

# БИОМИМЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ СТЕКЛЯННЫХ ГУБОК

А. Л. Дроздов *НЦМБ ДВО РАН*



Бионика, или биомиметика – это особый подход к созданию объектов или технологических устройств при заимствовании идей у живой природы.

Многофункциональные структуры, системы и биогенные материалы, встречающиеся у живых организмов, заимствуются представителями разных научных дисциплин.

Стеклянные губки (Hexactinellida) – это класс морских губок (600 видов), морфологические и биохимические «изобретения» которых могут заимствоваться для биомиметики.

В типе Porifera насчитывается от 5500 до 9000 видов губок. Встречаются от уреза воды до 4000 м. Около 250 пресноводных видов. Тип разделен на 3 класса:

Класс Известковые губки **Calcispongia**, или **Calcarea**

Отряд **Homocoela**

Отряд **Heterocoela**

Класс **Homoscleromorpha**

Класс Обыкновенные губки **Demospongia**

Отряд **Tetragonida**

Отряд **Cornacuspongida**

Класс Стекланные или Шестилучевые губки **Hyalospongia**, и видов с 5 отрядами:

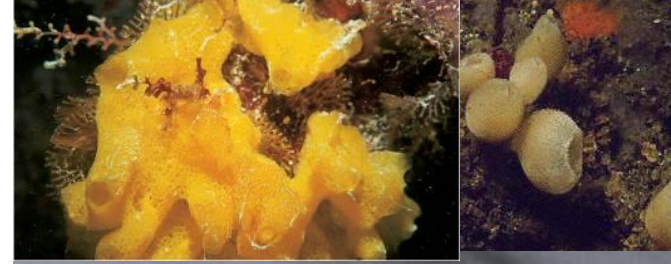
**Amphidiscosida**

**Lyssacosida**

**Lychniscosida**

**Hexactinosida**

**Aulocalycoida**

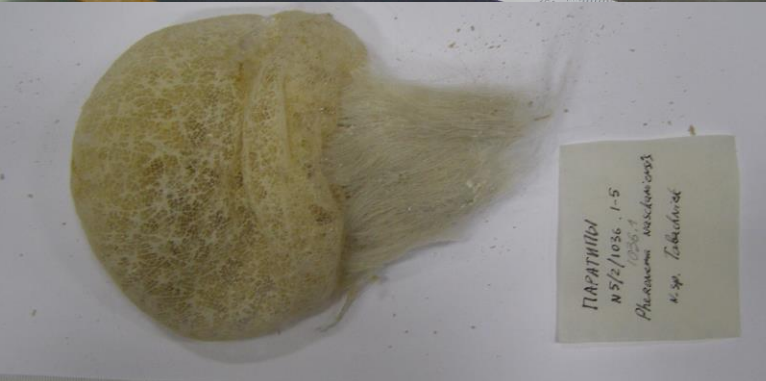






Бараш 2/11  
от 2006

N 1387  
Platydictyon  
placense Schuber  
det. Tabachnick



ПАРАТИНИ  
N 52/1036, 1-5  
1036.1  
Phlebotomus nasutus  
n. sp. Tabachnick



ГОЛОТИНИ !!!  
Schuboniella n. sp.  
Schuboniella gigas (Schub)  
P. koppani n. sp. Schub  
ssp. spinosum N. sp.  
TABACHNICK

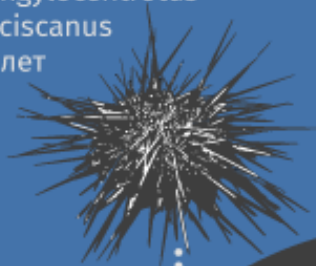
ГОЛОТИНИ  
N 52/1033  
Schuboniella gigas  
spinosum ssp. n.

Scientific  
Type Specimens  
No. 1033  
1033.1  
1033.2  
1033.3

1317  
200-300

# Животные-долгожители

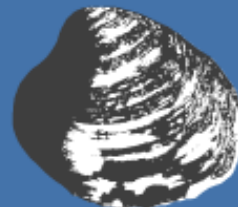
морской ёж  
*Strongylocentrotus franciscanus*  
200 лет



гренландский кит  
*Balaena mysticetus*  
211 лет



двустворчатый моллюск  
*Arctica islandica*  
507 лет



стеклянная губка  
*Monorhaphis chuni*  
11 тыс. лет



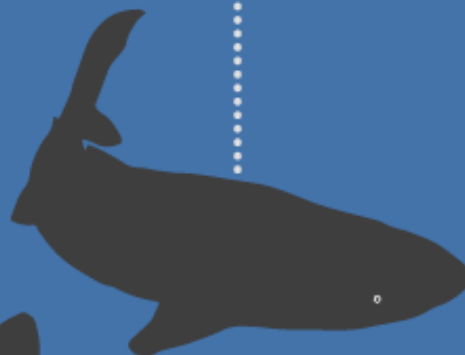
0



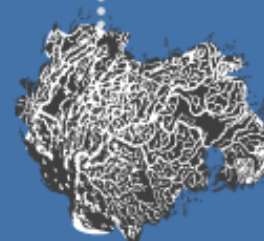
голый  
землекоп  
*Heterocephalus glaber*  
30 лет



алеутский окунь  
*Sebastes aleutianus*  
205 лет



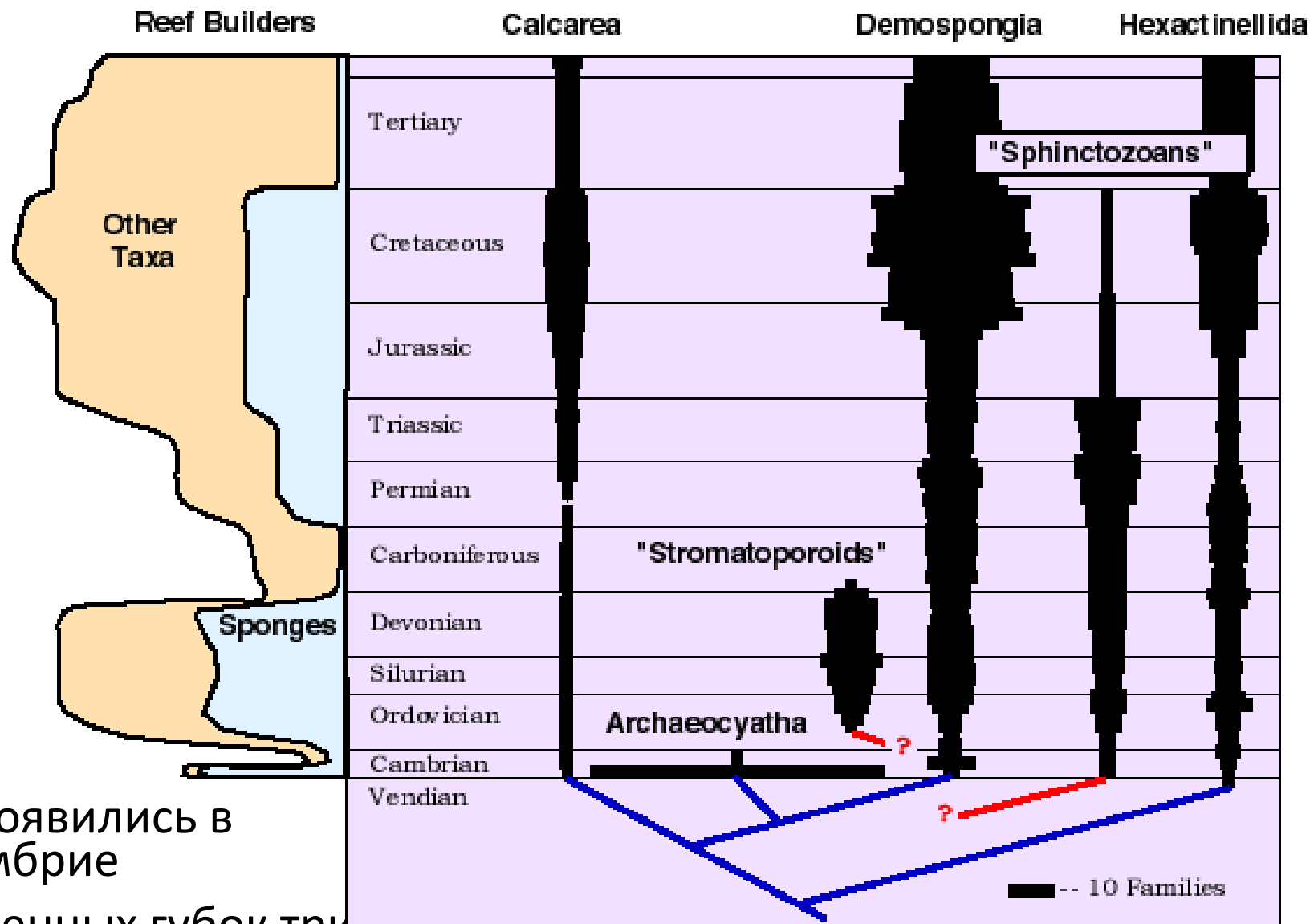
гренландская акула  
*Somniosus microcephalus*  
400 лет



коралл  
*Gerardia sp.*  
2742 года

∞

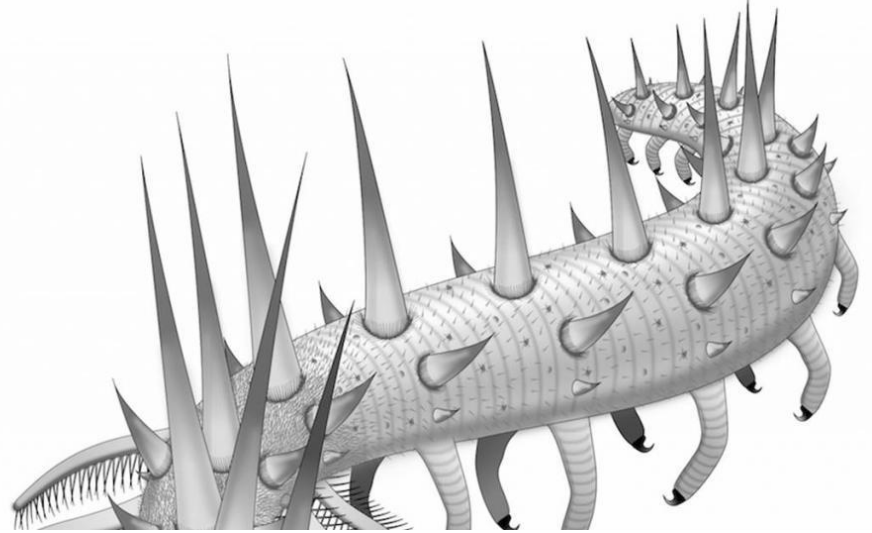
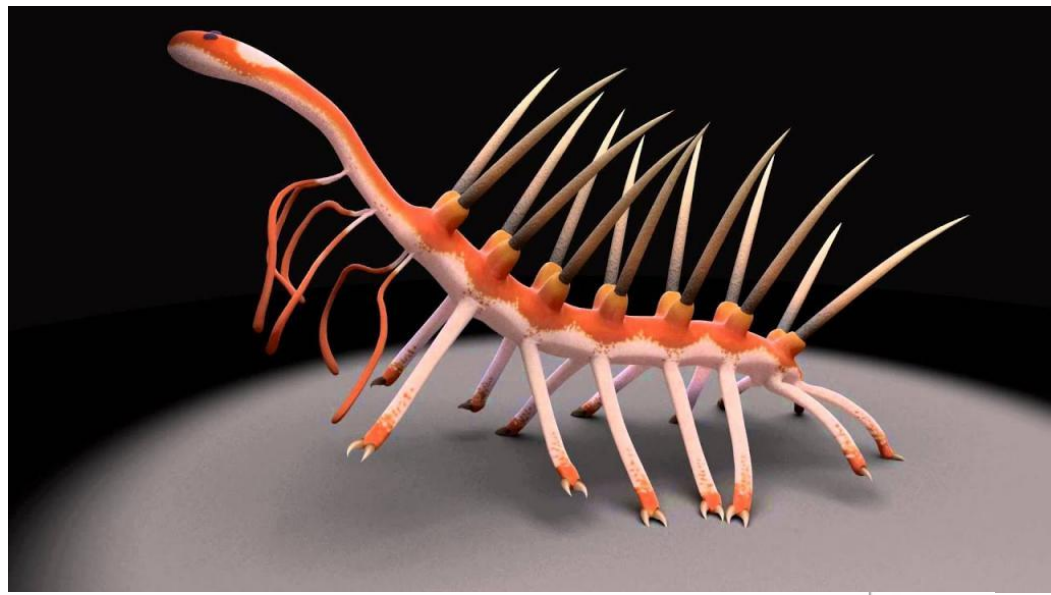
# История губок



Губки появились в докембрии

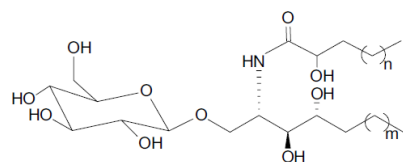
Современных губок три класса

Три класса вымерли





**Стеклянные губки не синтезируют токсинов**, потому что на больших глубинах, в которых они живут, хищников мало. *Krautter M.* [Ecology of siliceous sponges: Application to the environmental interpretation of the Upper Jurassic sponge facies \(Oxfordian\) from Spain](#) // Cuadernos de Geología Ibérica. — 1998. — Vol. 24. — P. 223—239.

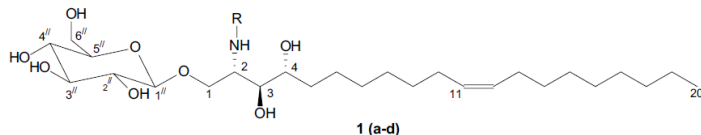


A: monoenoic C<sub>22</sub> fatty acid residue (n=18:1)  
monoenoic C<sub>20</sub> sphingoid base residue (m=14:1)

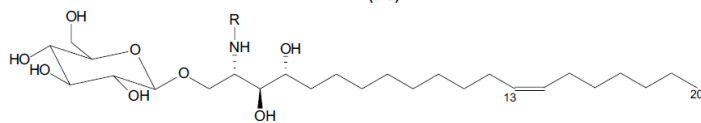
B: monoenoic C<sub>24</sub> fatty acid residue (n=20:1)  
monoenoic C<sub>20</sub> sphingoid base residue (m=14:1)

Fig. 1 A-type and B-type cerebrosides found previously in some hexactinellid sponges

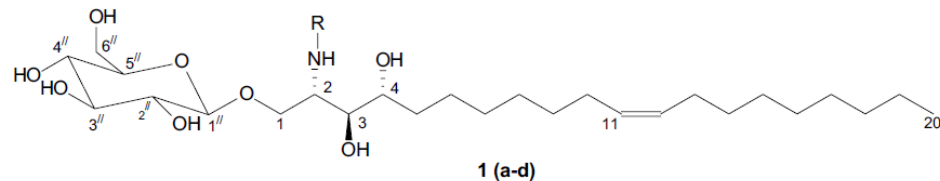
Lyssacosinosa, family Rossellidae). Their structures were elucidated on the basis of <sup>1</sup>H-, <sup>13</sup>C-NMR spectroscopy (including <sup>1</sup>H-<sup>1</sup>H COSY, DEPT, HSQC, HMBC experiments), mass spectrometry (including GC-MS, EI-MS, ESI-MS method; optical rotation data and chemical transformations. Most these compounds differ in saturated C<sub>20</sub>, monoenoic C<sub>23</sub> ac residues or/and in cyclopropane-containing sphingoid base residue from A-type and B-type cerebrosides earlier reported. Moreover, the monoenoic and cyclopropane-containing sphingoid bases of compounds **1a-d**, **2a**, **2b**, **3a-c** have not been found previously in any sphingolipids. In the process of the study, we developed a simplified method (in comparison with [4]) for the assignment of the absolute configuration 2-hydroxy fatty acids (2-hydroxy FA) by GC analysis of the (2*R*)- and (2*S*)-oct-2-yl esters of authentic reference compounds.



