярий в баженовских отложениях позднеюрского-раннемелового моря Западной Сибири в отдельных случаях замещены пиритом (метасоматоз) (Амон, 2011). Допускается, что скелеты радиолярий могли особенно хорошо растворяться, проходя через слой воды до 500 м и осаждаясь на дне глубоководных впадин баженовского моря с низкими

скоростями седиментации. Не исключено, что сероводородное заражение, сопровождавшееся образованием сульфидно-щелочных растворов в осадке, усиливало растворение кремнистого скелета радиолярий с последующим замещением пиритом, карбонатными и глинистыми минералами (Важенина, 2010).

Исследование скелетов радиолярий, тентакулитов и спикул губок из верхнедевонских, среднефранских, доманиковых отложений Тимано-Печорского бассейна показало, что вторичный пирит с характерным медно-желтым блеском полностью замещает кремнезем скелета (табл. VI, фиг. 1, 2, 5–12). При этом пиритизация части скелетов могла начаться или у еще живых особей, непосредственно перед их смертью, или сразу после их отмирания. Об этом интересном феномене свидетельствует факт вторичного замещения пиритом только части кремневого скелета радиолярий (табл. VI, фиг. 3, 4) (Афанасьева, 2000).

Предположение, что вторичный пирит образовывался в скелетах живых радиолярий или в начале посмертного периода, накладывает определенные ограничения на время и место его формирования. Маловероятно, что условия пиритизации включили глубокое захоронение скелетов радиолярий в осадке и длительное геологическое время. Более того, формирование нефтематеринских пород доманика (средний фран), вмещающих данные скелетные остатки радиолярий, могло происходить только в условиях бескислородной среды.

По данным А.Г. Бетехтина, образование пирита в осадочных породах «связывается с разложением органических остатков без доступа свободного кислорода в более глубоких участках водного бассейна» (Бетехтин, 1950, с. 277). Сам же пирит часто образует псевдоморфозы по различным остаткам организмов. Эти псевдоморфозы, очевидно, образуются под воздействием на минералы H_2S . При этом обращает на себя внимание образование пирита путем восстановления сульфатов и других серосодержащих соединений органическими веществами по схеме:



Далее в работе А.Г. Бетехтина приводятся результаты очень интересного эксперимента: «мышь, погруженная в стакан с сульфатом железа, по прошествии нескольких лет оказалась замещенной пиритом. Очевидно, имело место разложение белковых веществ, вызывавшее образование сероводорода. В результате реакции ионов серы и железа и возник пирит» (Бетехтин, 1950, с. 278). Дополнительно к этому имеются сведения о прижизненной пиритизации раковин у морских двустворчатых моллюсков (Clark, Lutz, 1980).

Наше представление о процессе пиритизации, при котором первичный опал скелетов живых радиолярий замещается пиритом, весьма неполно. И

самое лучшее свидетельство характера процесса пиритизации может быть найдено именно в частично пиритизированных скелетах радиолярий: вторично пиритизированная сферическая часть скелета (табл. VI, фиг. 3, 4) и первично кремневые кончики игл. Можно предположить, что пиритизация происходила на органической матрице первичного скелета радиолярий. При этом перекристаллизация начиналась от начальной внутренней части скелета, постепенно распространяясь к периферическим концам игл. Вторичный пирит скелетов радиолярий и других организмов очень отличается от классических кристаллов или фрамбоидов пирита, наблюдаемых в породе. Здесь пирит представлен очень маленькими гранулами, которые соединяются в массивный скелет с характерным пиритовым блеском и цветом. При этом ориентация гланул пирита, возможно, аналогична расположению первичных гранул опала в скелете радиолярий.

С палеонтологической точки зрения наиболее существенным является предположение, что пирит начинает заменять опал или в скелете живой радиолярии, или в первые минуты (часы) после ее гибели. И хотя этот процесс еще совершенно не изучен, однако, кажется наиболее вероятным, что пиритизация происходила по биоминералогическим границам и направлениям роста скелета. Это удовлетворяет наблюдениям и иллюстрациям частичной и полной пиритизации скелетов радиолярий и других организмов (табл. VI).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическое и экспериментальное исследование органической и минеральной составляющей скелета радиолярий помогло получить представление о процессах его формирования, сохранения и разрушения в геологической истории, построить гипотетическую модель фоссиллизации скелетов радиолярий и определить значение модификаций кремнезема скелетов радиолярий при оценке постседиментационных процессов.

1. Сохранение и разрушение раковин радиолярий в ископаемом состоянии связано с изменением характера взаимоотношений органической и минеральной составляющей скелета.

Постепенное преобразование остаточной органической матрицы раковин радиолярий, сопровождающееся дублированием или обугливанием органических ламелл, увеличивает прочность скелета и способствует сохранению первичной морфологии раковин в течение длительного периода геологического времени.

Полная деструкция остаточной органической матрицы, сдерживавшей окаменение раковин, и различные условия литогенеза, с одной стороны, вызывают распадение скелетов на отдельные структурные элементы, а с другой благоприятствуют срастанию соседних минеральных единиц и реализации «стремления» кремнезема к структурному совершенству в последовательном ряду: глобулярный опал → опал-СТ → призматический

низкотемпературный тридимит → дипирамидально-призматический низкотемпературный кварц.

2. Процесс трансформаций глобулярного опала в опал-СТ и кварц контролируется температурой и геологическим временем и позволяет судить об условиях постседиментационных процессов.

Глобулярный аморфный опал скелетов радиолярий, находящийся в латентном состоянии в период седиментогенеза, трансформируется в глобулярный опал-СТ при температурах до +40 °С, что отвечает стадии диагенеза.

