

## ДРЕВНЕЙШИЕ ИСКОПАЕМЫЕ ДИАТОМЕИ

Беляев А.М., Юхалин П.В.

действительные члены Палеонтологического общества при РАН

Paleovirusology group, ООО «Сидосе», С.-Петербург

Email: [paleovirusology@mail.ru](mailto:paleovirusology@mail.ru), [abel-7-777@yandex.ru](mailto:abel-7-777@yandex.ru), <http://www.paleovirusology.ru/>

Структуры, подобные современным и ископаемым диатомеям найдены в кремнистых породах среди базальтов и риолитов с возрастом 1640 миллионов лет

Ключевые слова: диатомеи, микрофоссилии, кремнистые породы, Палеопротерозой

## THE OLDEST FOSSIL DIATOMS

Anatoly. M. Belyaev, Paul V. Yukhalin

full members of the Paleontological Society of the Russian Academy of Sciences

Paleovirusology group, Sidose LLC, St. Petersburg, Russia

Email: [paleovirusology@mail.ru](mailto:paleovirusology@mail.ru), [abel-7-777@yandex.ru](mailto:abel-7-777@yandex.ru), <http://www.paleovirusology.ru/>

Structures similar to modern and fossil diatoms are found in siliceous rocks among basalts and rhyolites with an age of 1640 million years

Диатомовые водоросли – диатомеи (Diatomeae), — группа одноклеточных и колониальных водорослей, составляющая основную часть фитопланктона океанов и морей.

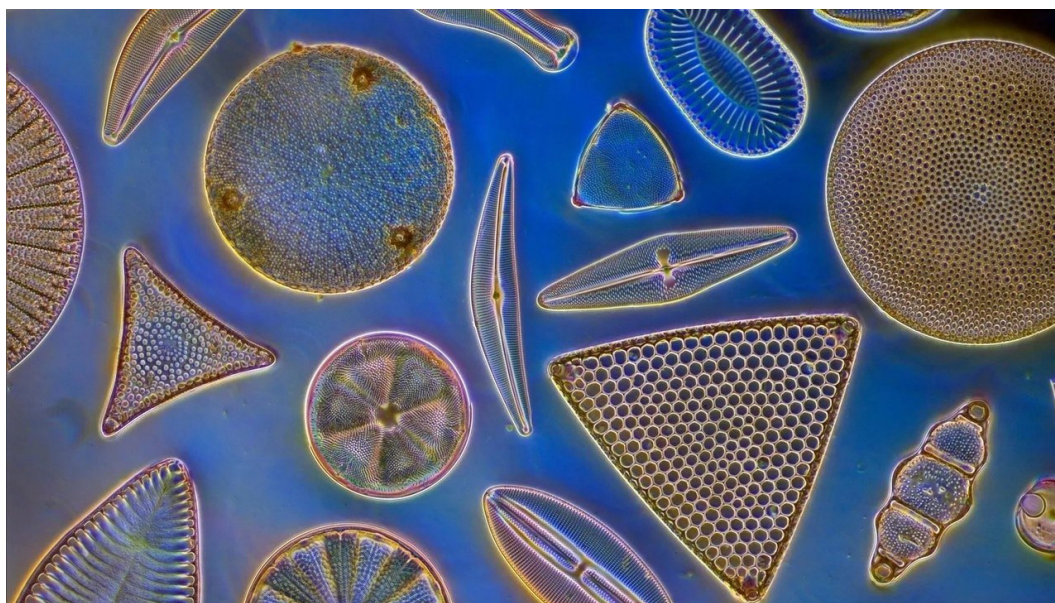


Рис. 1. Диатомеи современного морского фитопланктона (fotostrana.ru).

Описано более 25 тысяч ныне живущих видов. Для диатомей характерно наличие особого покрова — «панциря», состоящего из кремнезёма. Являясь основной частью фитопланктона, диатомеи составляют около половины всей массы органического вещества океанов и морей. На долю диатомей приходится почти четверть всей продукции живого вещества на нашей планете (Белякова и др., 2006).