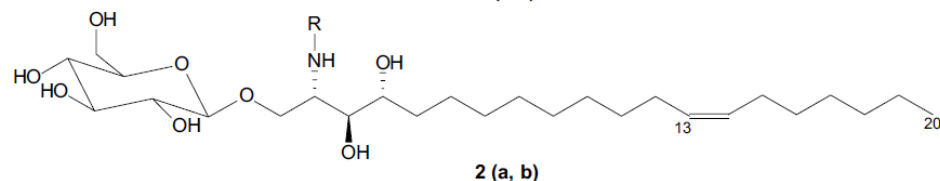
1 (a-d)



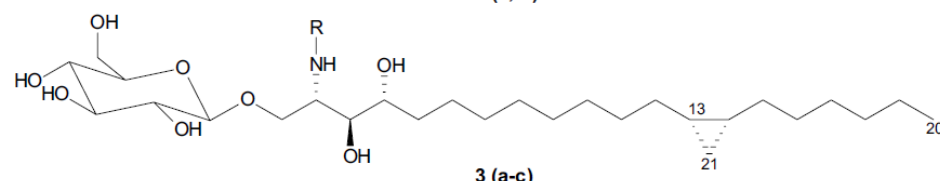
2 (a, b)



1 (a-d)

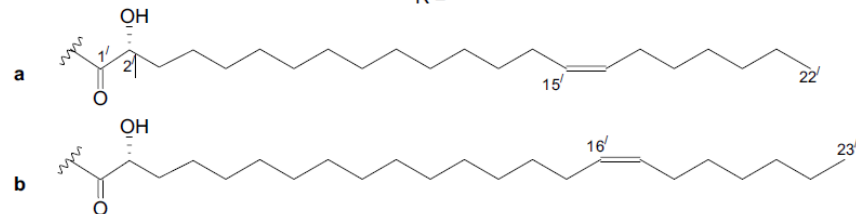


2 (a, b)



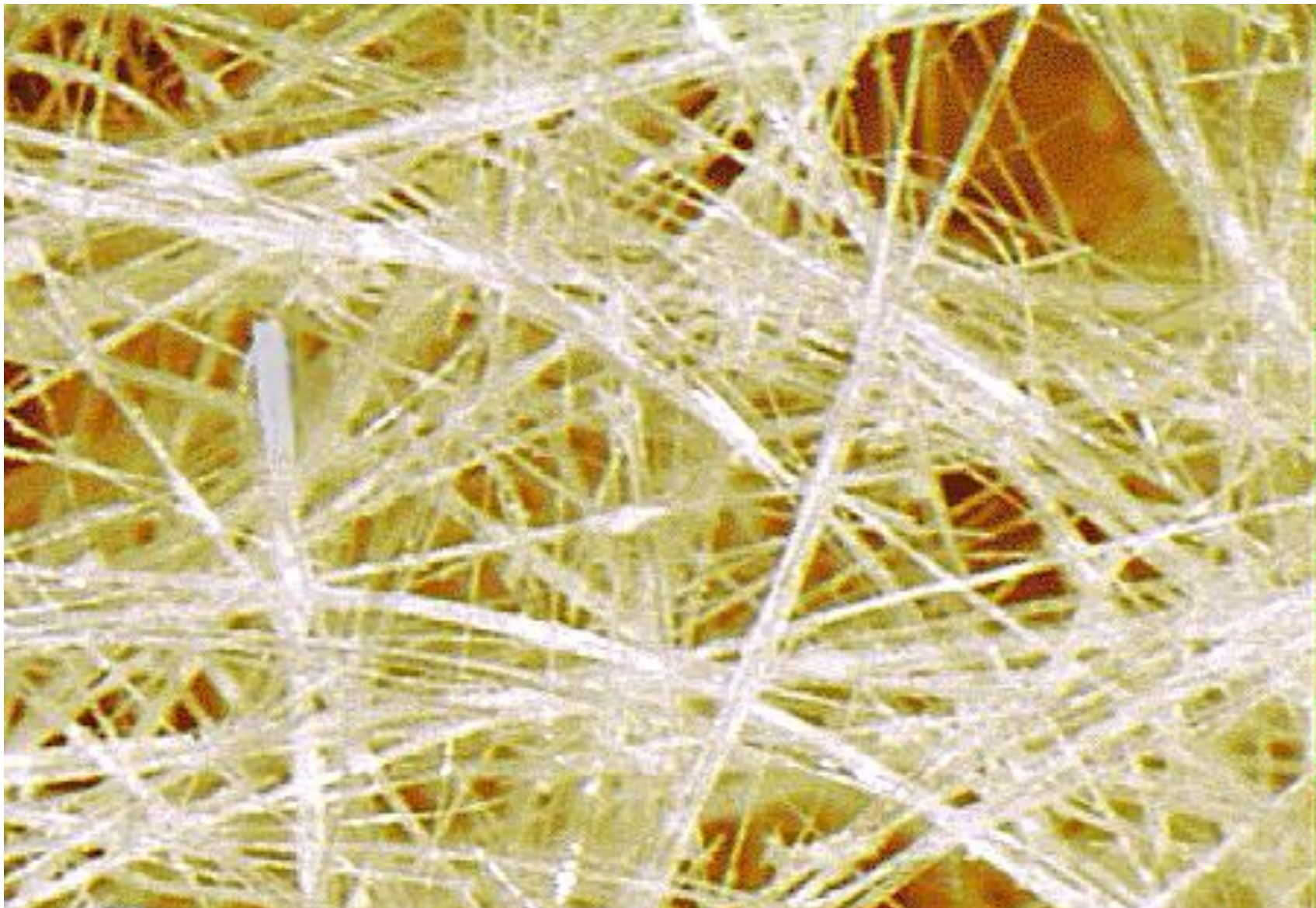
3 (a-c)

R =

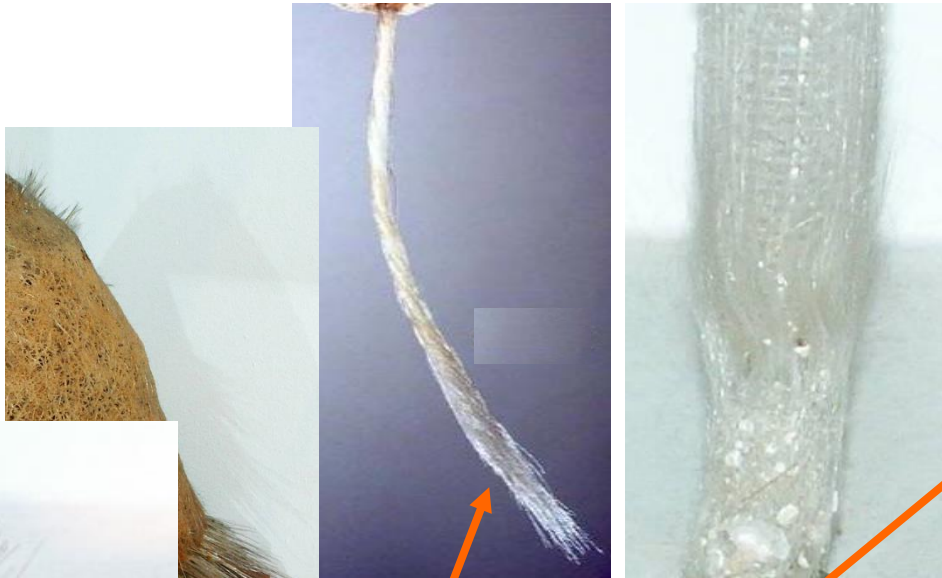


Santalova E.A., Denisenko V.A., Dmitrenok P.S., Drozdov A.L., Stonik V.A.  
Cerebrosides from a Far-Eastern Glass Sponge *Aulosaccus sp.* // Lipids. 2015. Vol. 50.  
P. 57–69.

# Спикулы стеклянных губок



# Спикулы морских стеклянных губок

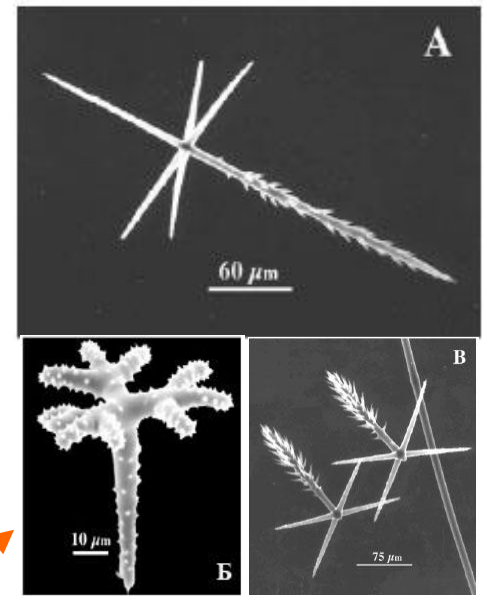


Базальные (якорные) спикулы  
Служат для механической связи с окружающей средой

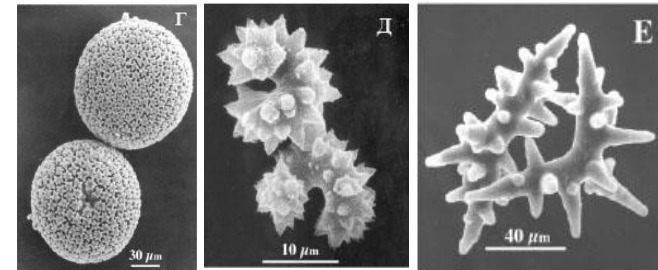
Скелетные спикулы

Служат для придания телу губки механической прочности и выполняют защитные функции

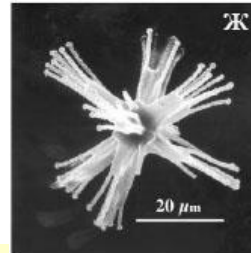
Глубина обитания Морских  
стеклянных губок: 30-5000, м



Мегасклеры – формируют скелет губки



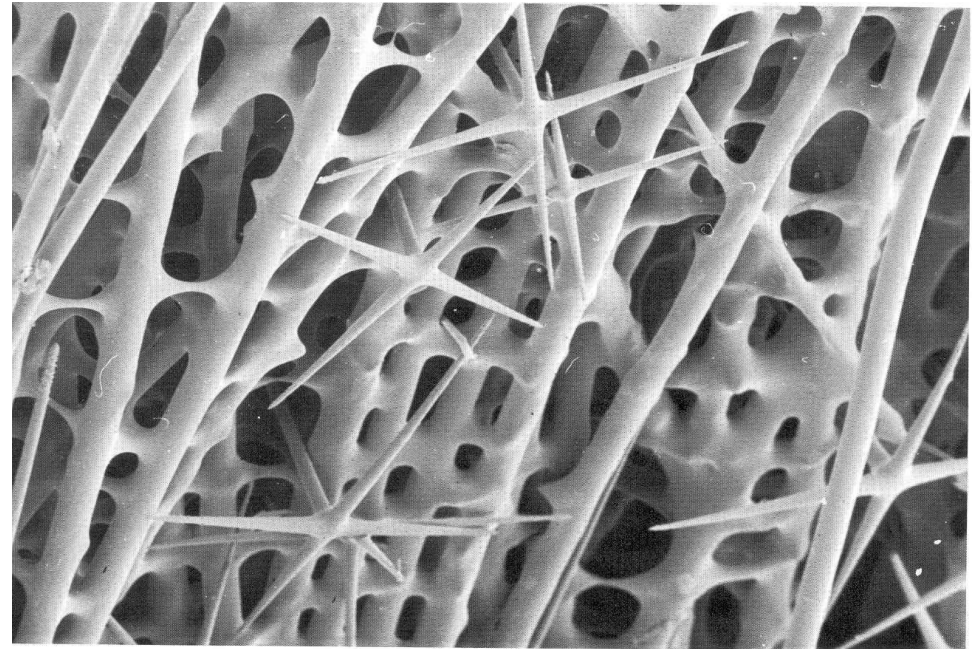
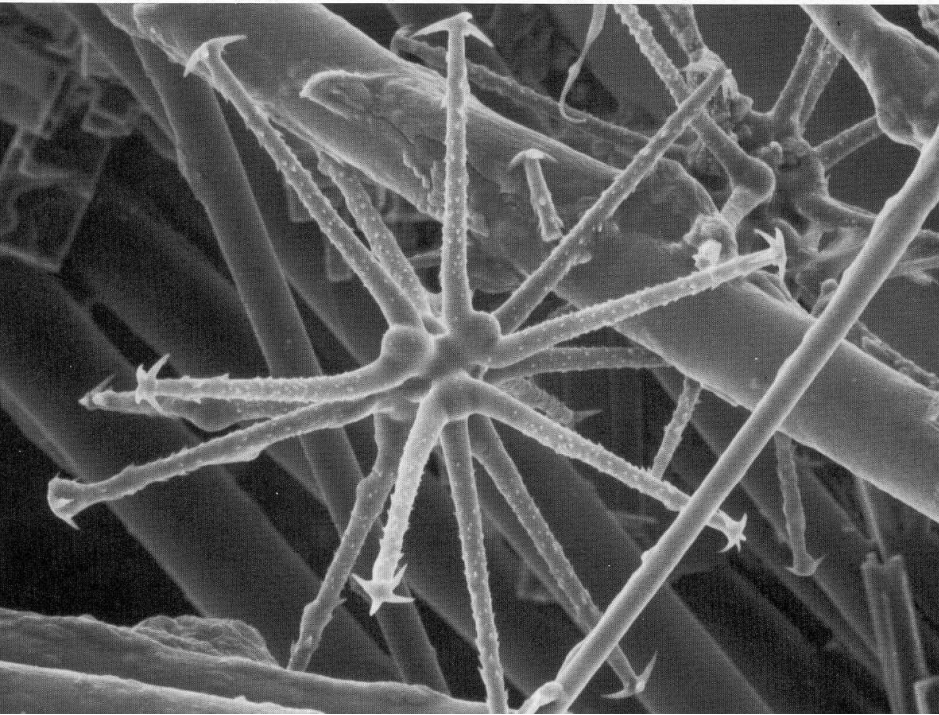
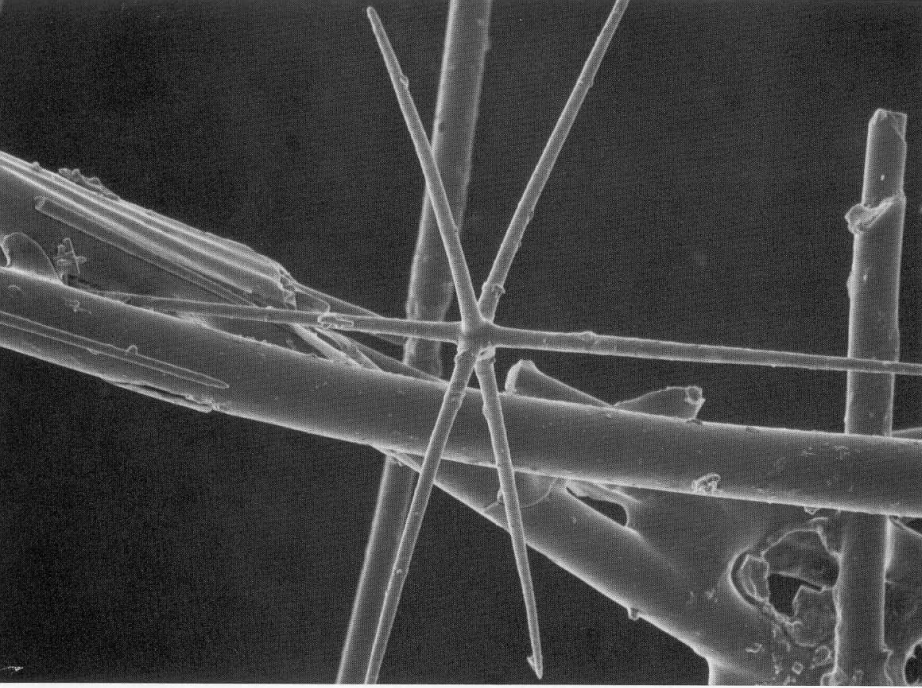
Микросклеры,  
находятся  
внутри тела  
губки