Призматические псевдогексагональные таблички низкотемпературного тридимита, по-видимому, формируются в структуре скелетов радиолярий в условиях повышенных температур раннего катагенеза (от +40 °С до +120 °С).

Вытянутые пирамидально-призматические кристаллы более совершенного низкотемпературного кварца могут образовываться в стенке скелетов радиолярий только при высоких температурах поздней стадии катагенеза и метаморфизма древних отложений (от +120 °С до +180 °С).

3. Первично-опаловый скелет радиолярий нередко подвергается процессам метасоматоза и замещается другими минералами (карбонаты, сульфиды, реже родохрозит, апатит, флюорит и гранаты), а также железом, марганцем и даже золотом. Интересны случаи нахождения в ископаемом состоянии остатков центральных капсул скелетов, где хитиновидное вещество превращено в углистый пигмент.

Явление замещения первичного органогенного опала скелетов может быть обусловлено различными причинами: либо прижизненное изменение условий обитания, например, сероводородное заражение вод, либо как результат катагенеза и метаморфизма древних отложений.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амон Э.О.* 2011. Радиолярии в баженовской свите (волжский ярус) Широкого Приобья, Западная Сибирь // Ежегодник-2010 ИГГ УрО РАН. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 3–8. (Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 158).
- Антошкина А.И.* 2013. Позднедевонские рифовые экосистемы: специфика сообществ и биогенных структур (на примере Тимано-Североуральского региона) / Проблемы эволюции биосферы. Ред. С.В. Рожнов. М.: ПИН РАН. С. 190–205.
- Архипенко Д.К., Григорьева Т.Н., Мороз Т.Н.* 1996. Дифракционные и недифракционные методы изучения костно-минеральной ткани // Минералогия и жизнь: биоминеральные взаимодействия. Тез. докл. 2 Междунар. семинара. Сыктывкар. С. 28–29.

- Афанасьева М.С.* 1990. Ультраструктура и вторичные изменения раковин радиолярий // Палеонтол. журн. № 1. С. 28–38.
- Афанасьева М.С.* 2000. Атлас радиолярий палеозоя Русской платформы. М.: Научный Мир. 480 с.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2006. Радиолярии. М.: ПИН РАН. 320 с.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2012. Биостратиграфия и палеобиогеография радиолярий девона России. М.: ПИН РАН. 280 с.
- Афанасьева М.С., Амон Э.О.* 2013. Радиолярии среднего-верхнего девона Западных Мугоджар // Бюл. Моск. о-ва испыт. природы. Отд. геол. Т. 88. Вып. 6. С. 54–69.
- Бетехтин А.Г.* 1950. Минералогия. М.: Госгеолиздат. 958 с.
- Важенина О.А.* 2010. Особенности осадконакопления и литологические типы пород баженовской свиты на территории широтного Приобья (Западная Сибирь) // Вестн. томского гос. ун-та. № 335. С. 161–163.
- Вассоевич Н.Б.* 1986. Избранные труды. Геохимия органического вещества и происхождение нефти. М.: Наука. 368 с.
- Вассоевич Н.Б.* 1990. Избранные труды. Литология и нефтегазоносность. М.: Наука. 264 с.
- Витухин Д.И.* 1990. Особенности распределения радиолярий в кайнозойских отложениях Дальнего Востока СССР (Сахалинская, Камчатская области) // Использование радиолярий в стратиграфии и палеобиологии. Уфа. С. 22–24.
- Вишневецкая В.С., Седаева К.М.* 2002. Ревизия некоторых таксонов фораминифер отряда Parathuramminoidea и вопросы эволюции фораминифер и радиолярий // Палеонтол. журн. № 6. С. 15–24.
- Голубев С.Н.* 1981. Реальные кристаллы в скелетах кокколитофорид. М.: Наука. 164 с.
- Голубев С.Н.* 1987. Минеральные кристаллы внутри организмов и их роль в происхождении жизни // Журн. общ. биол. Т. 48. № 6. С. 784–806.
- Иванов К.С.* 1983. К геологии вулканогенных толщ Западных Мугоджар. Свердловск: УНЦ АН СССР. 71 с.
- Кеннетт Дж.* 1987. Морская геология. Т. 2. М.: Мир. 384 с.
- Киреев В.С.* 1951. Курс физической химии. М.-Л.: Химическая литература. 502 с.
- Кузнецов Е.А.* 1947. Радиолярии из кремнистых сланцев Полевской и Уфалейской дач на Урале // Вестн. Мос. ун-та. № 12. С. 127–133.
- Логвиненко Н.В., Орлова Л.В.* 1987. Образование и изменение осадочных пород на континенте и в океане. Л.: Недра. 237 с.
- Мануковский С.В., Беляев В.И.* 2000. К вопросу о бактериально-водорослевой природе некоторых типов фосфатов в желваковых фосфоритах и фосфатоносных россыпях // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. Вып. 5(10). С. 41–47.
- Мельник Ю.П., Дроздовская А.А., Воробьева К.А.* 1973. Новые экспериментальные и расчетные данные об условиях отложений докембрийских железо-кремнистых осадков // Геол. журн. Т. 33. Вып. 2. С. 12–23.

