

УДК 563.4+563.14

В.С. Вишнеvская¹, Е.О. Дубинина², А.В. Мохов²
ЗАГАДОЧНОЕ СТРОЕНИЕ НЕКОТОРЫХ СПИКУЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГУБОК, РАДИОЛЯРИЙ
И НАНОТЕХНОЛОГИИ

V.S. Vishnevskaya, E.O. Dubinina, A.V. Mokhov
PHENOMENAL STRUCTURE OF SOME SPICULE ELEMENTS OF SPONGE, RADIOLARIANS
AND NANOTECHNOLOGIES

Проведено порівняння крем'яних спікул губок зі спікулами і голками радіолярій з деяких інтервалів крейди (альб–сеноман, сантон–кампан) та сучасних осадків. Вперше проілюстровані деталі будови мікросклер і скелетних голок радіолярій; розглянуті структури їх зчленування. Зроблено припущення про можливе походження радіолярій від крем'яних губок. Показана можливість використання природних структур при розробці нанотехнологій.

Ключові слова: спікули, радіолярії, губки, наноструктури, альб–сеноман, сантон–кампан, пліоцен-сучасність.

A comparison of siliceous sponge spicules with radiolarian spines and spicules from different time intervals of the Cretaceous (Albian-Cenomanian, Santonian-Campanian) and recent sediments has been carried out. Details of the structure of microspicules and radiolarian spines have been illustrated for the first time. An assumption that radiolarians may have originated from sponges is made. The potential of application of nature structures in nanotechnologies is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Кремневые спикулы являются скелетными элементами минерального каркаса как радиолярий (табл. I, 1-4), так и губок (табл. I, 12-14). У палеозойских и раннемезозойских радиолярий они образовывали внутреннюю спикулу и стенку, а начиная с позднемезозойских до современных формируют иглы, образуя радиально-лучистую иглистую структуру средним размером 100-300 мк. У губок они представлены макросклерами (100-500 мк и более) и микросклерами (до 100-200 мк).

Недавно было показано, что спикулы стеклянных губок класса Hexactinellida (протерозой – ныне) являются уникальным материалом природного происхождения благодаря их механическим, физико-химическим и оптическим свойствам. Так, спикулы губки *Hyalonema sieboldi* имеют вид стекловолокон диаметром 0,5-1,5 мм и длиной до 70 см, обладают присущей только кремнийсодержащим биоматериалам гибкостью, которая позволяет завязывать спикулы узлом. Некоторые спикулы, например рода *Euplectella*, имеют диаметр 40-70 мк и являются отличными оптическими волокнами [6].

Общепризнано, что минеральный компонент спикул представлен двуокисью кремния в виде аморфного опала. Вероятно, и у других кремнийсодержащих морских организмов, например радиолярий, сходная структурная организация скелетов, включая спикульные иглы, поскольку их прижизненные формы также обладают гибкостью. Естественно, что наличие одного силикатного компонента не может обеспечить повышен-

ную гибкость кремневых спикул у губок или игл у радиолярий. Такое свойство кремневого вещества может быть обусловлено только биогенной природой за счет присутствия структурного каркаса органической природы по аналогии, например, со спонгиевым скелетом у роговых губок рода *Verongula* [8].

В настоящее время доказано, что уникальная гибкость стеклянных губок обусловлена наличием в них органического фибриллярного протеинового матрикса или каркаса, представленного белком коллагеновой природы, который является основой для биоминерализации кремния в базальных спикулах [6].

Многие исследователи работают над расшифровкой структуры силиконовых волокон губок и раскрытием секрета, как они их производят в обычных условиях из морской воды [4]. Как отмечалось выше, стеклянные губки класса Hexactinellida являются, вероятно, древнейшими представителями многоклеточных организмов [9], а Radiolaria (кембрий – ныне) – одноклеточных [1]. Также существует точка зрения, согласно которой радиолярии произошли от губок в процессе сегрегации, а затем объединения, сочленения и слияния отдельных спикул кремневых губок [7]. Особенно большое сходство у кремневых спикул губок с иглистыми радиоляриями, первичной спикулой сферических радиолярий. Поэтому не менее интересен вопрос соединения (присоединения) спикул губок и игл радиолярий или крепления их к основному скелету или в структуре скелета и эволюции структурной организации

скелетов во времени. Это имеет принципиальное значение как для установления филогенических связей, так и для развития наннотехнологий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований использованы микросклеры кремневых губок и скелеты радиолярий. Материал по верхнемеловым кремневым губкам происходит из кремнистых глин пограничных слоев сантона и кампана с глубины 110-114 м скв. 22, пробуренной на восточном склоне Северного Урала в южной части Северо-Сосьвинского бурогольного бассейна в 10-11 км к западу от пос. Усть-Манья. Плиоценовые и современные спикулы губок и микросклеры из Северной Атлантики.