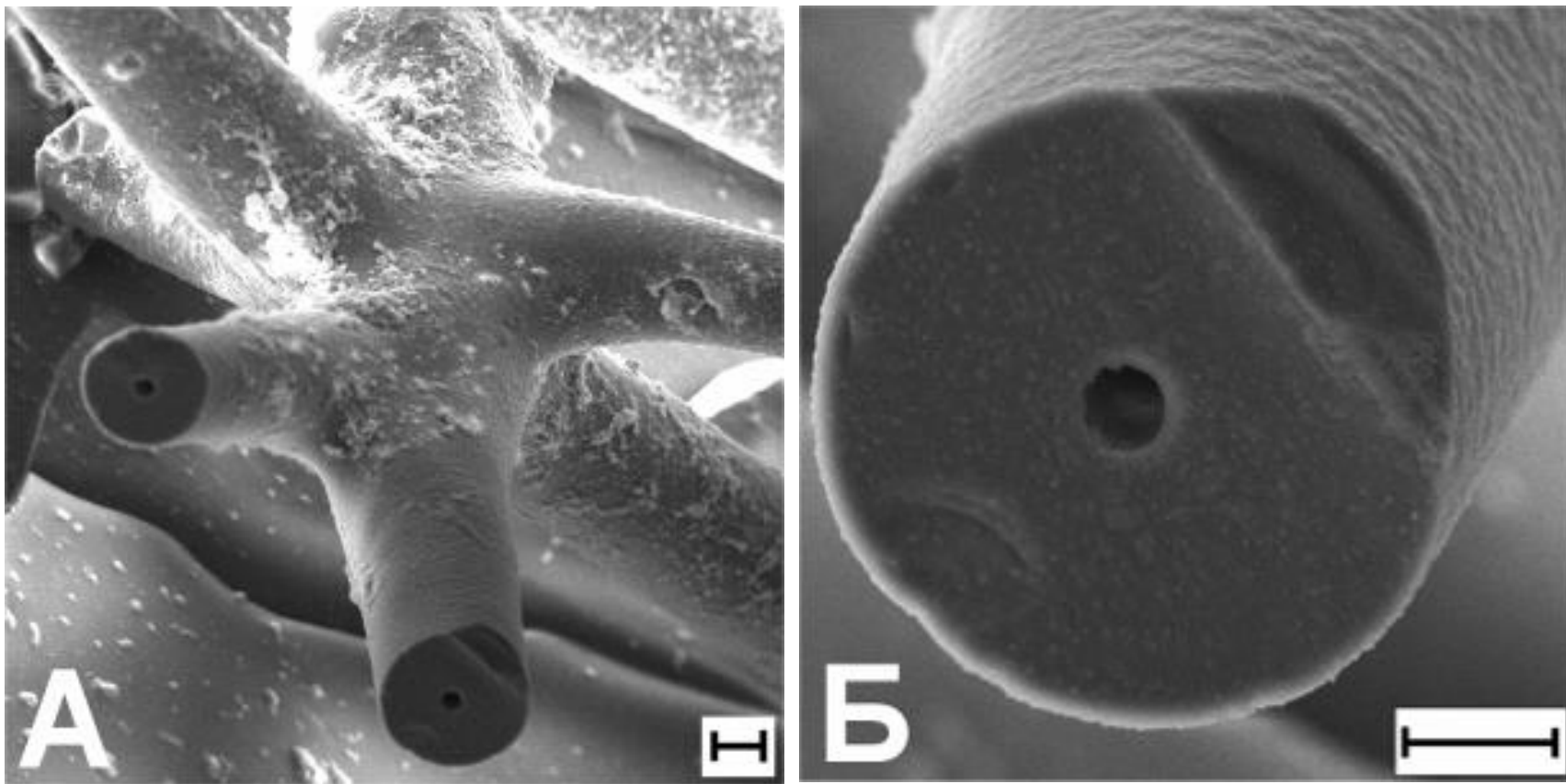


SEM-photography of sponge's spicules  
Demospongiae и Hexactinellida  
Müller W. E.G., Wendt K., Geppert Ch., Wiens M.,  
Reiber A., Schröder H. C. Biosensors and  
Bioelectronics. 2006. Vol. 21. P. 1149–1155.

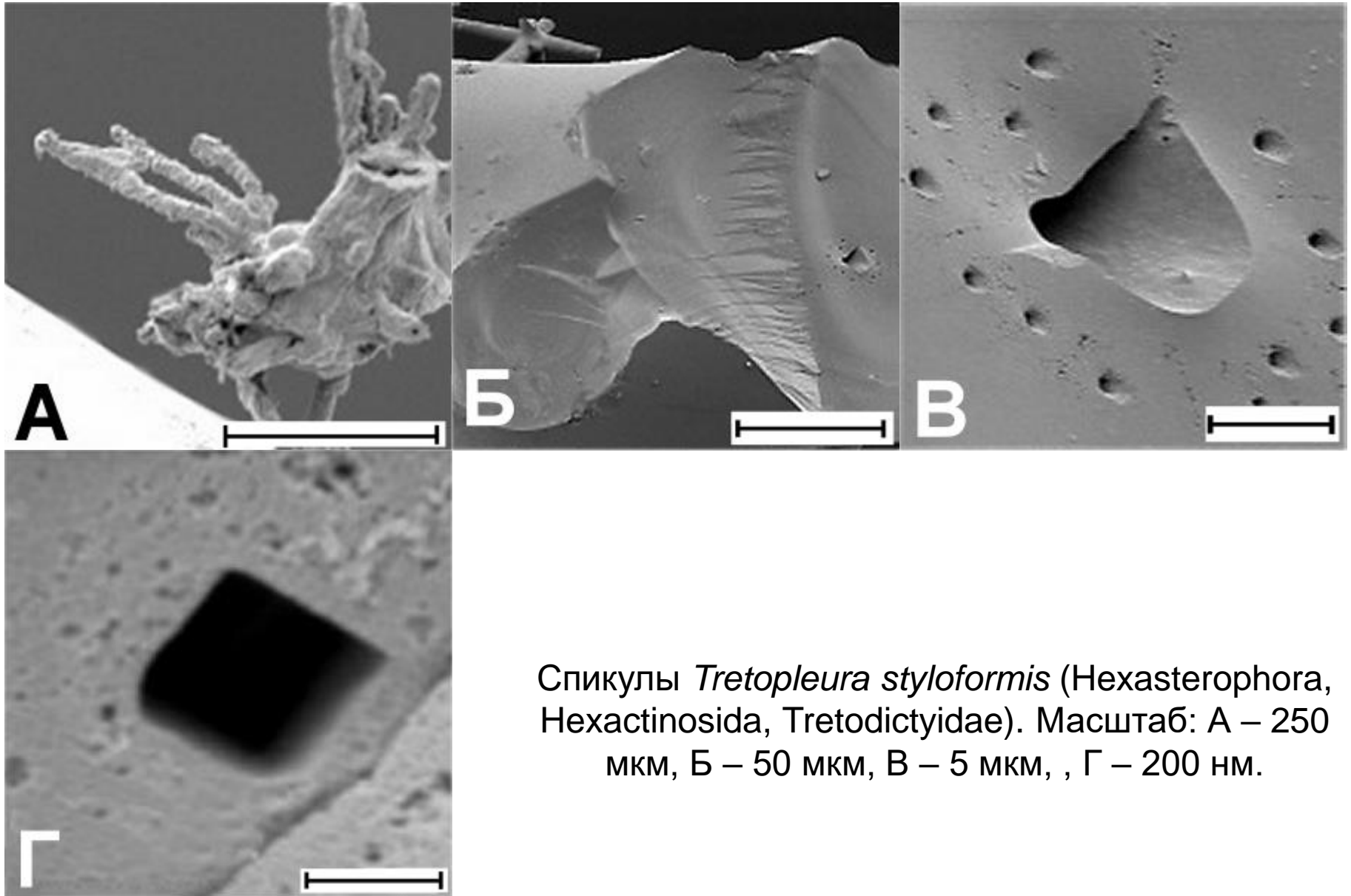
Средние геометрические размеры спикул: длина: 0,001 – 2 м  
диаметр: 5 μм – 3 см