- Назаров Б.Б., Нылвак Я. 1983. Радиоларии из верхнего ордовика Эстонии // Изв. АН Эстонской ССР. Геология. Т. 32. № 1. С. 1–8.
- Седаева К.М., Вишневская В.С. 2008. О природе проблематичных микрофоссилий из верхнего девона и нижнего карбона // Новости палеонтологии и стратиграфии. Вып. 10–11: Прилож. к журн. «Геология и геофизика». Т. 49. С. 152–152.
- Сеньковский Ю.Н. 1977. Литогенез кремнистых толщ Юго-Запада СССР. Киев: Наукова Думка. 128 с.
- Титоренко Т.Н., Горина О.В. Микрорепалеонтология (учебн.-метод. пособие). Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та. 2011. 144 с.
- Химичева Н.В., Плюснина И.И. 1989. О кремнистых породах – очагах нефтегазообразования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. № 5. С. 12–17.
- Чувашов Б.И., Анфимов А.Л., Сорока Е.И., Ярославцева Н.С. 2012. Девонские форминиферы с некарбонатной раковинной в рудовмещающей толще Сафьяновского месторождения (Средний Урал) // Литосфера. № 5. С. 114–125.
- Ярославцева Н.С., Масленников В.В., Сафина Н.П. и др. 2012. Углеродсодержащие алевропелиты Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал) // Литосфера. № 2. С. 106–124.
- Afanasiyeva M.S. 1990. Experimental evidence for changes during fossilization of radiolarian tests and implications for a model of biomineralizations // Marine micropaleontol. № 15. P. 233–248.
- Afanasiyeva M.S. 2006. Biomineralization and development of radiolarian skeletons // Environmental micropaleontology, microbiology and meiobenthology. V. 3. P. 1–30.
- Afanasiyeva M.S., Amon E.O., Agarkov Yu.V., Boltovskoy D.S. 2005. Radiolarians in the geological record // Paleontol. J. V. 39. Suppl. 3. P. S135–S392.
- Bjørklund K.R., Goll R.M. 1986. Final stages of skeletogenesis and early stages of disintegration for modern polycystine radiolarian // Marine Micropaleontol. V. 11. № 1–3. P. 171–184.
- Bohrmann G., Abelmann A., Gersonde R. et al. 1994. Pure siliceous ooze, a diagenetic environment for early chert formation // Geology. V. 22. № 3. P. 207–210.
- Braun A. 1990a. Evolutionary trends and biostratigraphic potential of selected radiolarian taxa from the Early Carboniferous of Germany // Marine Micropaleontol. V. 15. P. 351–364.
- Braun A. 1990b. Oberdevonische Radiolarien aus Kieselschiefer-Geröllen des unteren Maintales bei Frankfurt a. M. // Geol. Jahrb. Hessen. Bd 118. S. 5–27.
- Braun A. 1990c. Radiolarien aus dem Unterkarbon Deutschlands // Cour. Forsch. Inst. Senckenberg. Bd 133. S. 1–177.
- Braun A., Amon E.O. 1991. Fluoritisierte Radiolarien aus Kieselkalk-Banken des Mittel-Viseum (Unterkarbon) des Rheinischen Schiefergebirges (Deutschland) // Palaeont. Z. T. 65. № 1–2. S. 25–33.
- Braun A., Schmidt-Effing R. 1993. Biozonation, diagenesis and evolution of radiolarians in the Lower Carboniferous of Germany // Marine Micropaleontol. V. 21. P. 369–383.

- Clark G.R.II, Lutz R.A.* 1980. Pyritization in the shells of living bivalves // *Geology*. V. 8. P. 268–271.
- Dehmer J., Hentschel G., Horn M. et al.* 1989. Die vulkanisch-kieselige Gesteinsassoziation am Beispiel der unterkarbonischen Kieseliefer am Ostrand des Rheinischen Schiefergebirges. *Geologie-Petrographie-Geochemie // Geol. Jahrb. Hessen*. Bd 117. S. 79–138.
- De Wever P., Dumitrica P., Caulet J.P., Nigrini C. et al.* 2001. Radiolarians in the sedimentary record. Amsterdam: Gordon and Breach sci. publ. 533 p.
- Epstein A.G., Epstein J.B., Harris L.D.* 1977. Conodont color alteration an index to organic metamorphism // *U.S. geol. surv. Prof. pap. № 995*. 27 p.
- Holdsworth B.K.* 1966. Radiolaria from the Namurian of Derbyshire // *Palaeontology*. V. 9. P. 319–329.
- Pessagno E.A., Jr.* 1977. Upper Jurassic Radiolaria and radiolarian biostratigraphy of the California coast ranges // *Micropaleontology*. V. 23. P. 56–113.

Объяснение таблицы I

Последовательные стадии модификации кремнезема в скелетах радиолярий на стадиях диагенеза (1–4), раннего катагенеза (5–8) и позднего катагенеза (9–12)