### 1. Ископаемые диатомеи

Кремнистые породы, состоящие не менее чем на 50% из скелетных диатомовых водорослей называются диатомитами (Атлас..., 1973). Иногда они образуют мощные толщи, достигающие 1600 м, известные в Калифорнии, в отложениях свиты Монтерей (Laurent at., 2015). Однако, наиболее древние ископаемые останки диатомей известны в породах нижнего Мела. В те времена господствовали рода *Hemiaulus* и *Triceratium*

(Стрельникова, 1992), хотя эти эукариоты, несомненно, имели более раннее происхождение.

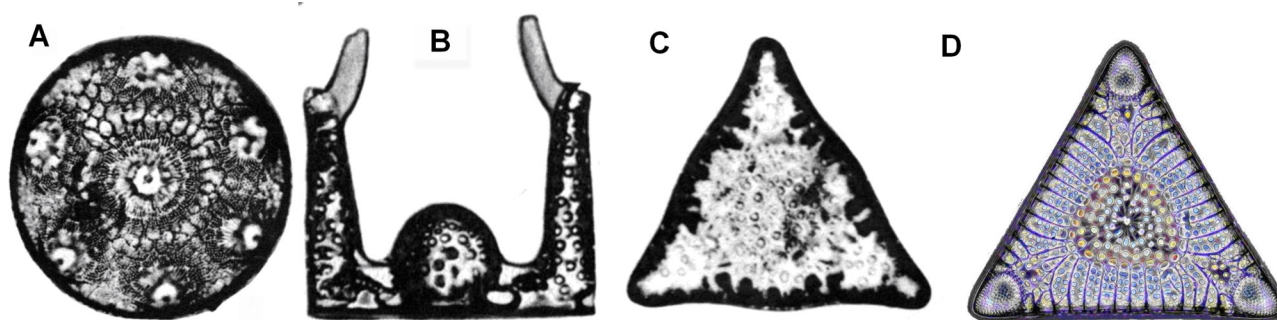


Рис. 2. Ископаемые диатомовые водоросли: А. *Corona retinervis*, Неоген (Глезер, 1992); В. *Hemiaulus tschestnovii*, Неоген (Глезер, 1992); С. *Triceratium cellulosum*, Мел (Стрельникова, 1992); D. *Triceratium morlandii* (Новая Зеландия), Палеоген (40 млн. лет., <http://club.foto.ru/gallery/photos/2337091>).

Вместе с тем, до сих пор не были известны достоверные находки диатомей в метаморфизованных породах Палеозоя и Протерозоя.

## 2. Структуры диатомей в кремнистых породах среди вулканитов с возрастом 1640 миллионов лет на острове Гогланд

Минеральные структуры, подобные по внешней морфологии микрофоссилиям современных и ископаемых мезозойских и кайнозойских диатомей, найдены в микрокварцитах из линзовидных прослоев в базальтах и риолитах Палеопротерозоя ( $1640 \pm 14$  миллионов лет) на острове Гогланд в Финском заливе (Belyaev, 2018; Беляев, 2019). Микрокварциты образовались при контактовом метаморфизме хемогенных кремнистых осадков и окремненных планктонных биопленок. Графит выделенный из микрокварцитов обогащен лёгким изотопом углерода  $^{12}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$  до  $-29.5\%$ ), что указывает на присутствие в породах субстанций биологического происхождения – остатков и останков древних планктонных микроорганизмов (Belyaev, 2018; Беляев, Юхалин, 2021).

Вещество оболочек диатомееподобных структур сложено эпидотом, который мог образоваться в результате контактового метаморфизма (перекристаллизации) кремнистых панцирей древних диатомей. Диатомееподобные структуры находятся в тесной ассоциации с минерализованными структурами, которые рассматриваются нами как микрофоссилии планктонных микроорганизмов – цианобактерий и эукариотов (Belyaev, 2018; Беляев, 2019; Беляев, Юхалин, 2021). По внешней морфологии диатомееподобные структуры в микрокварцитах могут быть сопоставлены с некоторыми видами мезозойских и кайнозойских микрофоссилий диатомей. Поэтому для описания протерозойских микрофоссилий предварительно использованы названия сходных родов ископаемых диатомей: *Hemiaulus*, *Triceratium*, *Corona* и *Pleurosigma*.