**Siliceous spicules in  
Hexactinellida  
(Triaxon) six rayed  
spicules.**

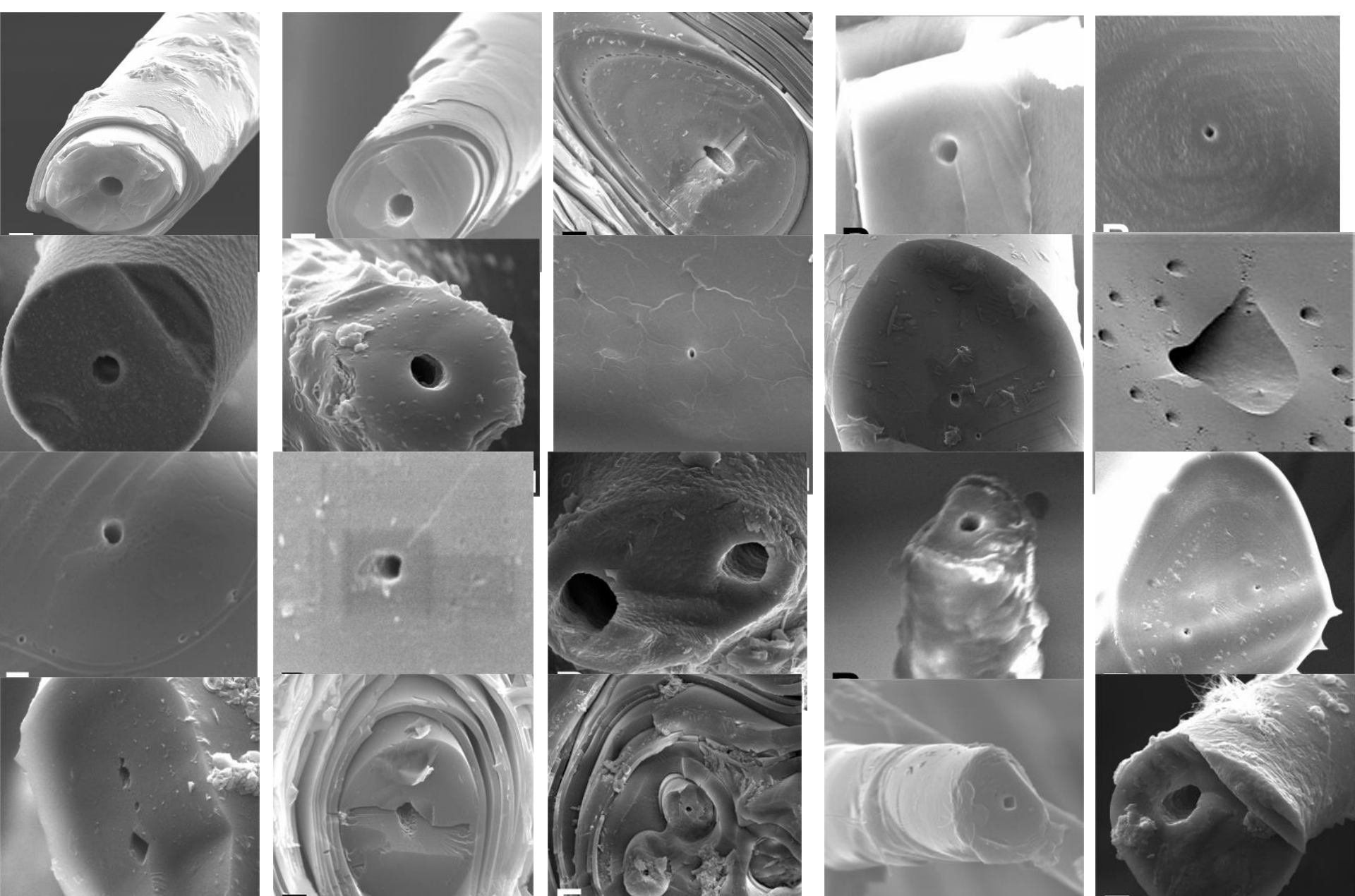


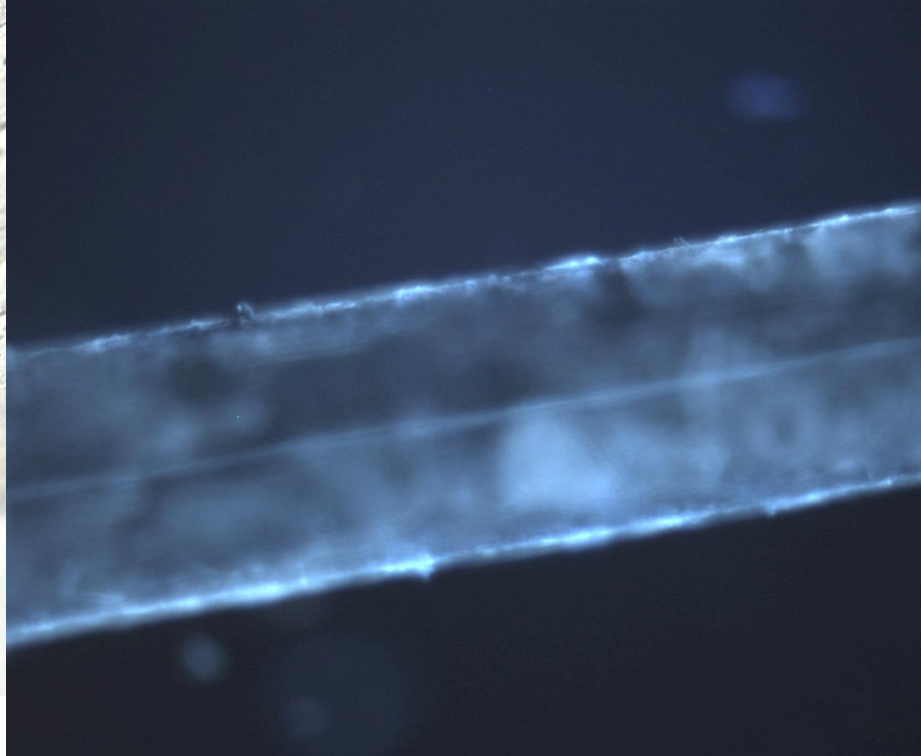
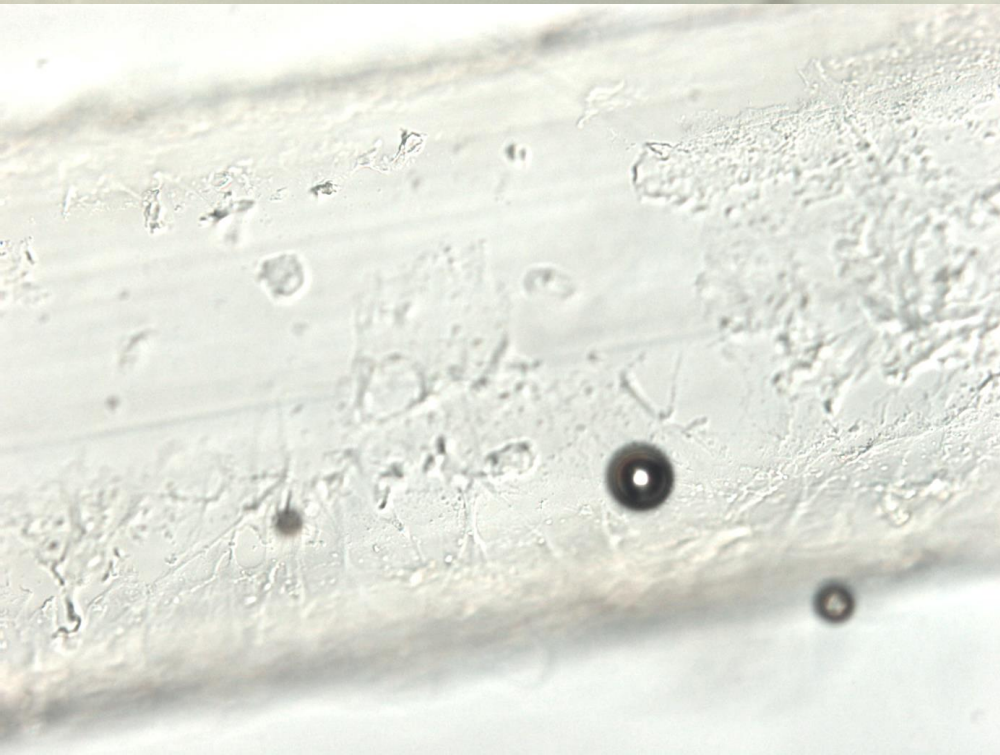
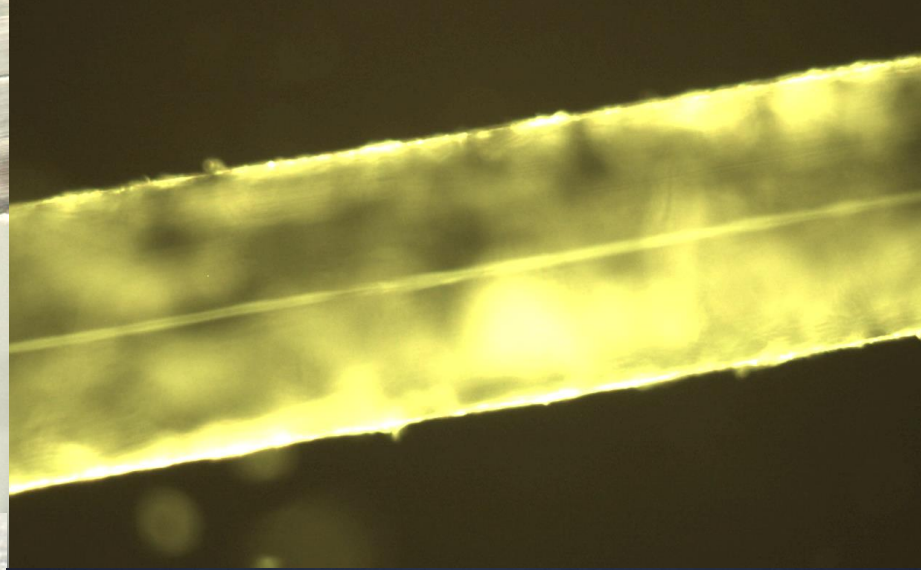
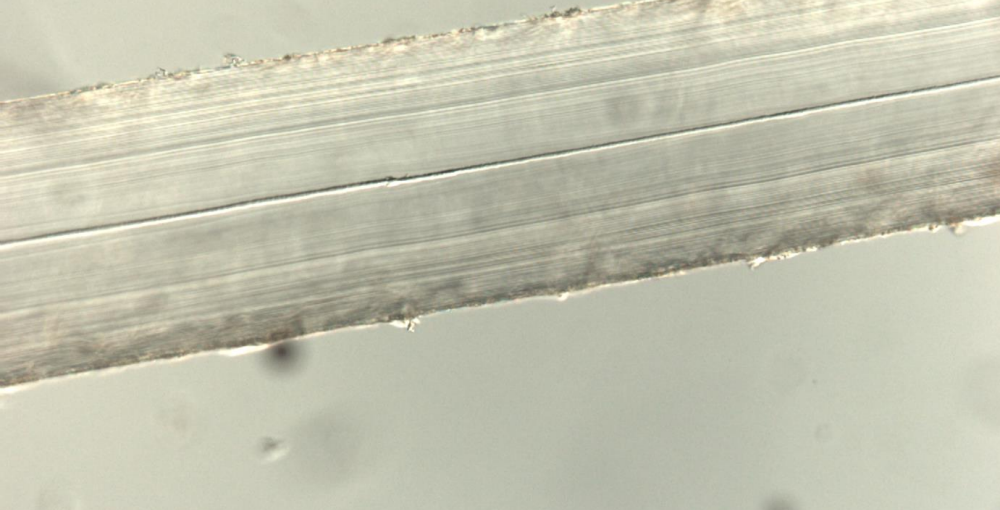


Спикулы *Farrea* sp. (Hexasterophora, Hexactinosida, Farreidae). Масштаб: А – 200 мкм, Б,В – 2 мкм.

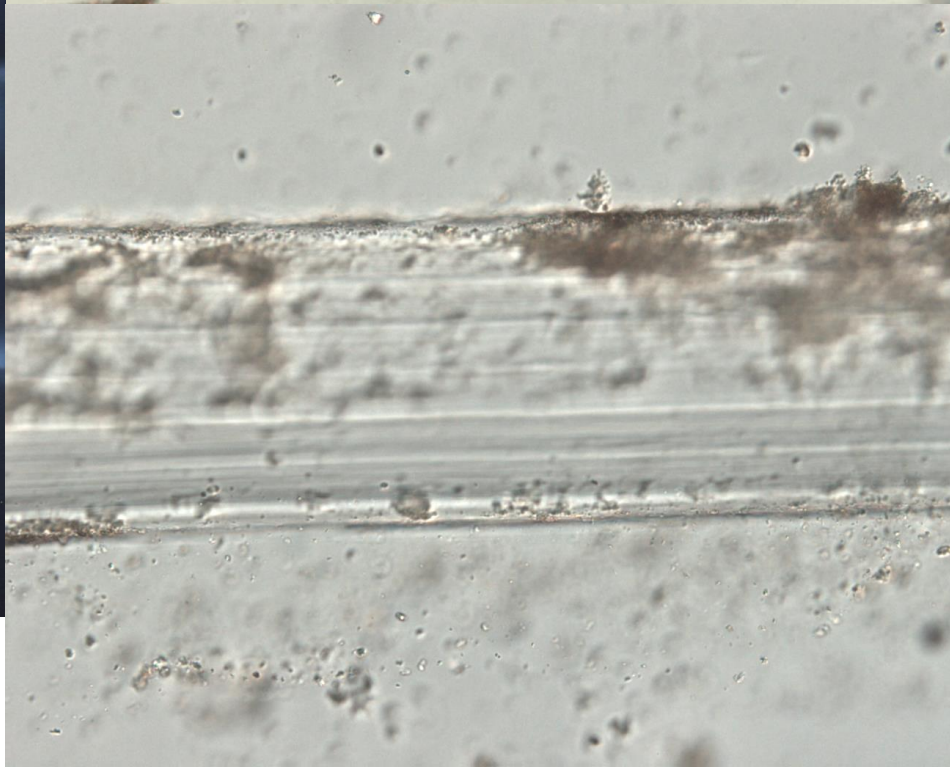
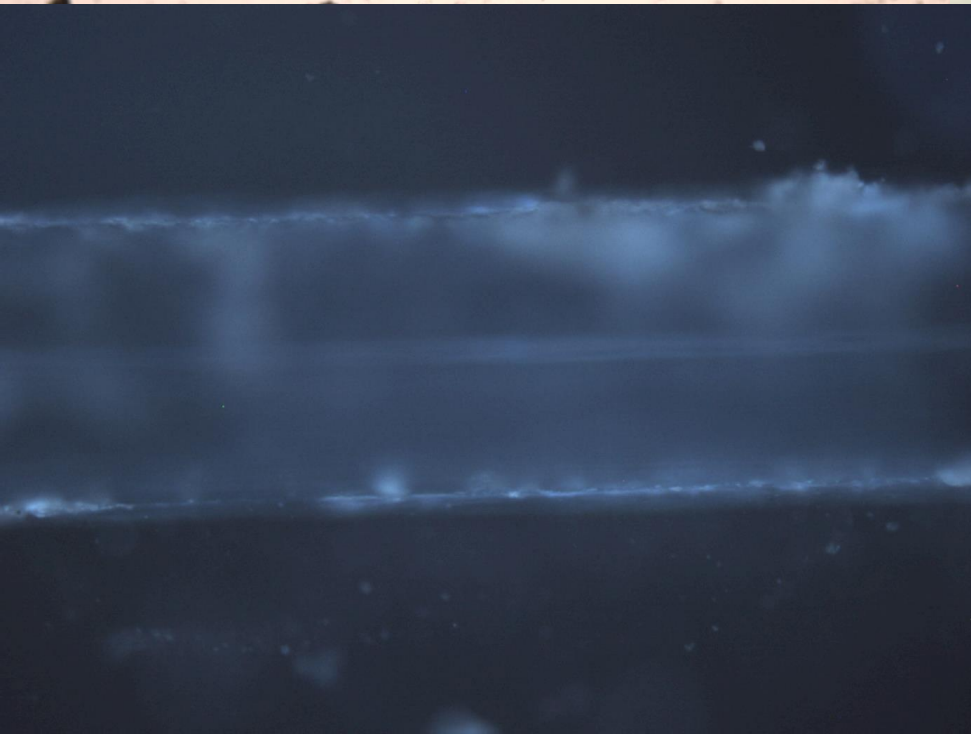
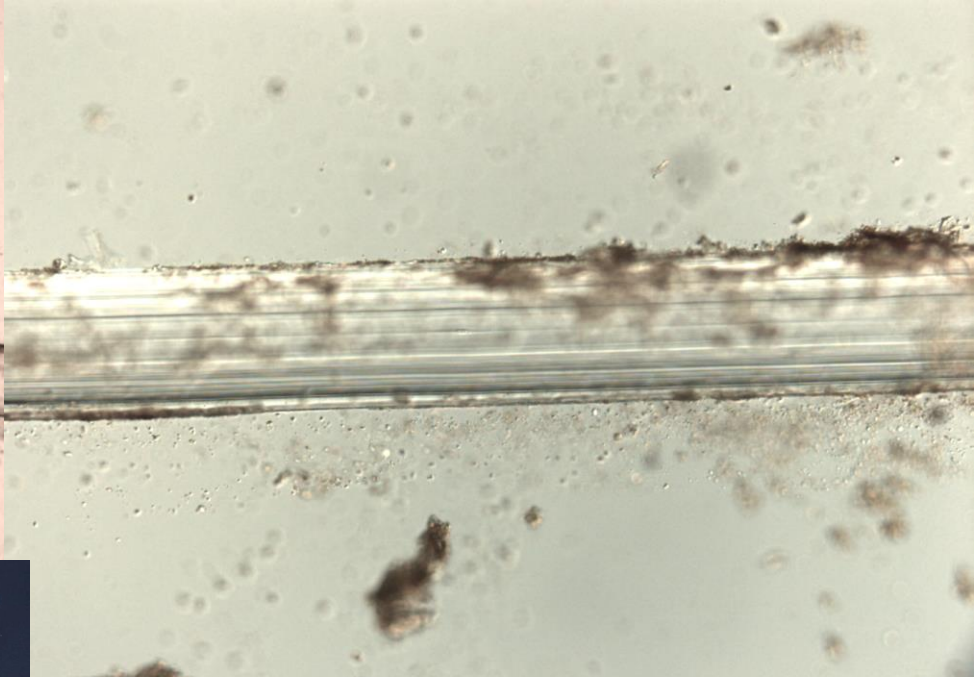
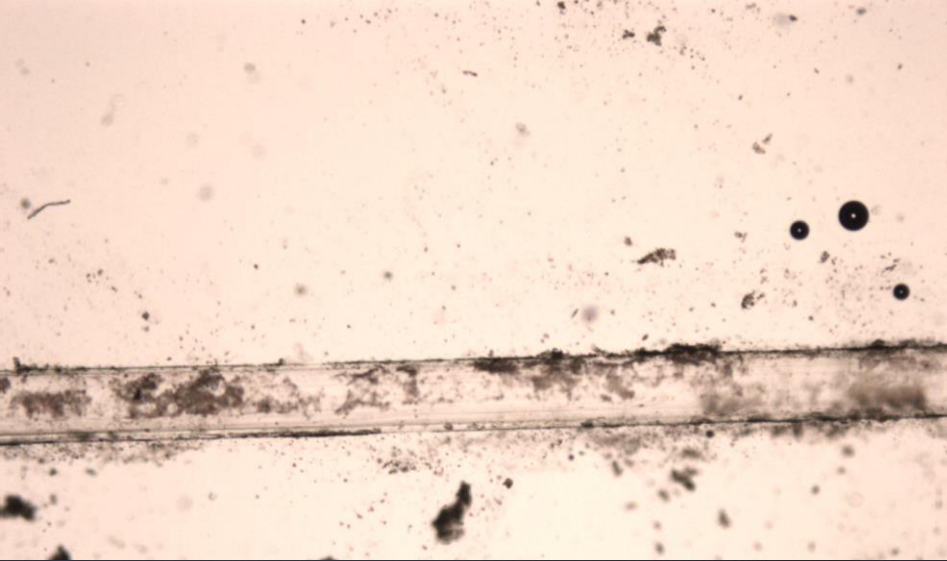


Спикулы *Tretopleura styloformis* (Hexasterophora, Hexactinosida, Tretodictyidae). Масштаб: А – 250 мкм, Б – 50 мкм, В – 5 мкм, Г – 200 нм.