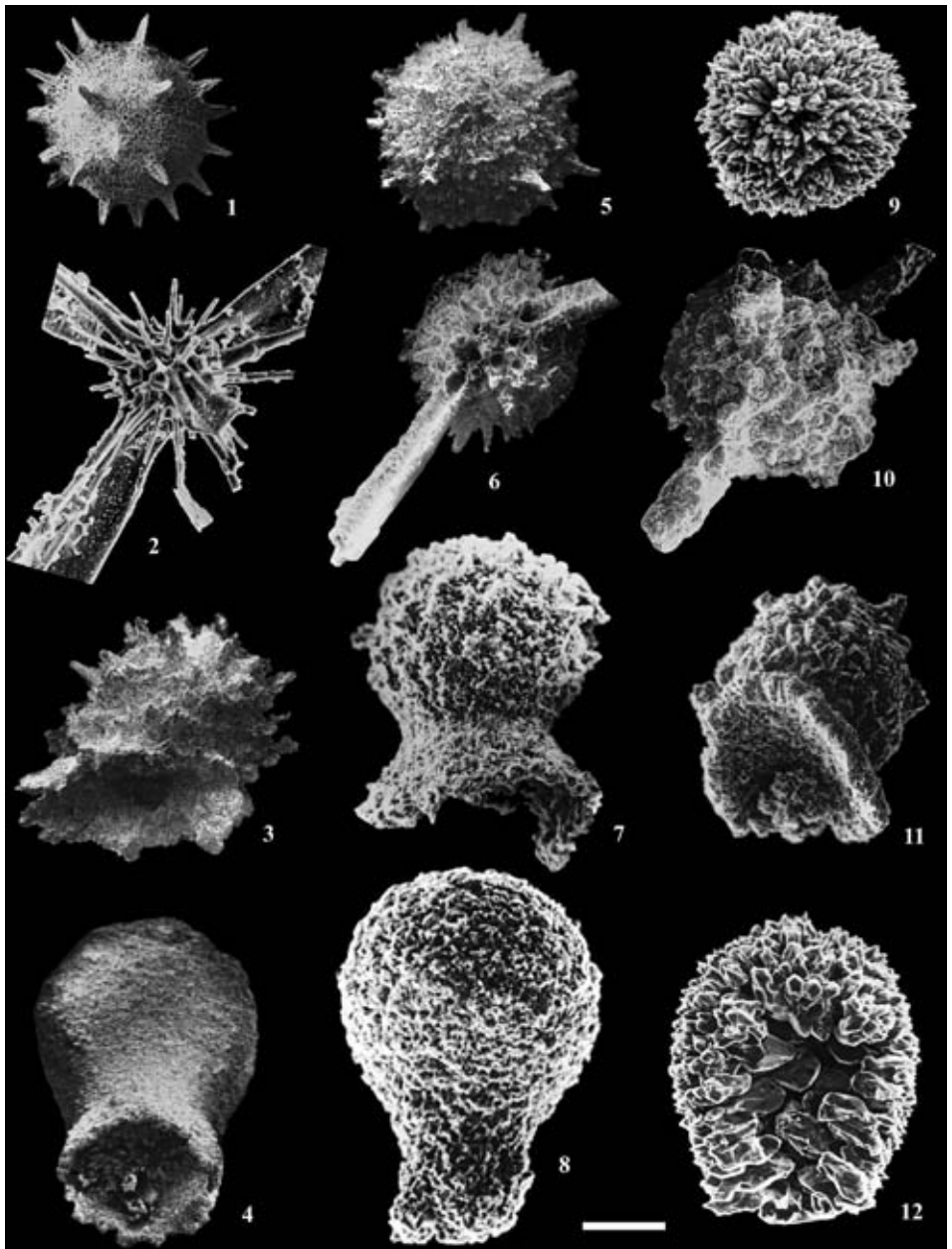
Нижняя пермь: ассельский ярус, Южный Урал, р. Урал, с. Донское, обр. 5/41 – фиг. 1, 2; артинский ярус, Северный Прикаспий, массив Карачаганак: скв. 13 (инт. 4984–4990 м), обр. 3061 – фиг. 5, 6, скв. 20 (инт. 4602–4603 м), обр. 1 – фиг. 10. Средний карбон, башкирский ярус, Северный Прикаспий, массив Карачаганак, скв. 12 (инт. 4656–4663 м), обр. 633 – фиг. 9. Нижний карбон, серпуховский ярус: Тянь-Шань, р. Угам, обр. 803/24 – фиг. 3, 4; Северный Прикаспий, массив Карачаганак: скв. 33 (инт. 4934–4941 м), обр. 86913 – фиг. 7, скв. 19 (инт. 4769–4778 м), обр. 113 – фиг. 8, скв. 19 (инт. 4760–4769 м), обр. 112 – фиг. 11, скв. 20 (инт. 4748–4753 м), обр. 42 – фиг. 12.

Фиг. 1, 5, 9. *Copicyntra acilaxa* Nazarov, 1986 (штрих = 115 мкм): 1 – экз. ПИН, № 5481/05511, 5 – экз. ПИН, № 5481/00337, 9 – экз. ПИН, № 5507/00112.

Фиг. 2, 6, 10. *Entactinia pycnoclada* Nazarov et Ormiston, 1985 (штрих = 50 мкм): 2 – экз. ПИН, № 5481/05512, 6 – экз. ПИН, № 5481/00304, 10 – экз. ПИН, № 5481/00409.

Фиг. 3, 7, 11. *Caspiaza aculeata* Afanasieva, 1986 (штрих = 100 мкм): 3 – экз. ПИН, № 5507/00311, 7 – экз. ПИН, № 5507/02608, 11 – экз. ПИН, № 5507/00201.

Фиг. 4, 8, 12. *Caspiaza urceus* Afanasieva, 1986: 4 – экз. ПИН, № 5507/00314 (штрих = 100 мкм), 8 – экз. ПИН, № 5507/00217 (штрих = 58 мкм), 12 – экз. ПИН, № 5507/00111 (штрих = 40 мкм).