Скелеты радиолярий происходят из пограничных слоев сеномана и турона Крыма, альба и сеномана Кубы, коньяка–сантона Теплостановской возвышенности (Москва) Русской плиты и пограничных слоев сантона и кампана Румынии.

Все скелетные элементы извлекались из пород с помощью отмучивания и затем промывались водой с использованием слабых растворов плавиковой кислоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

До настоящего времени считается, что основное отличие игл радиолярий (табл. I, 1-8) от спикул губок заключается в наличии центрального канала у спикул губок (табл. I, 10, 14; табл. III, 9-12). Тем не менее в конце XX в. стало известно, что самые первые и наиболее древние иглистые радиолярии из кембрия (у которых все спикулы были направлены к центральному ядру), как и спикулы, имели полый канал [10]. За всю геологическую историю у радиолярий известны иглы сплошные, полые или с внутренним каналом, но большинство радиолярий характеризуется наличием игл без внутреннего канала. В случае, когда мы сравниваем радиолярии и микросклеры губок, которые имеют сходные размеры (табл. II, 1-4), отличия заключаются в строении каркаса. У сферических радиолярий (табл. I, 1-8) он псевдоаулофакоидный или ячеистый за счет сложного переплетения скелетной ткани на иглистом каркасе, а у микросклер – это многочисленные сросшиеся лучи спикул, исходящие от единого центрального губчатого ядра. Центральный канал у таких микроспикул губок практически не видим или отсутствует. Также существуют различия в характере присоединения игл у радиолярий и губок. Круглые иглы у радиоля-

рий отходят от центра или центральной микросферы, граненые иглы центрального канала не имеют. На местах обломанных трехгранных игл радиолярий (табл. I, 7а) часто сохраняются трехлучевые сочленения, слегка выступающие над поверхностью – это следы крепления игл (табл. I, 5, 8).

Все приведенные здесь типы игл радиолярий, как правило, радиально-лучисто расходятся от центра скелета и на окончаниях заостряются (табл. I, 1), несут тонкий шип (табл. I, 3), копьевидное окончание (табл. I, 7а). Средний диаметр круглых игл 5-10 мк, трехгранных – 10-15 мк), шипов – 0,01-2 мк). Спикулы игл у губок имеют заостренные лучи и основной шип. Все лучи у микросклер также заострены, но они сходятся к центру (табл. I, 12, 13). Внешние окончания у таких лучей часто несут «корону» из коротких массивных лучиков, которые объединены в виде звездчатых образований, формирующих прочную сглаженную поверхность сфероидной спикулы (табл. II, 1-4), относимой к родам *Erulys*, *Sterraster* или *Sillicosphaera*. Звездчатые образования у *Sterraster* не одинаковые. Так, у одного морфотипа (табл. II, 1) преобладают четырехлучевые спикулы (с четырехугольным сечением в плане), но встречаются трех-, пяти- и шестиугольные сечения. У другого морфотипа (табл. II, 2) преобладают пятиугольные сечения, местами доминируют семи- и восьмиугольные сечения в плане. У современного морфотипа (табл. II, 4) микроспикулы в плане имеют трехлучевую форму с шести- и семи-восьмиугольным сечением. Средний радиус лучей – 1,5-2 мк. Форма лучей также не одинакова и не отличается строгими геометрическими очертаниями. У радиолярий сетка кажется более правильной (табл. I, 11). Сочленения лучей у микроспикул с основной осевой спикулой или шипов не всегда достаточно прочны и часто разрушаются (табл. II, 3а), в результате чего на сферической поверхности спикулы остается пористая лунка или вход в канал.