## 3. Структуры, подобные неогеновым диатомеям *Corona retinervis*, в полосчатых кремнистых сланцах среди базальтов

В шлифах микрокварцитов наблюдаются минеральные образования в форме дисков, диаметром около 100 микрометров с несколькими отверстиями по периферии. Внешние контуры сложены агрегатом тонкозернистого гематита и эпидота, центральные части эпидотом (Рис. 3, фото А, В). На фото С показана диатомея *Corona retinervis*, Неоген (Глезер, 1992), очень похожая на структуры на фото А и В. Это позволило рассматривать диатомеи из микрокварцитов, как принадлежащие роду *Corona*, и дать им предварительное название *Corona admiralsvyatov*.



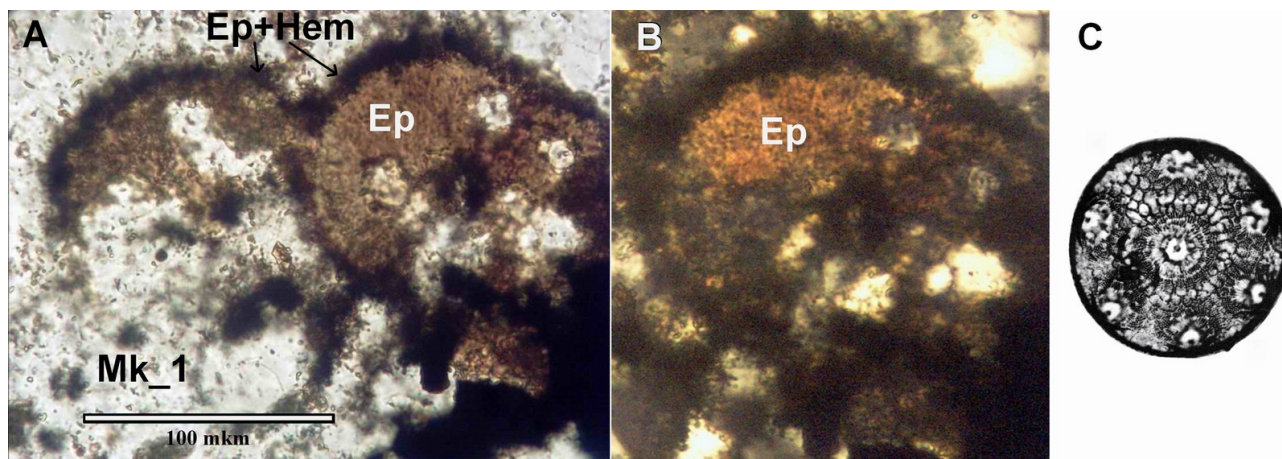


Рис 3. А. Структуры *Corona admiralsvyatov* из микрокварцитов в базальтах. Шлиф, в проходящем свете, без анализатора. Ер+Нем – гематит и эпидот, Ер – эпидот, Мк – микрокварцит по слизистому веществу биопденков; В. Фрагмент фото А, с анализатором; С. Диатомея *Corona retinervis*, Неоген (Глезер, 1992).

#### 4. Структуры в кремнистых породах из базальтов, подобные по морфологии меловым диатомеям рода *Hemiaulus*

В шлифах микрокварцитов из базальтов и риолитов встречаются минеральные образования с контурами в форме чашек с загнутыми внутрь краями, и сложенные агрегатами зерен эпидота с характерной интерференционной окраской при скрещенных николях Рис. 4, Фото А,В). По внешней морфологии они похожи на структуры ископаемых меловых диатомей - *Hemiaulus tschestnovii* (Рис. 4. А, слева внизу), и, поэтому, предварительно названы *Hemiaulus belgennadius*. От доньшка некоторых чашечек отходят хорошо выраженные выросты с серповидными фрагментами на концах (Рис. 4, Фото А,В; Рис. 5, Фото А,В,С,Е). Возможно, эти выросты служили для скрепления клеток в цепочки. При этом, структура D-2 в полтора раза меньше D-1 (Фото А,В), и, быть может, являлась дочерней клеткой, так как у диатомей дочерние клетки всегда меньше материнских. Зерна эпидота, слагающие более мелкую структуру D-2 (фото 4. В, слева вверху), находятся на погасании, тогда как зерна эпидота в более крупной структуре D-1 и ее сателлитах, находятся на просветлении и, следовательно, имеют одинаковую ориентацию кристаллов в пространстве.