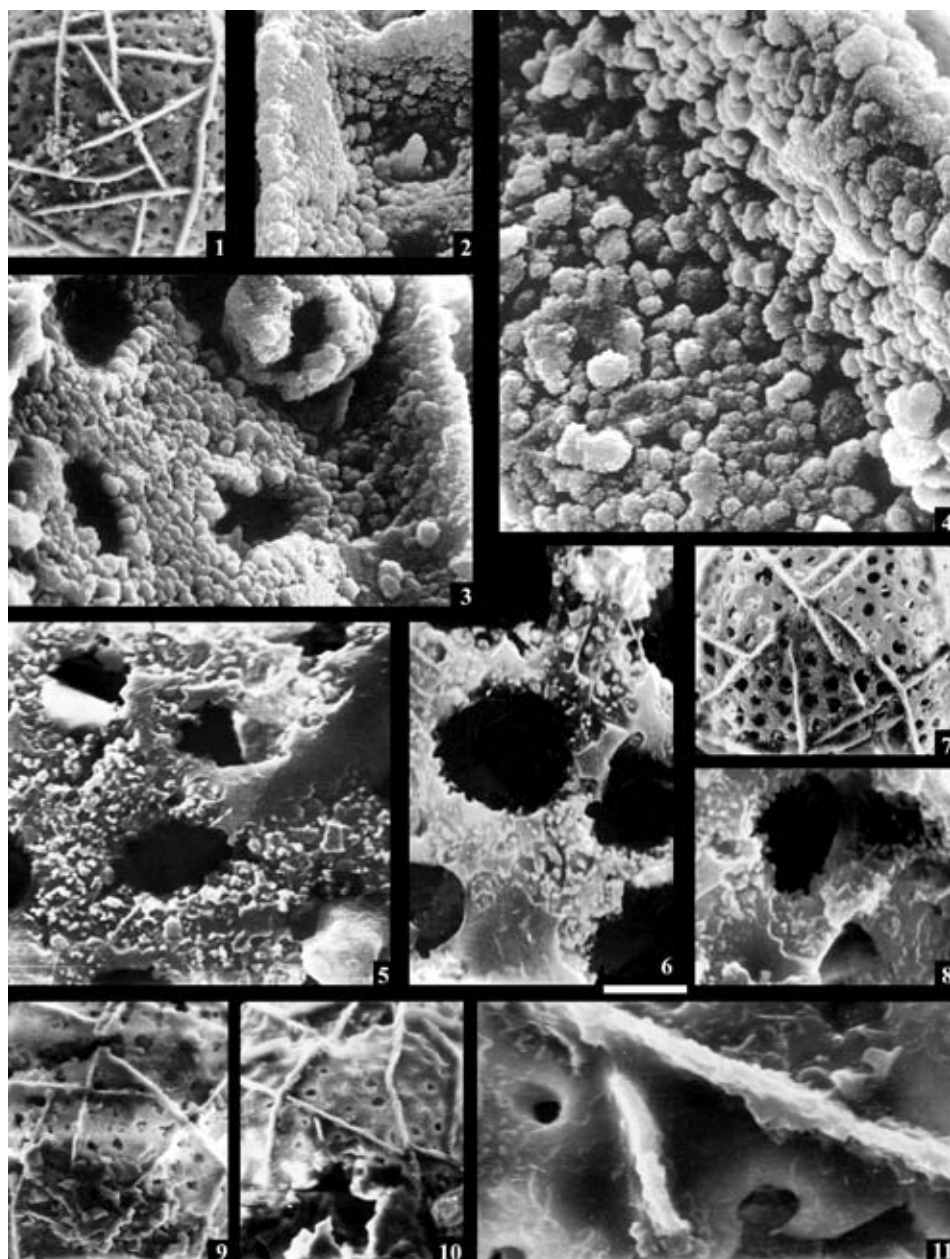


Объяснение таблицы II

Моделирование процесса фоссилизации скелетов раннепермских радиолярий
на примере *Bientactinosphaera strangulata*

Южный Урал, р. Урал, с. Донское, нижняя пермь, артинский ярус,
обр. 5/41.

Фиг. 1–11. *Bientactinosphaera strangulata* (Nazarov et Ormiston, 1985),
экз. ПИН, № 5481/02504: 1–4 – без отжига: 1 – (штрих=23 мкм), 2 –
(штрих = 6 мкм), 3 – (штрих = 6 мкм), 4 – (штрих = 2 мкм); 5–8 – отжиг
48 часов на подложке из лабораторного кварцевого стекла при температу-
ре 500 °С: 5 – (штрих = 4 мкм), 6 – (штрих = 4 мкм), 7 – (штрих = 21 мкм),
8 – (штрих = 4 мкм); 9-11 – отжиг 25 часов в муфельной печи в стандартных
лабораторных тиглях при температуре 1000 °С: 9 – (штрих = 19 мкм), 1
0 – (штрих = 19 мкм), 11 – (штрих = 4 мкм).