Еще Р.Х. Липман [5] отмечала присутствие таких спикул губок рода *Erulys* совместно с радиоляриями в пограничных слоях сантона и кампана в бассейне р. Сыня в Западной Сибири. Но, у спикул рода *Erulys* микроспикулы простые, без дополнительных лучиков. Между тонкими микроспикулами или на месте их соединений часто видны поры (табл. I, 13; табл. III, 2). Толщина лучей составляет от долей микрона до первых чисел микрона. На табл. I, 13 видно, что на 10 мк приходится до 12 тонких окончаний лучей.

Большой интерес представляет характер сочленения спикулярных элементов у радиолярий. Так, у рода *Alievium* на поверхности стенки видны треугольники, образованные перекладинами, которые, объединяясь, формируют шестиугольники, но внутренняя часть стенки (продолжение треугольных отверстий в виде перегородок) продолжается в глубь раковины, часто формируя нанномикроскопические треугольники, которые, сливаясь, образуют многослойную губчатую структуру [2]. На пересечении перекладин образуются узлы. Толщина перекладин составляет доли микрона и обычно несколько меньше, чем узлов. Также следует отметить сходство обломанных спикул игл губок (табл. II, 5) и округлых игл радиолярий (табл. I, 1). Толщина игл у меловых радиолярий (табл. I, 1-2) и современных кремневых губок (табл. II, 5) соизмерима. Только у губок пучок коротких игл (около 10 мк), расходящихся в стороны, в котором три-пять центральных игл были значительной длины (до 500 мк и более). У таких игл, как и у большинства радиолярий, нет центрального канала. При большом увеличении видно, что они массивные, но имеют природную неоднородность.

ВЫВОДЫ

У первых иглистых и затем сферических радиолярий все спикулы были направлены к центральному ядру. У спикулярных радиолярий действительно есть сходство с трехосной спикулой. В процессе геологической эволюции радиолярии, завоевывая океанские просторы, избавились от тяжелой спикулы. Губки, оставаясь бентосом, сохранили макро- и микроспикулы, но сделали их значительно более изящными. Так, в раннем палеозое спикулы массивные, в позднем мезозое – более пропорциональные, а в кайнозое [3] – изящные.

Полученные данные позволяют понять некоторые принципы организации спикул кремневых губок и радиолярий, придающие им такие специфические биологические свойства и функции, как гибкость и крепость, которые обусловили выживание их в абиссальных зонах Мирового океана.

Скелет кремневых микроорганизмов – это учебник по инженерной механике, использованию биогенных наннотехнологий, предлагающий

ценные знания, которые приведут к новым концепциям в материаловедении и инженерном проектировании [10].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 06-05-64859 и 07-04-00649) и программы Президиума РАН «Происхождение и эволюция биосферы».

1. Алешин В.В., Мыльников А.П., Петров Н.Б. Дерево корненожек // Природа. – 2005. – № 9. – С. 62-70.
2. Вишневецкая В.С. Радиоляриевая биостратиграфия юры и мела России. – М.: ГЕОС, 2001. – 376 с.
3. Иваник М.М. Палеогеновая спонгиофауна Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов. – Киев, 2003. – 202 с.
4. Куровский Д. Морская губка и ее оптические волокна // Разумный замысел. – 2008. – № 3. – С. 5-6.
5. Липман Р.Х. Позднемеловые радиолярии Западно-Сибирской низменности и Тургайского прогиба // Материалы по стратиграфии мезо-кайнозоя Тургайского прогиба, Северного Приаралья и Западно-Сибирской низменности. – Л., 1962. – С. 271-323. – (Тр. ВСЕГЕИ. Н.С.; Т. 77).
6. Эрлих Г., Ересковский А.В., Дроздов А.Л. и др. Современный подход к деминерализации спикул стеклянных губок (Porifera: Hexactinellida) с целью извлечения и исследования протеинового матрикса // Биология моря. – 2006. – Т. 32, № 3. – С. 217-224.
7. Bengtson S. Siliceous microfossils from the Upper Cambrian of Queensland // Alcheringa. – 1986. – № 10. – P. 195-216.
8. Ehrlich H., Maldonado M., Hanke T. a.o. Spongings: nanostructural investigations and development of biomimetic material model // VDI Berichte. – 2003. – № 1803. – P. 287-290.
9. Müller W.E.G., Schwertne H., Müller I. Porifera – a reference phylum for evolution and bioprospecting: the power of marine genomics // Keio Journ. Med. – 2004. – Vol. 53, N. 3. – P. 159-165.
10. Won M.-Z., Below R. Cambrian radiolarians from the Georgina Basin, Queensland, Australia // Micropaleontology. – 1999. – Vol. 45, N. 4. – P. 325-363.
11. www.physorg.com:80/news5036.html