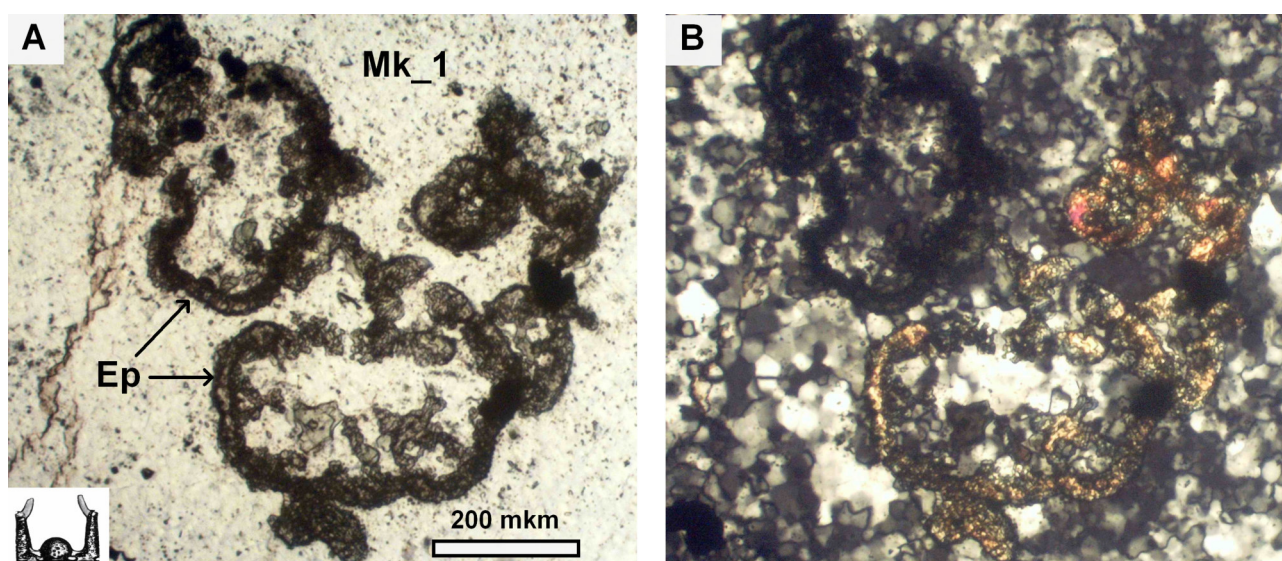
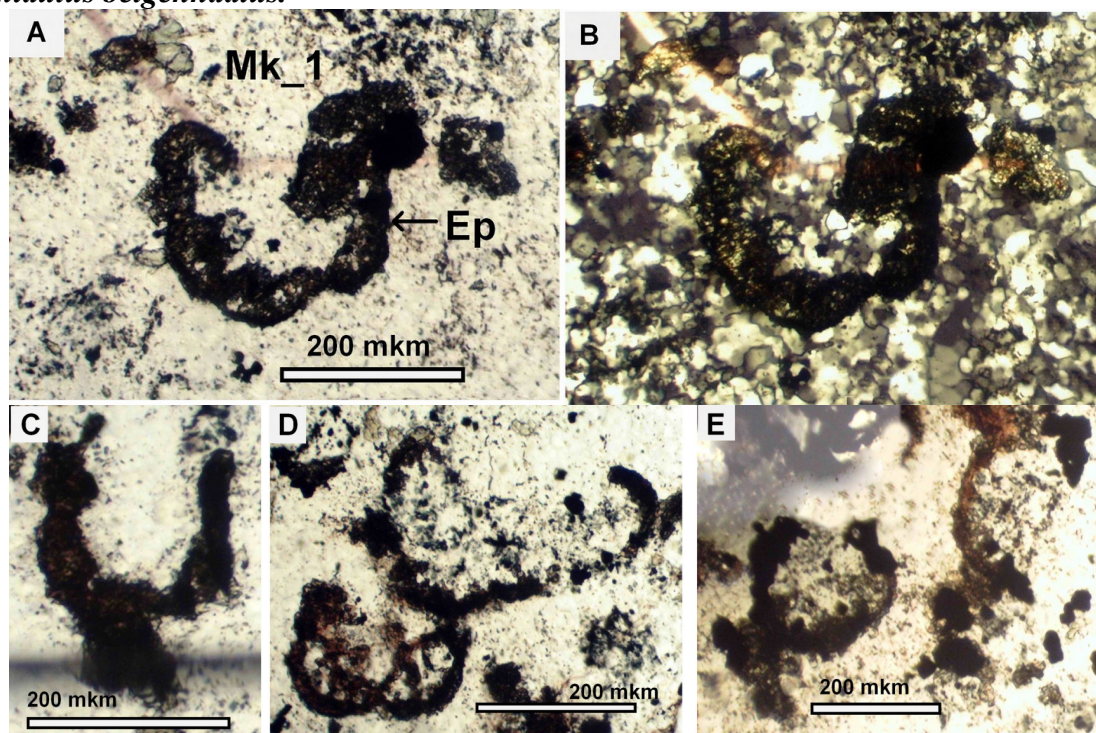