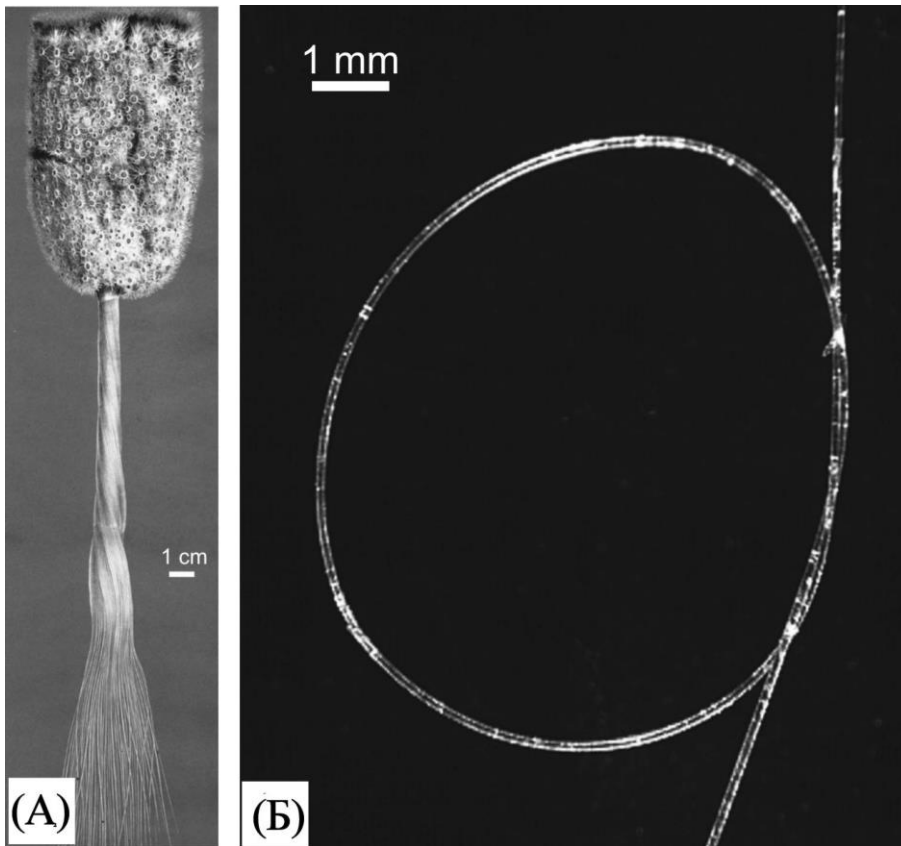








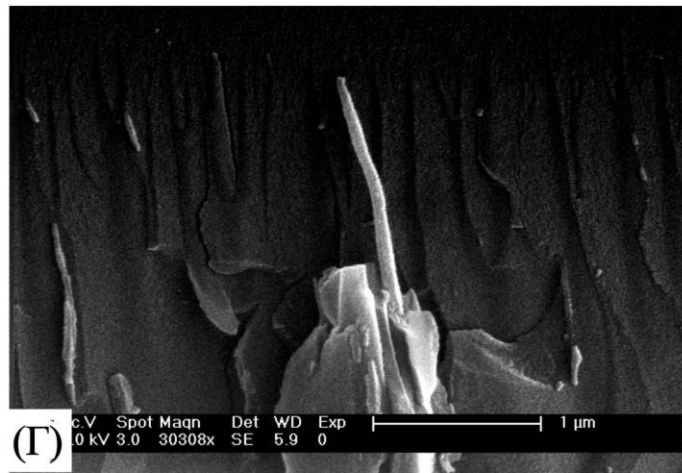
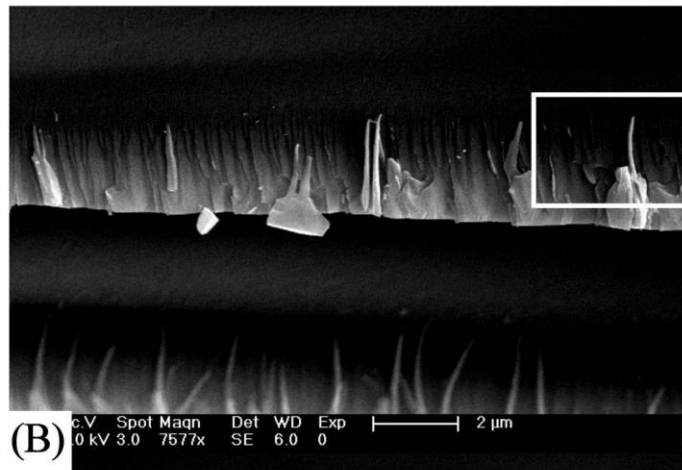
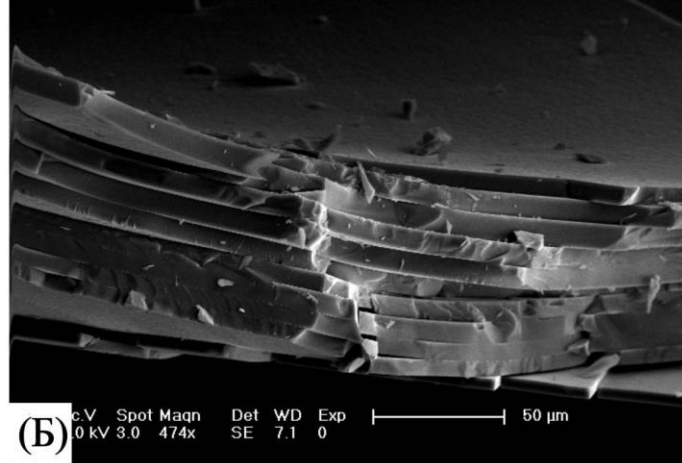
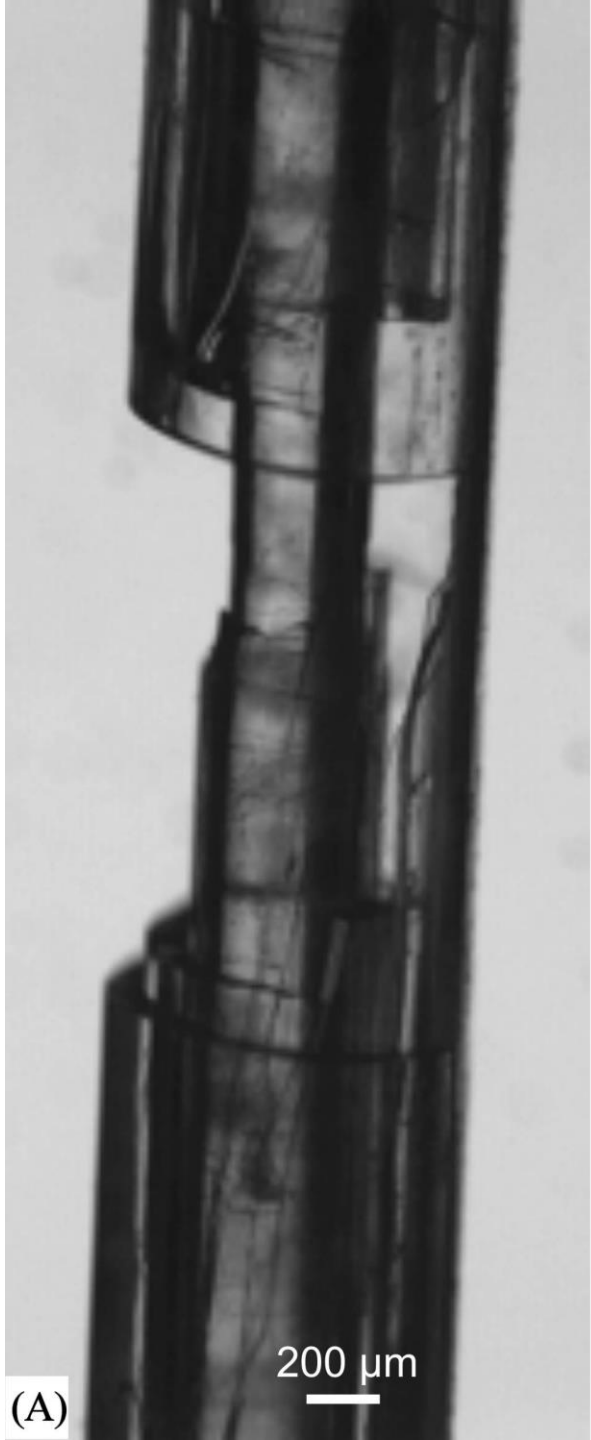
*Platilistrum platessa*

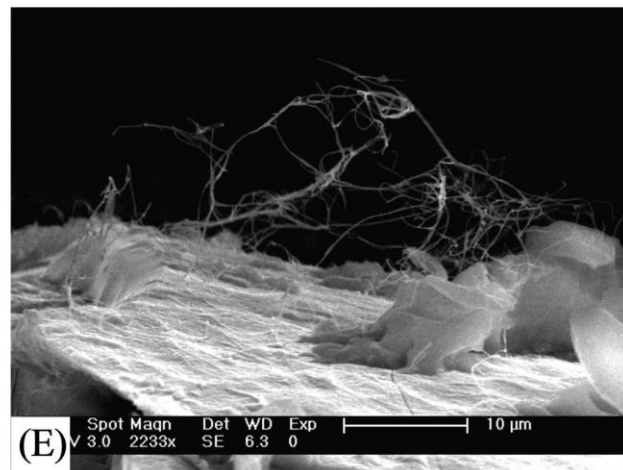
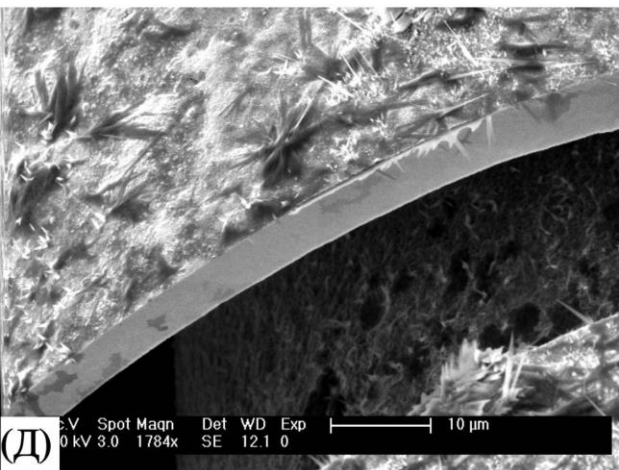
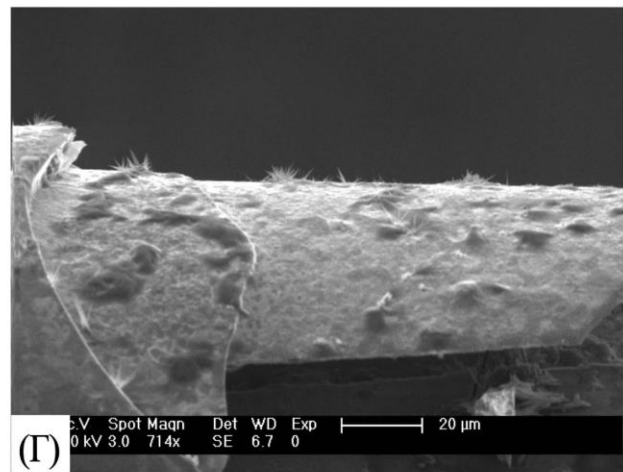
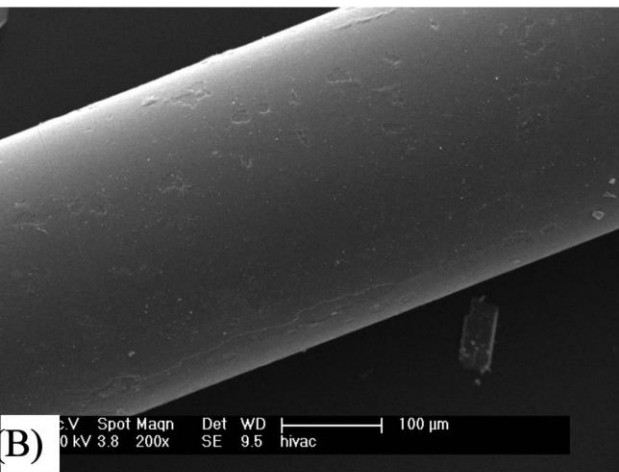
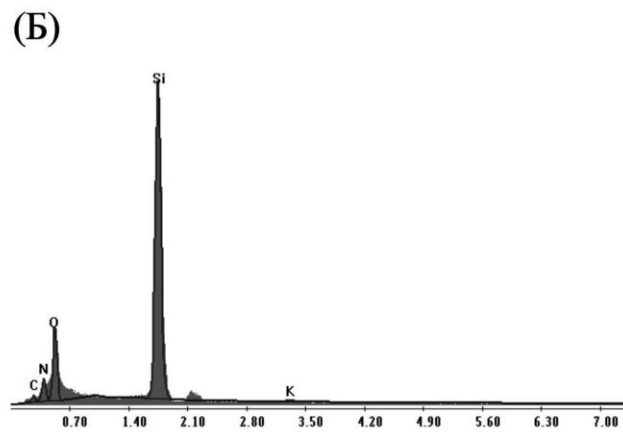
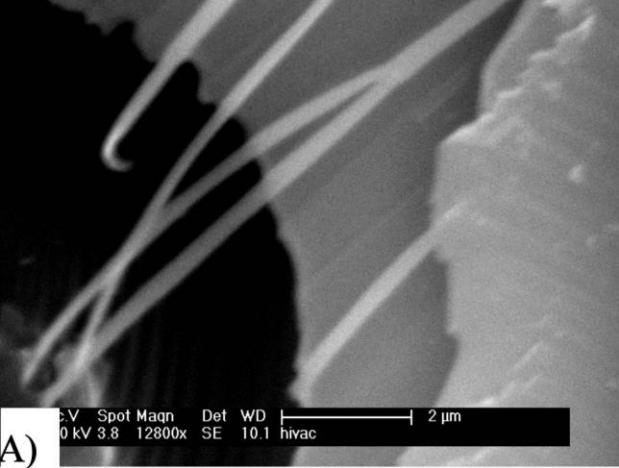


*Hyalonema sieboldi* (A) . Пучок спикул, обладающих уникальной для кремнийсодержащих биоматериалов гибкостью, что позволяет завязывать отдельные спикулы узлом (Б) . Масштаб: А – 1 см; Б – 1 мм.