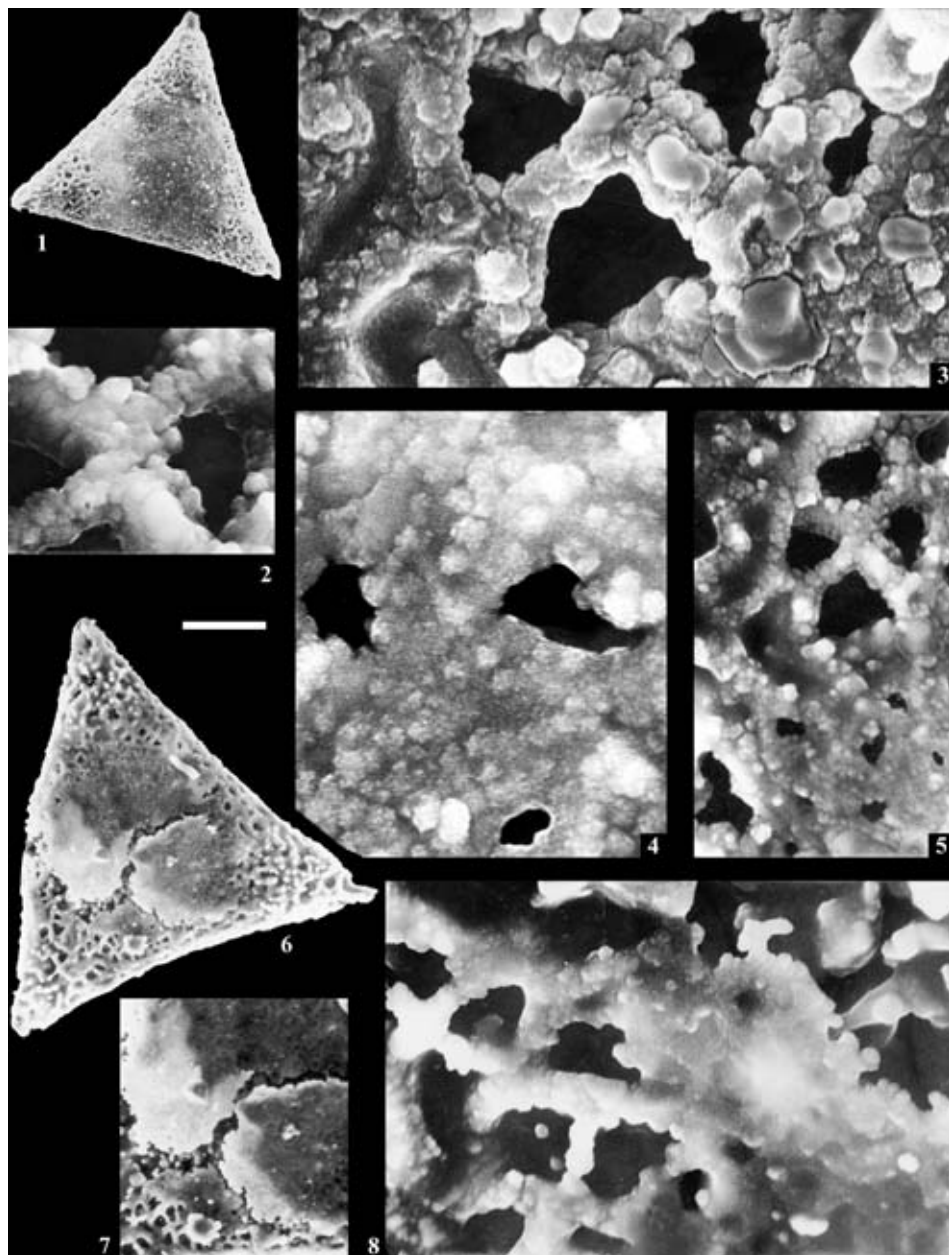


Объяснение таблицы III

Моделирование процесса фоссилизации скелетов раннепермских радиолярий
на примере *Ruzhencevispongia plumatus*

Южный Урал, р. Урал, с. Донское, нижняя пермь, артинский ярус,
обр. 5/41.

Фиг. 1–8. *Ruzhencevispongia plumatus* Nazarov et Ormiston, 1985:
1–5 – экз. ПИН, № 5481/01204, без отжига: 1 – (штрих = 120 мкм),
2–4 – (штрих = 3 мкм), 5 – (штрих = 15 мкм); 6–8 – экз. ПИН, № 5481/01303,
отжиг 25 часов в муфельной печи в стандартных лабораторных тиглях
при температуре 1000°C: 6 – (штрих = 90 мкм), 7 – (штрих = 66 мкм), 8 –
(штрих = 14 мкм).



Объяснение таблицы IV

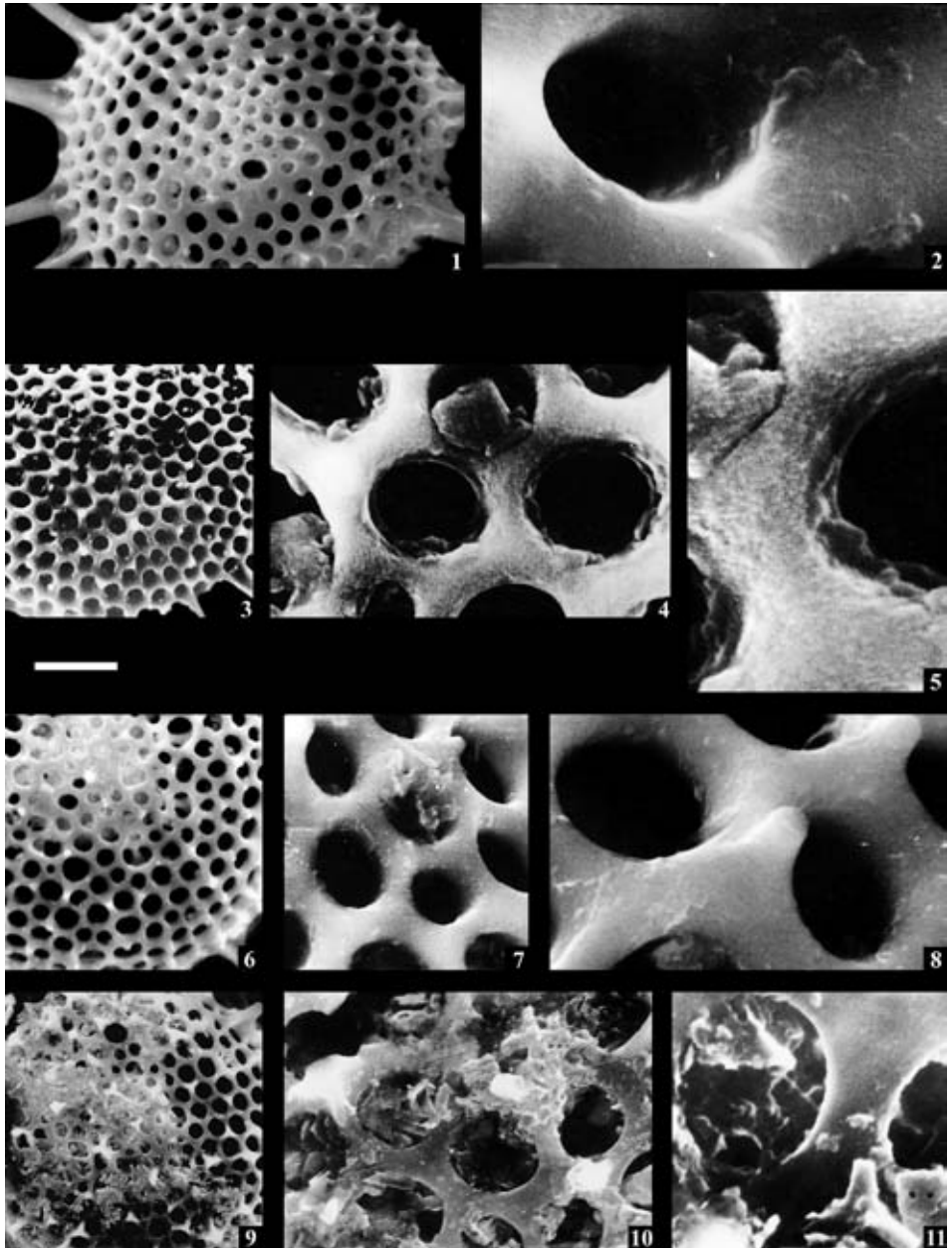
Моделирование процесса фоссилизации скелетов современных радиолярий на примере *Heliodiscus asteriscus* (1–5) и *Heliodiscus echiniscus* (6–11)