Рис. 4. Структуры микрофоссилий диатомей *Hemiaulus belgennadius* в микрокварцитах из базальтов. Контуры «раковин» сложены агрегатом зерен эпидота (Ер), снаружи и внутри раковин микрокварциты (Мк-1, Мк-0). На фото А, слева внизу



для сравнения – рисунок неогеновой диатомеи *Hemiaulus tschestnovii* (Глезер, 1992). На фото В, тоже, что на фото А, с анализатором.

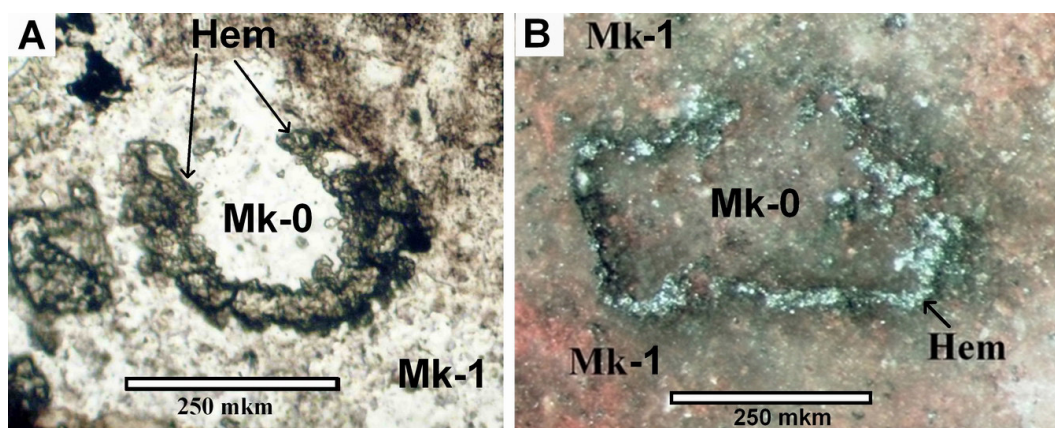
Минеральные структуры в форме чашек с загнутыми внутрь краями (Рис. 5. фото А,В,С,Д,Е) встречаются в микрокварцитах из базальтов поодиночке и группами. Они также сложены цепочками зерен эпидота, снаружи и внутри раковин микрокварцит (Mk-1, Mk-0). По внешнему виду они также подобны диатомеям *Hemiaulus*, и, возможно, несмотря на некоторые отличия, относятся к роду и виду *Hemiaulus belgennadius*.