¹ Геологический институт РАН,

Москва

² ИГЕМ РАН

Москва

Таблица I
Различная форма кремневых игл радиолярий и спикул губок

- 1 – *Acanthosphaera parvipora* Squinabol со спикуловидными иглами правильной круглой формы в сечении и приблизительно одной толщины; альб–сеноман Кубы
- 2 – *Spongiosphaera* sp. с тонкими стержневидными иглами различного диаметра; альб–сеноман Кубы
- 3-4 – *Alievium helenae* Schaaf. На фиг. 4 хорошо видны иглы различной формы: основная стержневидная игла трехгранная (вверху снимка), второстепенные круглые иглы (слева), часто со следами от крепления губчато-сферических оболочек в виде опоясывающих иглу обручей (слева внизу снимка), внешне напоминающая спикулы демоспонгий *Cricostyles*. Фиг. 3 демонстрирует деталь строения дополнительных игл. Это круглые иглы с острым шипом на конце или отдельные тонкие шипы, отходящие от стенок, окаймляющих ячеи; альб–сеноман Кубы
- 5-7 – *Praeconocaryomma universa* Pessagno. Все иглы обломаны, но на местах их крепления сохранились трехлучевые сочленения, слегка выступающие над поверхностью – это следы крепления трехгранных игл; альб–сеноман Кубы. 7a – трехгранная игла; сеноман–турон Горного Крыма
- 8-9 – *Actinomma* sp. Стержневидные трехгранные иглы частично обломаны, хорошо видно трехлучевое сочленение на месте крепления иглы; коньяк–сантон, хотьковская серия, Теплый Стан г. Москвы, Россия
- 10 – трехлучевая спикула с обломанными концами игл; верхний мел, пограничные слои сантона и кампана восточного склона Северного Урала, Россия
- 11 – псевдоаулофакоидное переплетение в стенке скелета радиолярии, образованное спикуловидными элементами; верхний мел, пограничные слои сантона и кампана Румынии
- 12-13 – *Sterraster* sp. Многочисленные сросшиеся лучи спикул, исходящие от единого центрального губчатого ядра, образуют сфероидную микроскелеру зуастер; верхний мел, пограничные слои сантона и кампана Румынии.
- 14 – сложное переплетение кремневых спикул в стенке скелета губки; коньяк–сантон, хотьковская серия, Теплый Стан г. Москвы, Россия