Современные донные осадки Тихого океана (станция 5139).

Фиг. 1–5. *Heliodiscus asteriscus* Haeckel, 1887: 1, 2 – экз. ПИН, № 229/02101, без отжига: а – (штрих = 15 мкм), 2 – фрагмент (штрих = 3 мкм); 3–5 – экз. МГУ, № 229/00801, отжиг 25 часов в муфельной печи в стандартных лабораторных тиглях при температуре 1000 °С: 3 – (штрих = 26 мкм), 4 – фрагмент (штрих = 4 мкм), 5 – фрагмент (штрих = 2 мкм).

Фиг. 6–11. *Heliodiscus echiniscus* Haeckel, 1887: 6–8 – экз. ПИН, № 229/02104, без отжига: 6 – (штрих = 16 мкм), 7 – фрагмент (штрих = 4 мкм), 8 – фрагмент (штрих = 2 мкм); 9–11 – экз. МГУ, № 229/02211, отжиг 48 часов на подложке из лабораторного кварцевого стекла при температуре 500 °С: 9 – (штрих = 13 мкм), фрагмент 10 – (штрих = 4 мкм), 11 – фрагмент (штрих = 1 мкм).

Таблица IV



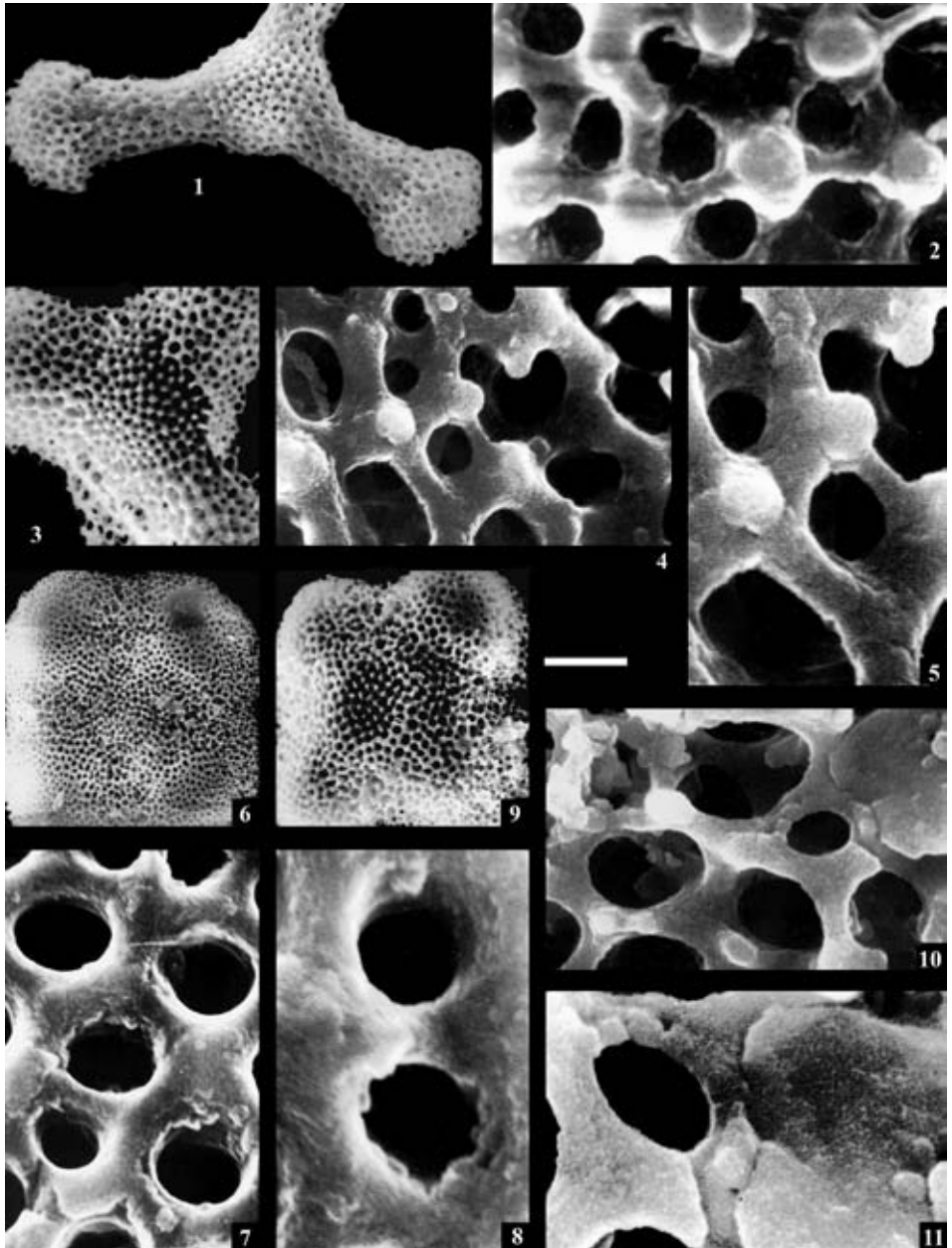
Объяснение таблицы V

Моделирование процесса фоссилизации скелетов современных радиолярий на примере *Dictyocoryne profunda* (1–5) и *Spongaster tetras* (6–11)

Современные донные осадки Тихого океана (станция 5139).

Фиг. 1–5. *Dictyocoryne profunda* Ehrenberg, 1860: 1, 2 – экз. ПИН, № 229/01007, без отжига: 1 – (штрих = 46 мкм), 2 – фрагмент (штрих = 4 мкм); 3–5 – экз. ПИН, № 229/00804, отжиг 25 часов в муфельной печи в стандартных лабораторных тиглях при температуре 1000°C: 3 – (штрих = 31 мкм), 4 – фрагмент (штрих = 3 мкм), 5 – фрагмент (штрих = 2 мкм).

Фиг. 6–11. *Spongaster tetras* Ehrenberg, 1860: 6–8 – экз. ПИН, № 229/01012, без отжига: 6 – (штрих = 27 мкм), 7 – фрагмент (штрих = 4 мкм), 8 – фрагмент (штрих = 2 мкм); 9–11 – экз. ПИН, № 229/00903, отжиг 25 часов в муфельной печи в стандартных лабораторных тиглях при температуре 1000°C: 9 – (штрих = 29 мкм), 10 – фрагмент (штрих = 3 мкм), 11 – фрагмент (штрих = 2 мкм).



Объяснение таблицы VI

Пиритизированные скелеты губок (1), тентакулитов (2) и радиоларий (3–12)

Верхний девон, среднефранский подъярус, доманиковая свита; Тимано-Печорский бассейн: а, б, д–м – скв. Ухтинская-3Б (инт. 104,2–104,7 м), обр. 114; в, г – скв. Шуда-Яг-1003: (инт. 106–107 м), обр. 28.

Фиг. 1. *Triaxonida* (?) sp.407, экз. ПИН, № 5311/09101 (штрих = 33 мкм).