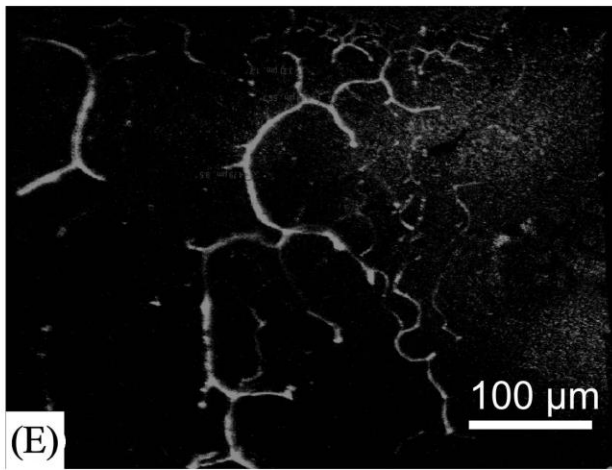
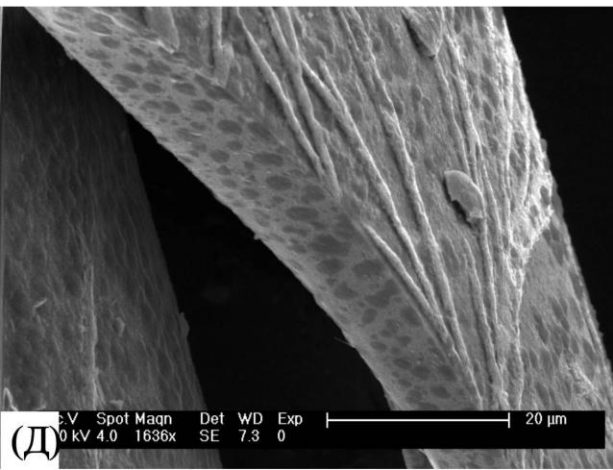
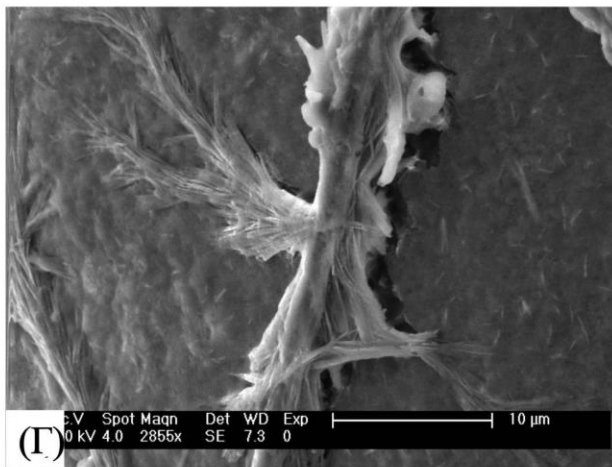
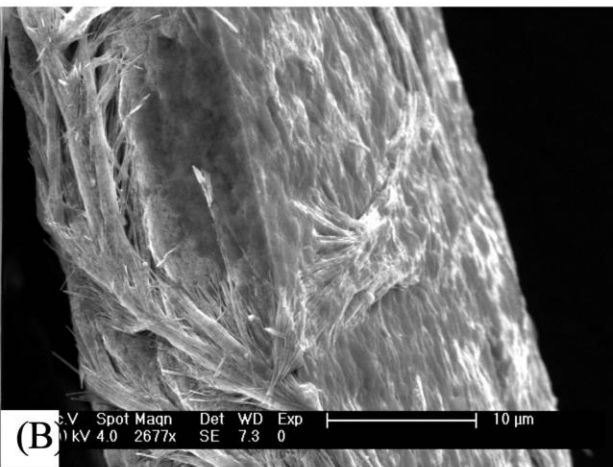
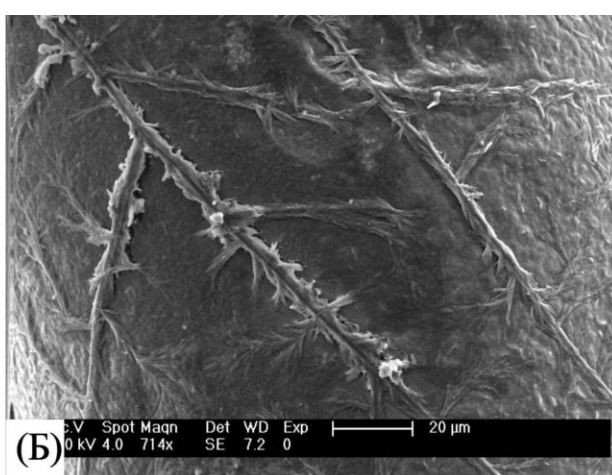
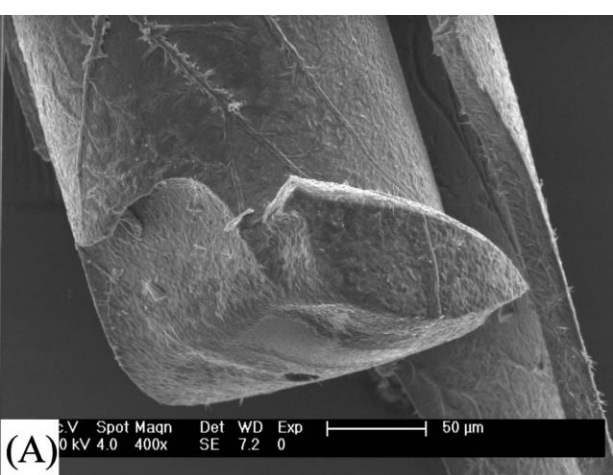
Г. Эрлих, А.Л. Дроздов и др., 2007.  
Современная стратегия деминерализации спикул стеклянных губок (Hexactinellida: Porifera) с целью извлечения и исследования протеинового матрикса

Спикулы  
стеклянной губки  
*Hyalonema sieboldi*  
организованы по  
принципу «цилиндр в  
цилиндре» (А). На  
микроструктурном  
уровне отчетливо  
видны отдельные слои  
из двуокиси кремния  
(Б, В). На изломах  
слоев наблюдаются  
фибриллярные  
образования (В, Г).  
Масштаб: А – 200  
мкм, Б – 50 мкм, В – 2  
мкм, Г – 1 мкм.

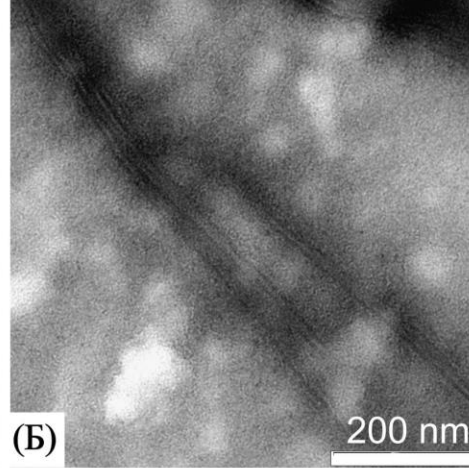
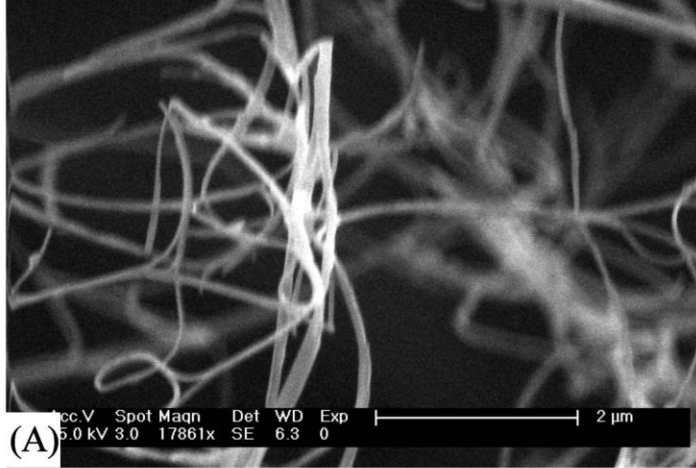




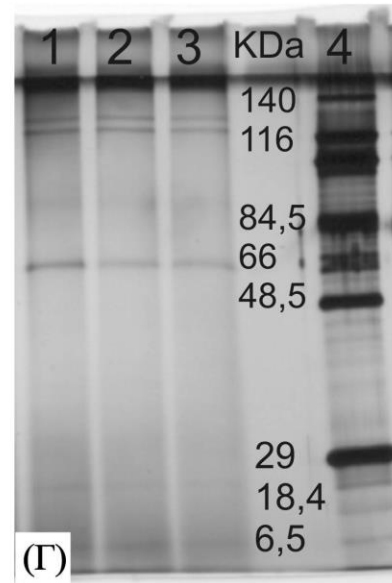
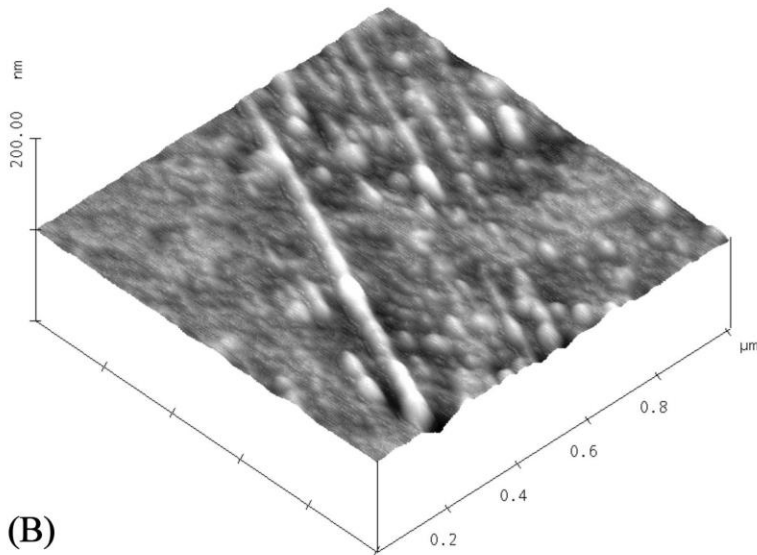
Фибриллы, хорошо видимые на сколах спикулы стекляной губки *Hyalonema sieboldi* (А), имеют органическое происхождение, что подтверждается данными элемент-органического анализа (Б). Под воздействием щелочи первоначально гладкая поверхность нативной спикулы (В) начинает подвергаться эрозии (Г, Д), что в конечном итоге приводит к высвобождению сложной фибриллярной сети, выполняющей функцию органического матрикса внутри каждого кремнийсодержащего слоя (Е). Масштаб: А – 2 мкм, В – 100 мкм, Г – 20 мкм, Д – 10 мкм, Е – 10 мкм.



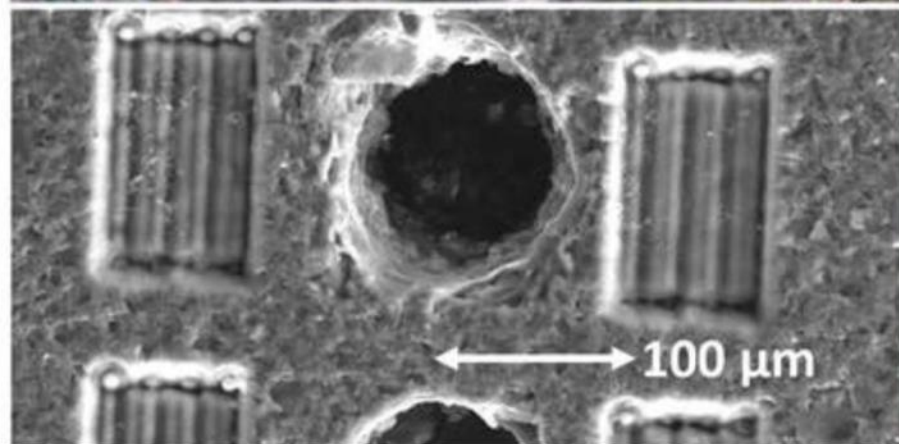
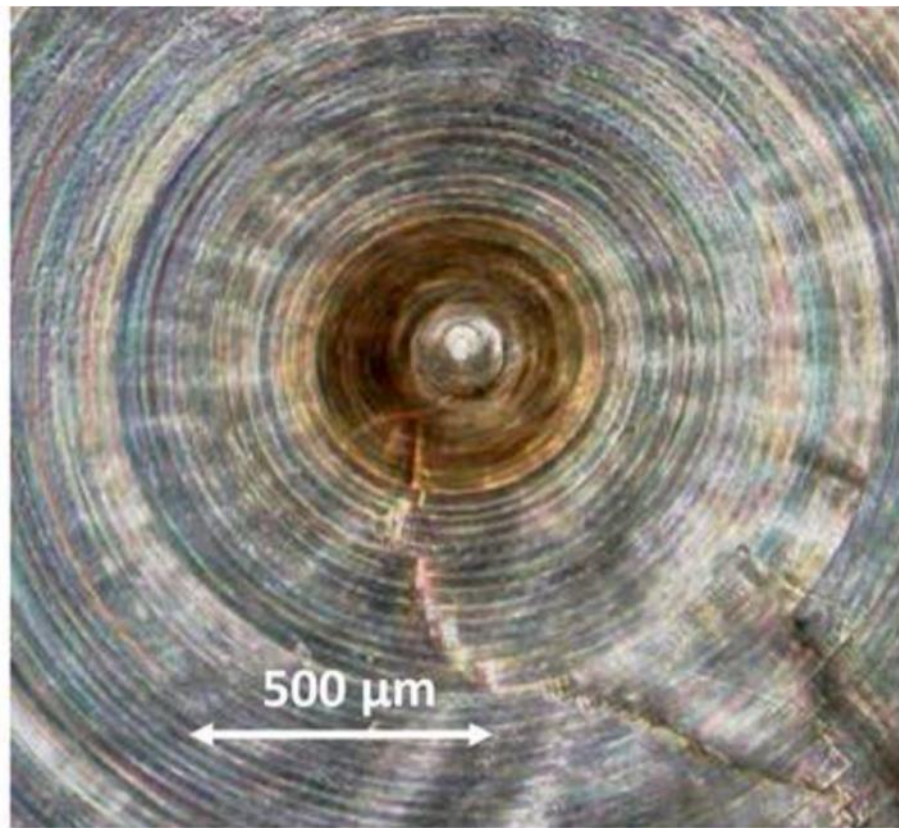
Стратегия медленного выщелачивания аморфного кремния из спикул *Hyalonema sieboldi* позволяет обнаруживать фибриллярные структуры как на поверхности слоев, окружающих аксиальный канал (А, Б), так и внутри (В) или на поверхности слоя, находящегося на крайней периферии по отношению к центральной оси спикулы (Г). Результаты СЭМ анализа (Д) однозначно подтверждаются данными исследований, полученных с помощью ЛСМ (Е). Масштаб: А – 50 мкм, Б – 20 мкм, В – 10 мкм, Г – 10 мкм, Д – 20 мкм, Е – 100 мкм.