Таблиця I

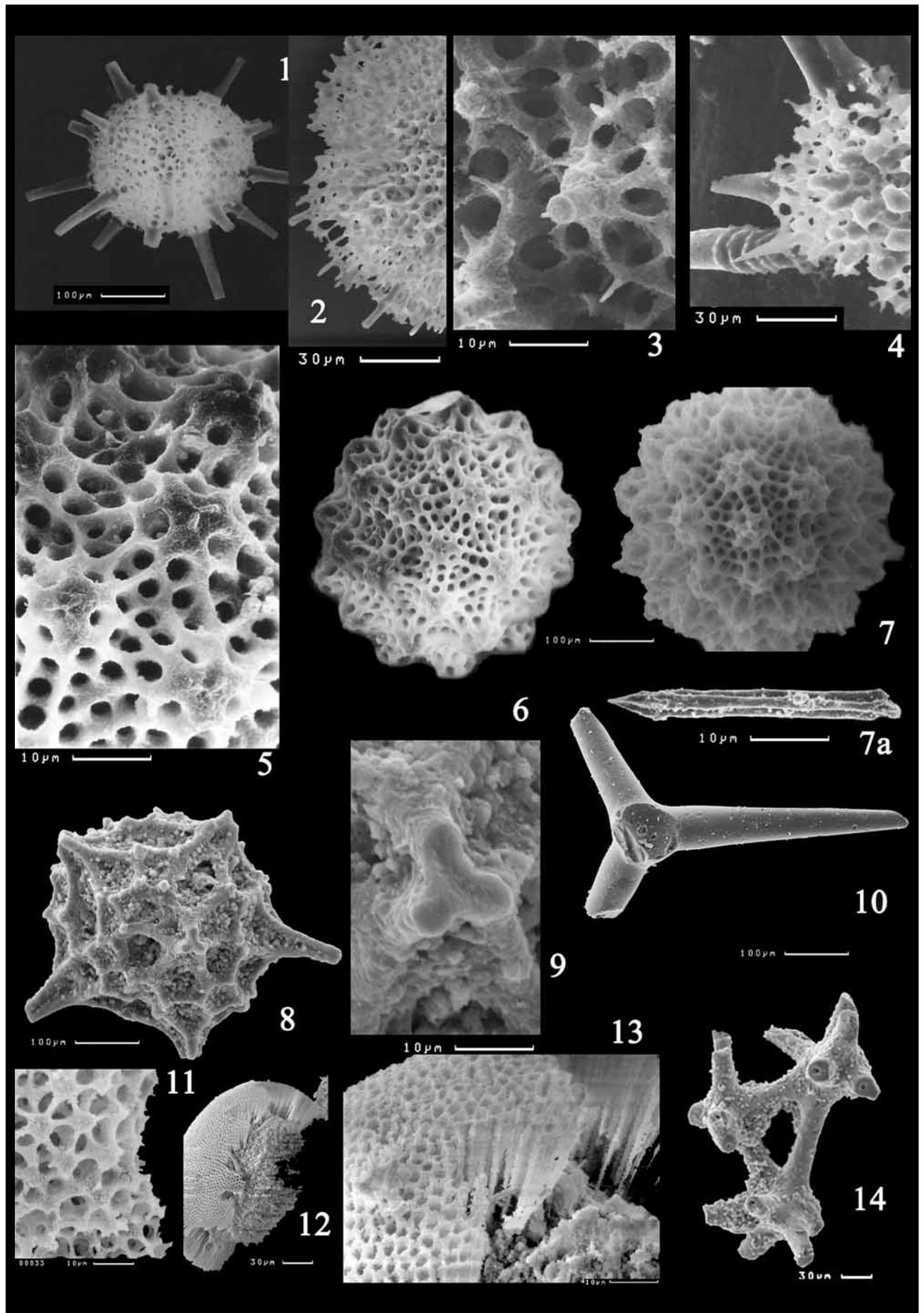


Таблица II

Микросклеры кремневых губок (1-3 – верхний мел, пограничные слои сантона и кампана восточного склона Северного Урала, Россия; 4-6 – современные осадки Атлантики)

1 – *Sterraster* sp. 1a – звездчатая поверхность массивной сфероидной микросферы

2 – *Sterraster* sp. Спикула округлой формы с небольшим углублением на одной стороне. 2a – звездчатая поверхность сфероидной микросферы

3 – *Sterraster* sp. Спикула округлой формы с небольшим углублением на одной стороне; звездчатая поверхность частично разрушена вследствие обламывания, видны в основном овальные сфероиды на поверхности микросферы. 3a – деталь участка, где сохранились звездчатые микросклеротические образования

4 – *Sterraster* sp. Спикула овальной формы. В поле зрения попали также одноосные мелкие спикулы (микросклеры) длиной до 10 мк и диаметром менее 1 мк. 4a, 4б – звездчатая поверхность сфероидной микросферы. 4б – хорошо видны микроскопические ортотриены. На этом снимке видна объемность лучей

5 – свал кремневых игл. 5a – хорошо видны микроастры, длинные иглы у которых обломаны и находятся местами поблизости