Фиг. 2. *Tentaculites* cf. *semilukianus* G. Ljaschenko, 1965, экз. ПИН, № 5311/09028 (штрих = 89 мкм).

Фиг. 3, 4. *Borisella maksimovae* Afanasieva, 2000, экз. ПИН, № 5311/04302: 3 – (штрих = 89 мкм), 4 – фрагмент (штрих = 15 мкм).

Фиг. 5. *Palaeoscenidium* cf. *cladophorum* Deflandre, 1953, экз. ПИН, № 5311/09135 (штрих = 35 мкм).

Фиг. 6. *Ceratoikiscum* cf. *ukhtensis* Afanasieva, 2000, экз. ПИН, № 5311/09129, (штрих = 48 мкм).

Фиг. 7, 8. *Ornatoentactinia* cf. *solita* Afanasieva, 2000, экз. ПИН, № 5311/09123: 7 – (штрих = 38 мкм), 8 – фрагмент (штрих = 17 мкм).

Фиг. 9. *Bientactinosphaera* cf. *grandis* (Nazarov, 1975), экз. ПИН, № 5311/09119 (77 мкм).

Фиг. 10. *Radiobisphaera* cf. *menneri* Afanasieva, 2000, экз. ПИН, № 5311/09133 (штрих = 42 мкм).

Фиг. 11, 12. *Bientactinosphaera* cf. *variacanthina* (Foreman, 1963), экз. ПИН, № 5311/09035: 11 – (штрих = 55 мкм), 12 – фрагмент (штрих = 8 мкм).

FOSSILIZATION OF RADIOLARIAN SKELETONS

M.S. Afanasieva, E.O. Amon

Questions of radiolarian skeleton fossilization are analyzed. The complete destruction of the primary organic matrix of the skeleton and different lithogenetic settings, on the one hand, cause the disintegration of the skeletons into fragments and, on the other hand, facilitate the merging of adjacent mineral units and realization of the tendency of silica towards the structural perfection in the successive row: opal-A → opal-CT → low-temperature tridymite → low-temperature quartz. The process of transformation of opal-A into opal-CT and quartz is regulated by temperature and time. Thus, modifications of SiO₂ in radiolarian skeletons possible can show a response to corresponding stages of lithogenesis: sedimentogenesis – diagenesis – early catagenesis – late catagenesis. Much attention is paid to the phenomenon of pyritization skeletons in conditions of hydrosulphuric contamination. It is shown that the radiolarian silica skeletons were secondary replaced by other minerals.

Key words: Radiolaria, fossilization, phenomenon of pyritization, secondary replacement of silica, stages of lithogenesis.