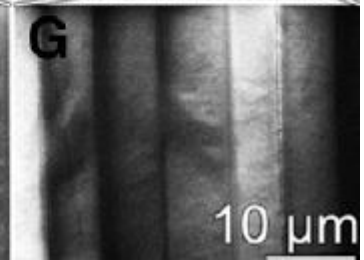
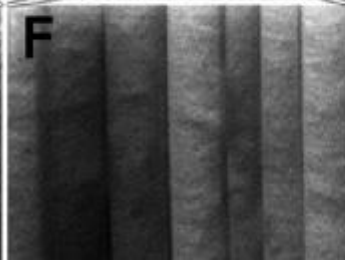
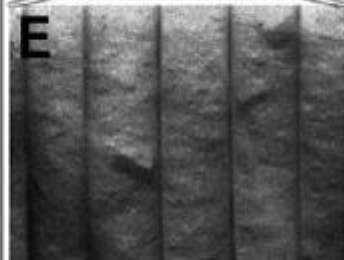
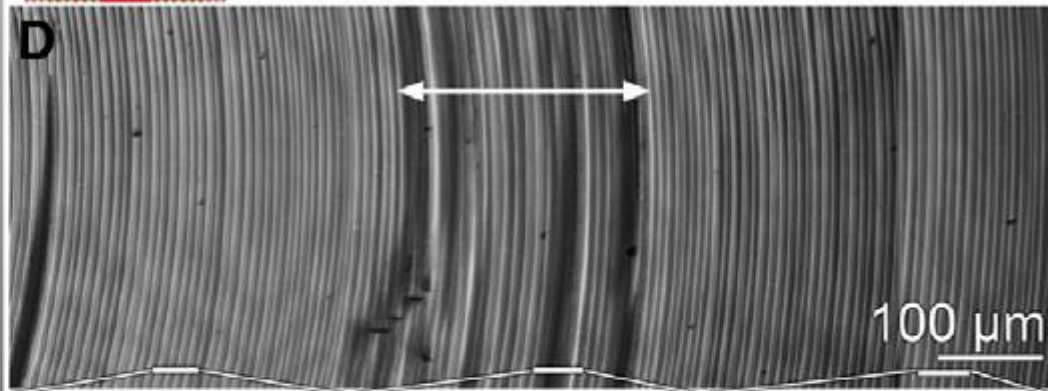
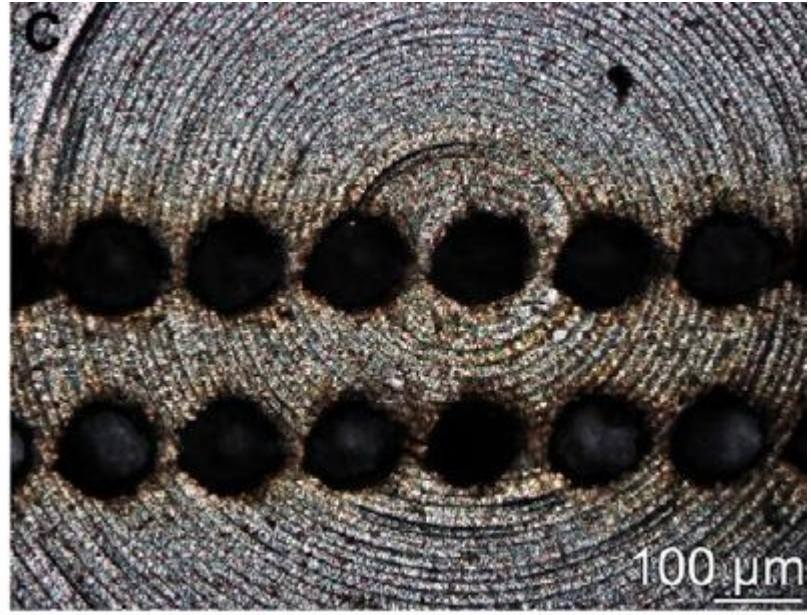


Микрофибриллы, хорошо наблюдаемые при помощи СЭМ (А), состоят в свою очередь из нанофибрилл, что достоверно подтверждают результаты ТЭМ (Б) и АСМ (В) анализов.



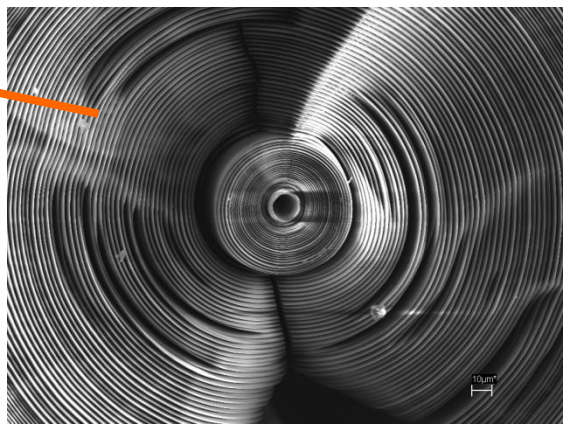
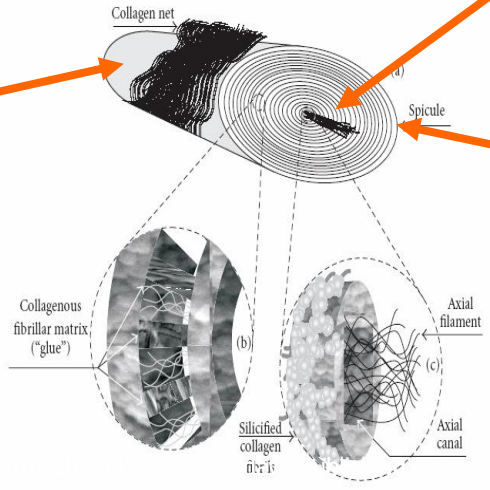
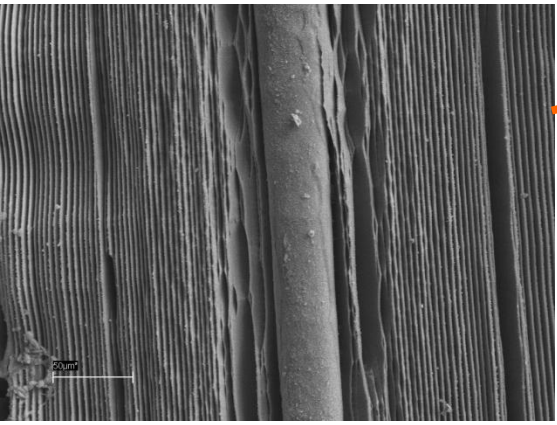
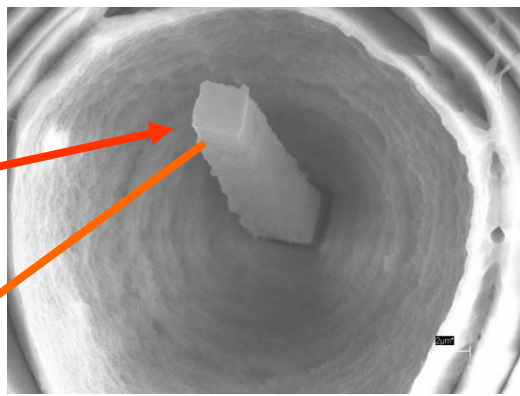
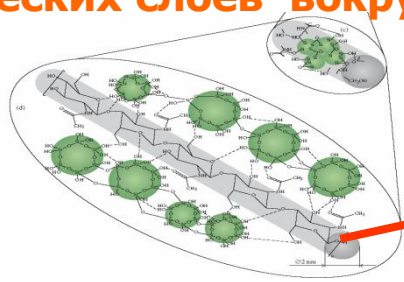
Электрофоретический анализ фракции нанофибрилл, полученной методом ВЭЖХ (Г), позволяет идентифицировать окрашенные кумасси голубым протеиновые полосы в диапазоне 116-140 кДа, типичные для субъединиц коллагена. Коллаген извлекается из спикул не только после их обработки раствором NaOH (1M), но и под воздействием слабощелочных растворов додецилсульфата натрия (г2) и рамнолипида (г3). Масштаб: А – 2 мкм, Б – 200 нм,



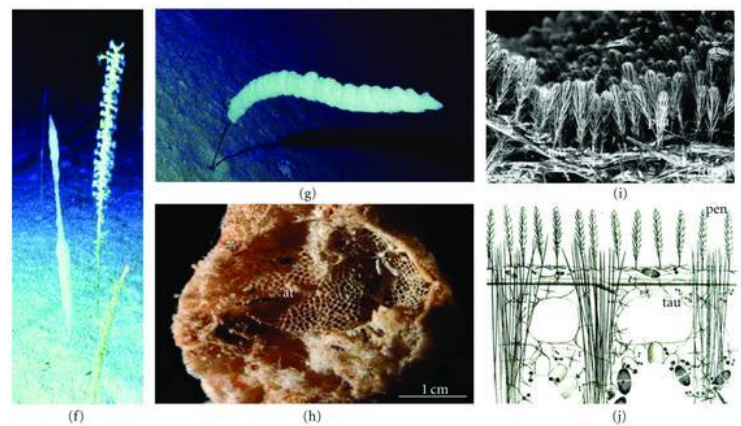
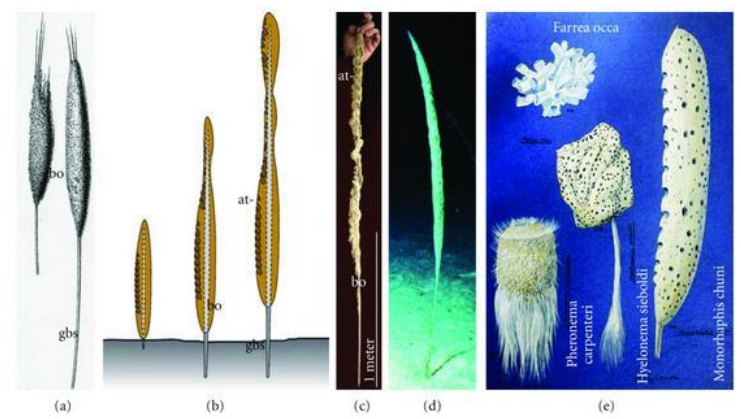
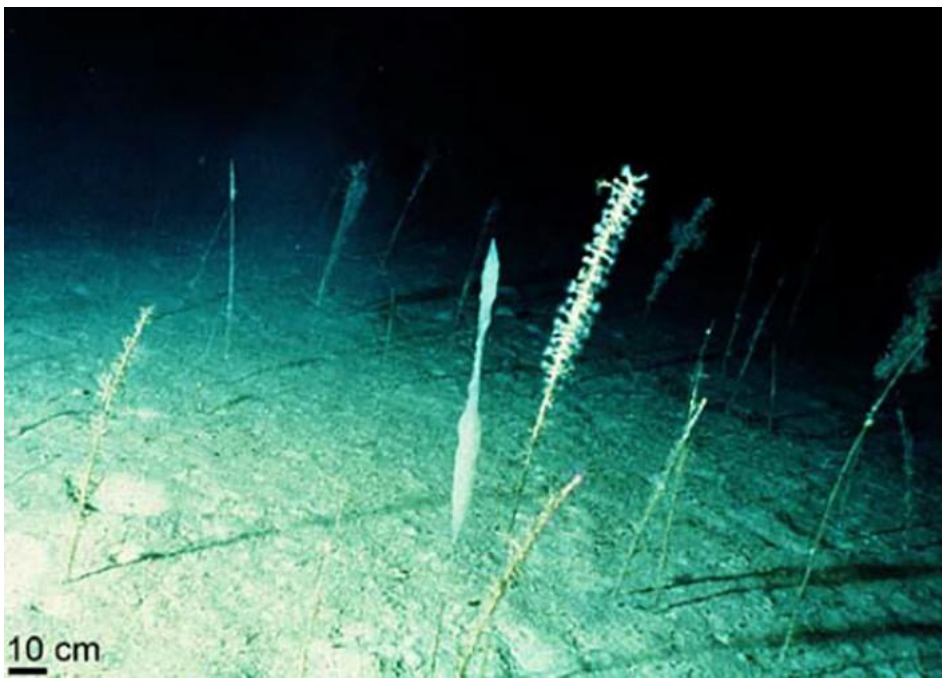


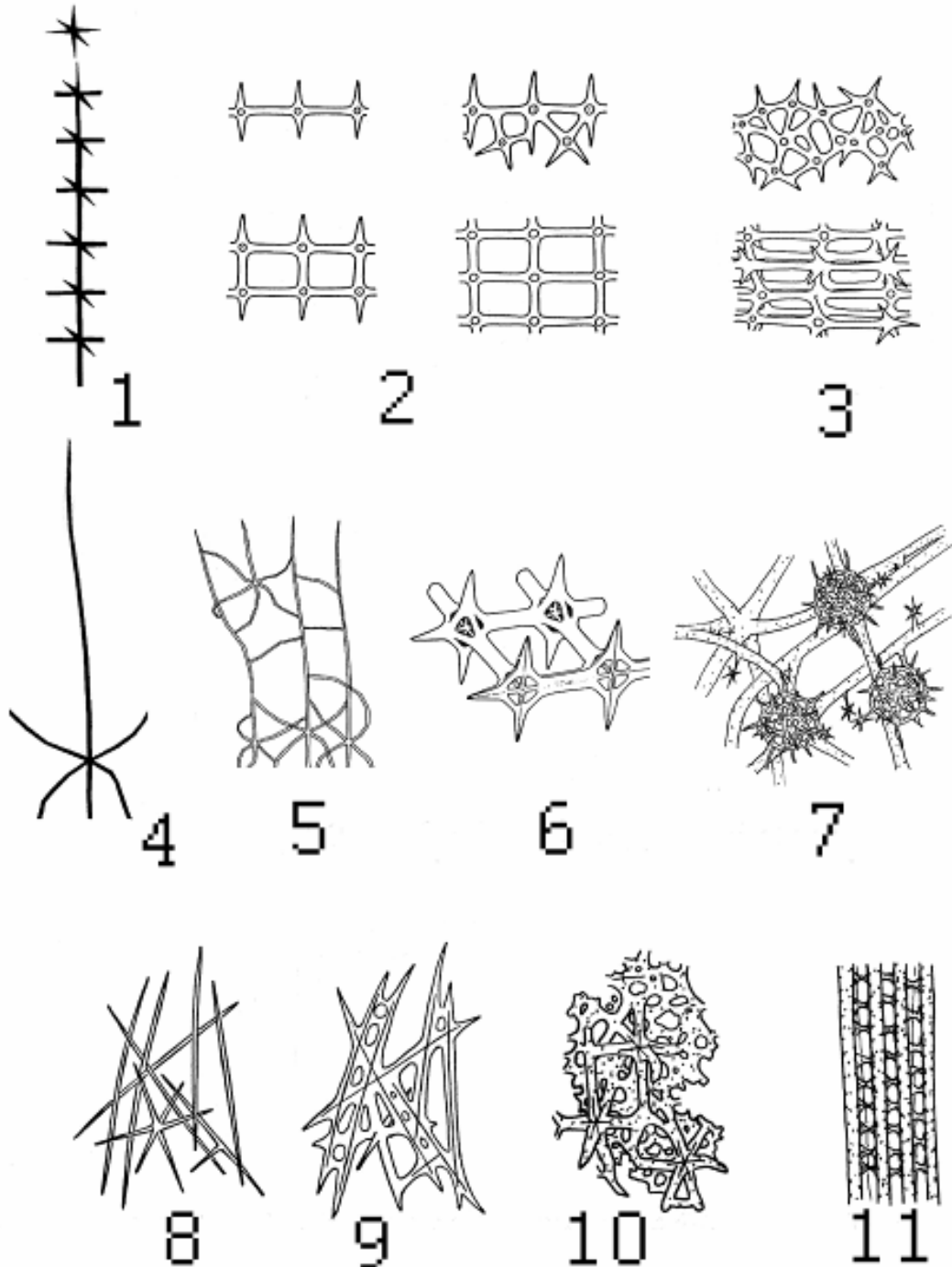


Подтверждено ранее сделанное предположения (Weaver et al. 2003), что наночастицы двуокиси кремния концентрируются в виде концентрических слоев вокруг аксиального филамента.



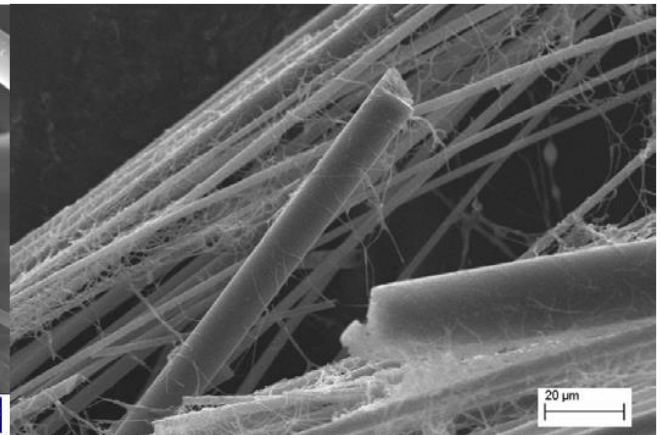
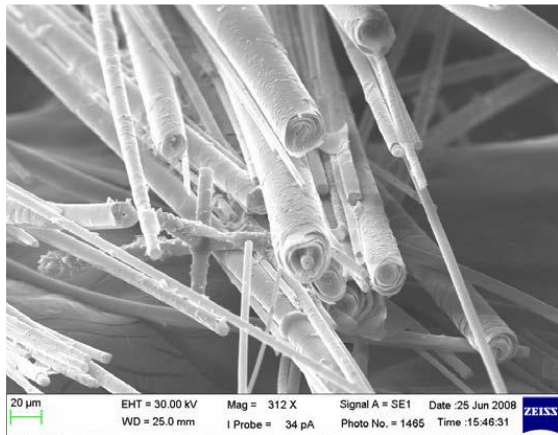
Аксиальный филамент является базовым элементом протеиновой матрицы, которая может быть составлена из колаген-подобных белков, предположительно: силикатеина, катепсина или хитина.