Таблица II

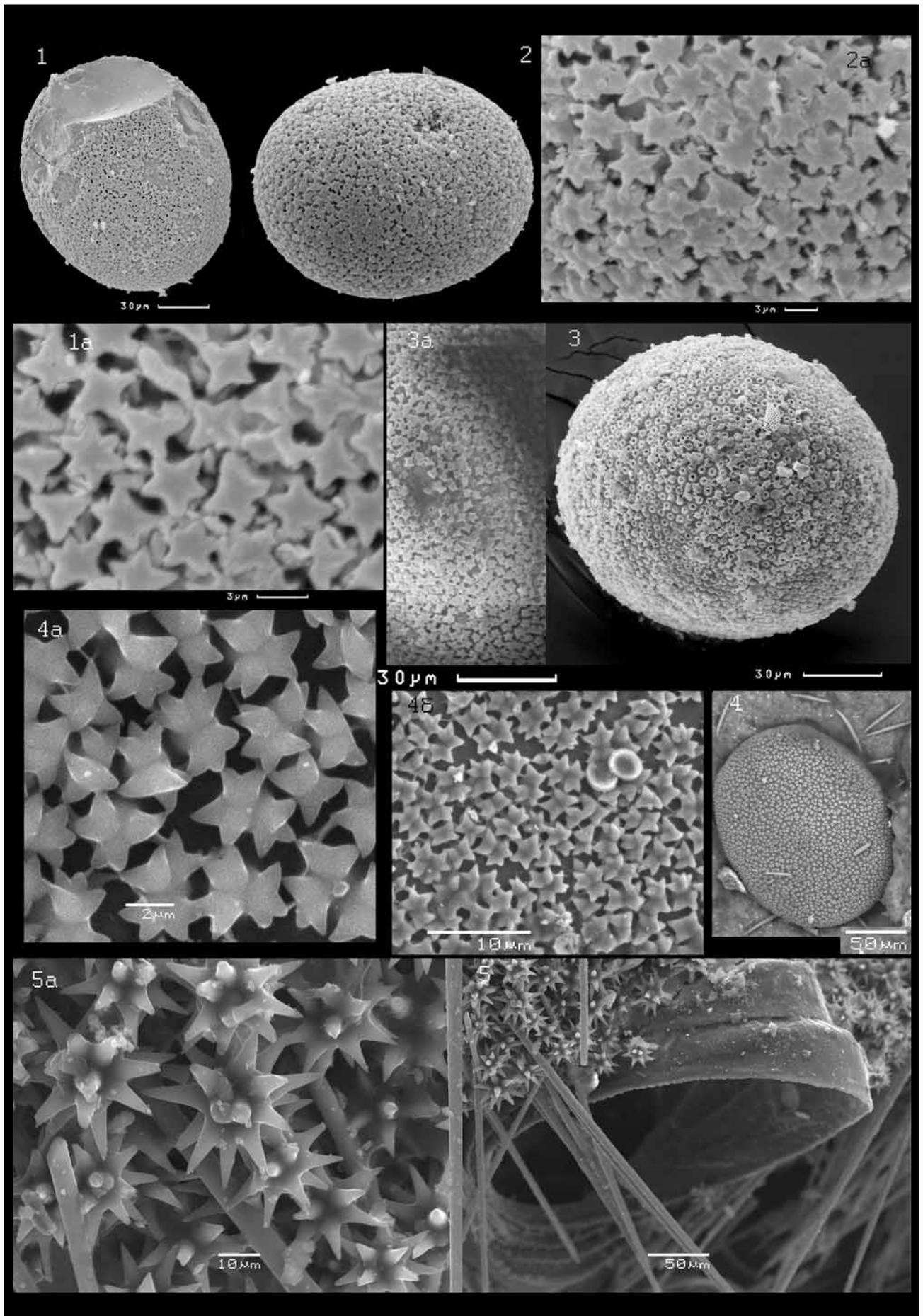


Таблица III

Микросклеры (1-8) и макросклеры (9-12) кремневых губок. Верхний мел, пограничные слои сантона и кампана восточного склона Северного Урала, Россия

1, 2, 8 – *Erulus* sp. Микросклеры овальной формы, на изломе которых хорошо видны сросшиеся лучи спикул, исходящие от единого центрального губчатого ядра

3-7 – *Sterraster* sp. Спикулы округлой формы с небольшим углублением на одной стороне. 3 – звездчатая поверхность частично разрушена вследствие обламывания верхних лучей. 4-6 – звездчатая поверхность практически не сохранилась, видны в основном овальные сфероиды на поверхности микросферы

9, 12 – многоосные спикулы

10 – четырехосная спикула

11 – трехосная спикула с коротким основным стержнем и разветвленными (раздвоенными и разтроенными) лучами

Таблиця III