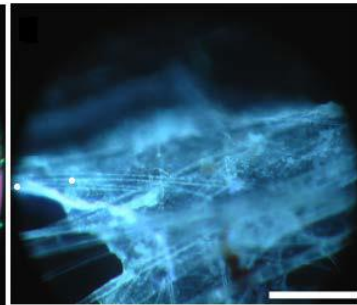
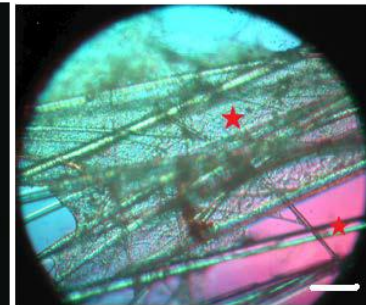
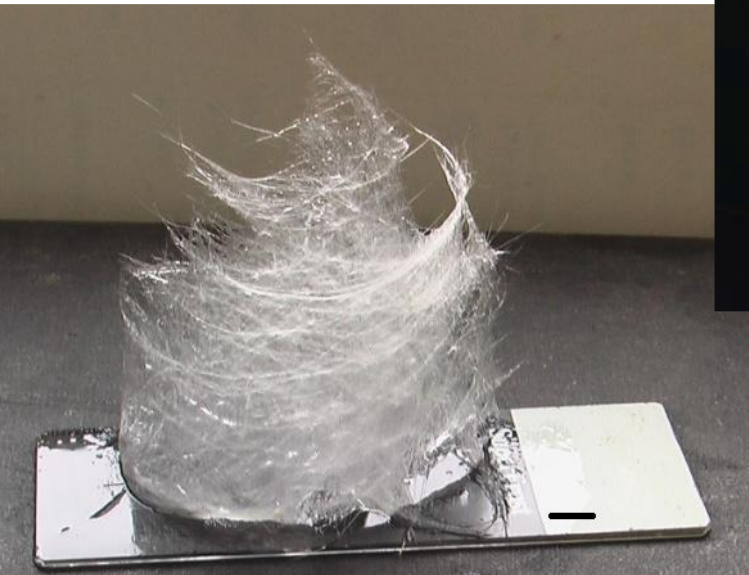


Типы скелетов гексактинеллид:

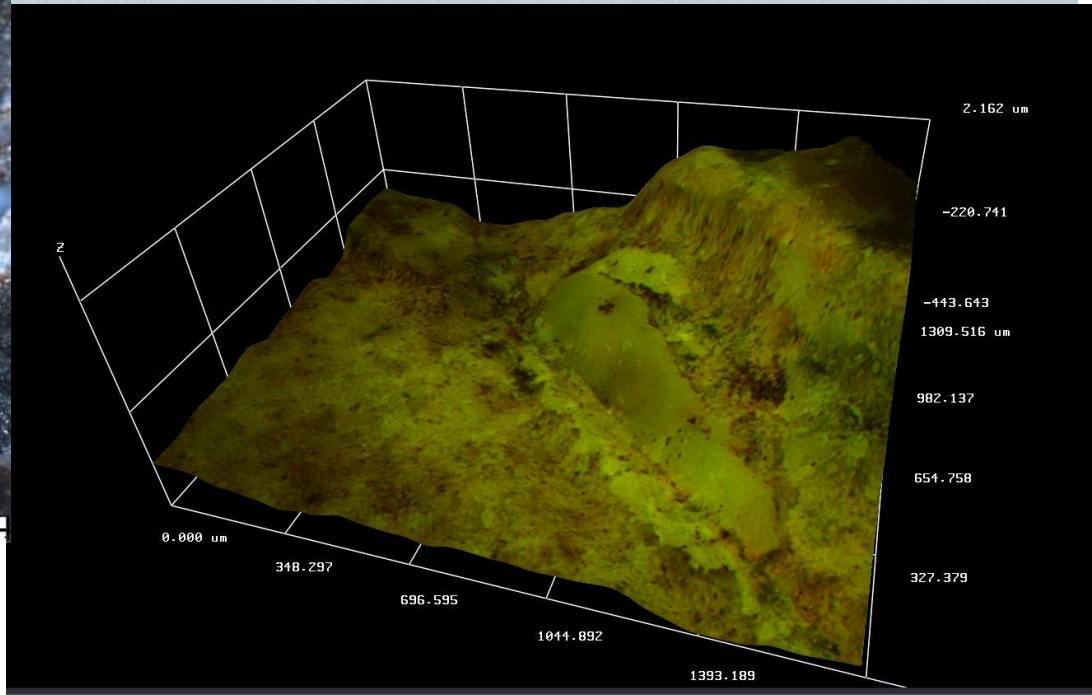
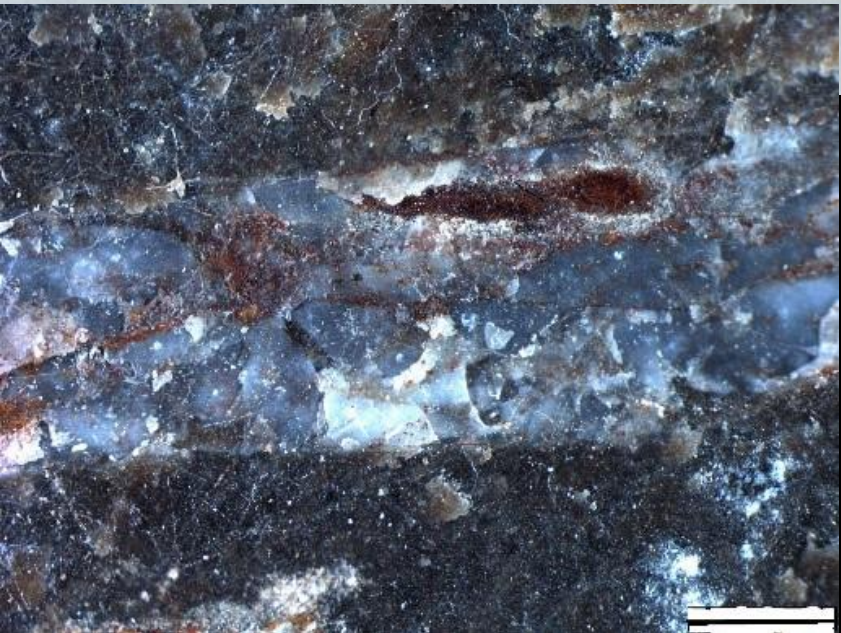
1 – диктиональный тяж, 2 – фарреоидный, 3 – эуретоидный, 4 – диктиональный тяж, 5 – аулокаликоидный, 6 – лихнинисскосан, 7 – фиелдингиоидный, 8-9 – лиссациносановый (8 – свободный скелет, 9 – слитая форма свободного скелета), 10 – скелет базидиальной пластинки, 11 – скелет основания (педонкла).



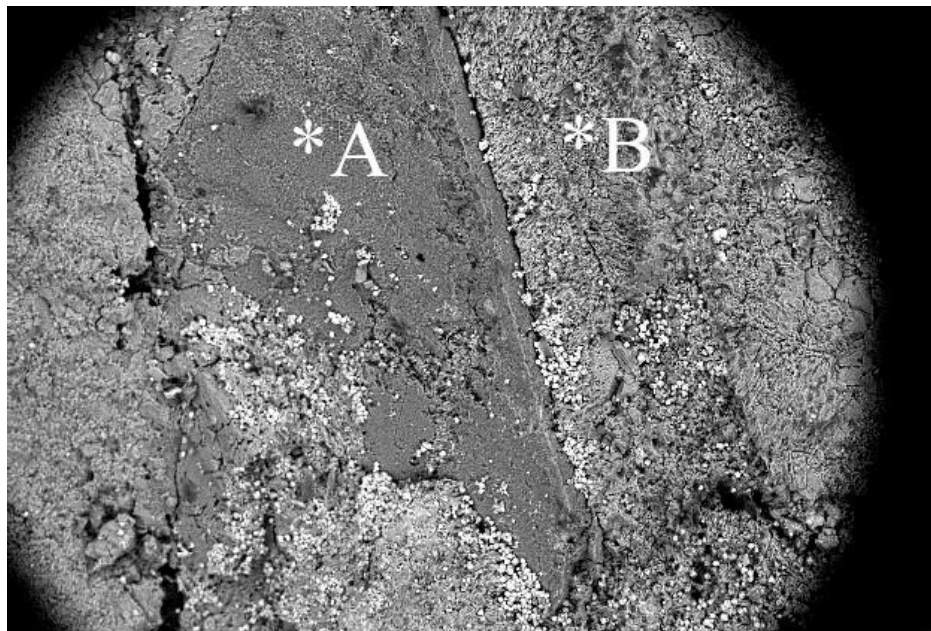
**Fragment of a dried glass sponge *Asconema setubalense***



**Skeletons of Glass Sponges as a Substrate for Creating Functional Composite Organosilicon Materials** Karpenko, Drozdov *Journal of Materials and Applications* 2019;8(1):20-27



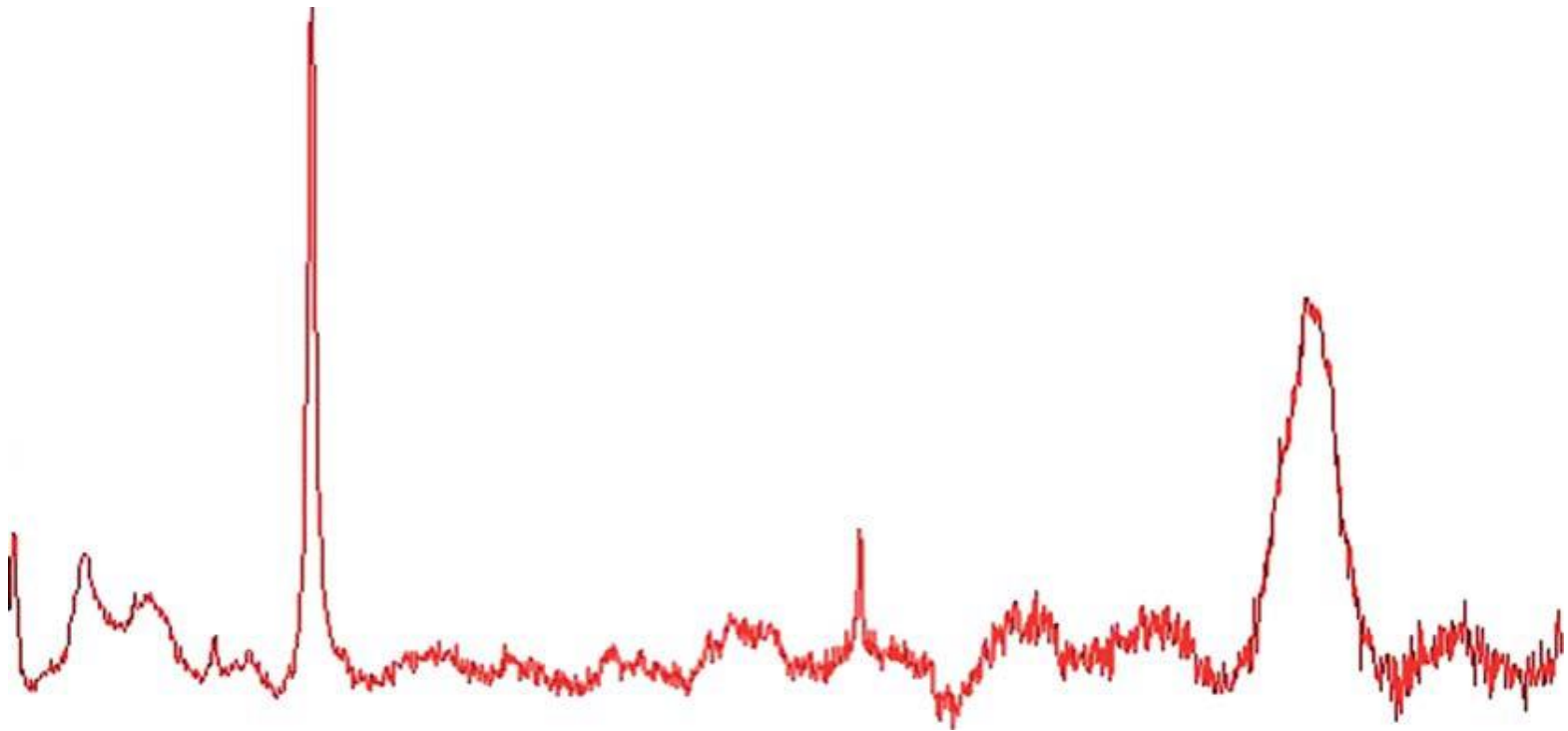




100  $\mu\text{m}$  EHT = 20.00 kV Mag = 115 X Signal A = CZ BSD Date :2 Dec 2019  
 I Probe = 707 pA WD = 10.5 mm Photo No. = 5025 Time :12:36:14 ZEISS



**Рис. 2.** Спикула губки *Lenica unica* в сканирующем микроскопе (а) и элементный состав (в % массы) аморфного кремнезема (б) и кальцита (в) согласно результатам анализа с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Звездочками отмечены точки анализа (as – аморфный кремнезем, с – кальцит). Масштаб – 100 мкм.



**Рис. 3.** Перекрывающиеся спектры комбинационного рассеяния, показывающие основные полосы аморфного кремнезема спикулы губки *Lenica unica* и органического вещества в нем. Режимы 129–400  $\text{см}^{-1}$  соответствуют железосодержащим и серосодержащим материалам; пик 466  $\text{см}^{-1}$  отвечает полосе аморфного кремнезема, пик 1087  $\text{см}^{-1}$  – карбонату кальция, пик около 1598  $\text{см}^{-1}$  – органическому веществу (графит).



В совокупности эти сведения позволяют предполагать, что в начале своей эволюции губки вполне могли обладать трехкомпонентным скелетом, который сохранился у некоторых современных реликтовых форм. Однако, судя по находкам характерных спикул в отложениях возрастом 538–520 млн лет (Журавлев, 2014), уже в первой половине раннекембрийской эпохи губки разделились на две ветви – “известковые” и “кремниевые”, среди которых к середине кембрийского периода выделились все современные классы губок.

В одном из современных научных направлений в области экстремальной биомиметики много внимания уделяется изучению композитных кремнийорганических материалов, созданных на основе биоминералов (Ehrlich et al., 2010; Karpenko, Drozdov, 2019). Однако современные стеклянные губки – это донные животные, образующие крупные поселения преимущественно на больших глубинах морей и океанов; их видовое разнообразие составляет лишь 7% от общего разнообразия губок (Systema Porifera..., 2002). Поэтому поиск древнейших кремниевых губок и их скоплений важен также для выяснения возможности использования ископаемых спикулитов и древних губковых рифов в качестве сырья с высоким содержанием кремнезема.