**Рис. 5.** Минеральные структуры в форме чашек с загнутыми внутрь краями, сложенные агрегатом зерен эпидота (Ep), снаружи и внутри раковин микрокварцит (Mk-1, Mk-0). Фото А,С,Д,Е в проходящем свете без анализатора, фото В, тоже, что на фото А, с анализатором.

#### **5. Структуры в кремнистых породах из риолитов, подобные по морфологии меловым диатомеям рода *Hemiaulus***

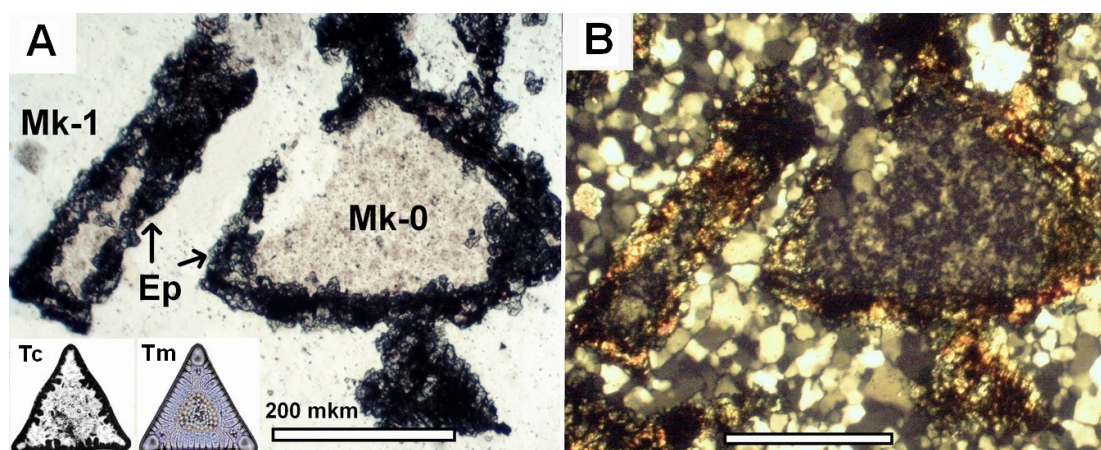
В микрокварцитах из линзовидных прослоек в риолитах степень контактового метаморфизма кремнистых осадков и окремненных биопленок достигала уровня эпидот-амфиболитовой фации, в результате чего вещество оболочек (кремнистые панцири) диатомей были замещены эпидотом (Рис. 6. А) В микрокварцитах из цемента брекчий в риолитах степень контактового метаморфизма кремнистых осадков и окремненных биопленок достигала уровня лишь зеленосланцевой фации, поэтому гидроокислы железа, отсорбированные на поверхности диатомей, были превращены в цепочки зерен гематита (Рис. 6. В).



**Рис. 6.** Структуры из кремнистых пород в риолитах, подобные по морфологии диатомеям *Hemiaulus*. А. Подковообразная структура из линзовидных микрокварцитов в риолитах, с контурами сложенными агрегатом зерен эпидота, снаружи и внутри раковин микрокварцита (Mk-1, Mk-0). Шлиф, в проходящем свете, без анализатора. В. Чашеподобная структура в микрокварцитах из цемента брекчий в риолитах, с контурами, сложенными агрегатом зерен гематита, внутри структуры (Mk0) и снаружи (Mk1) микрокварцит. Пришлифованный образец.

#### 6. Структуры в кремнистых породах риолитов, подобные диатомеям рода *Triceratium*

В микрокварцитах из риолитов в тесной ассоциации с фоссилийподобными структурами цианобактерий и амёб встречаются образования в форме треугольников размером 200-400 мкм. Их контуры сложены агрегатом зерен эпидота – Ер (Рис. 8, 26). По внешней морфологии они напоминают структуры ископаемых меловых диатомей родов *Triceratium* (Рис. 7, Фото А,В), поэтому получили предварительное название *Triceratium asvoynovi*.

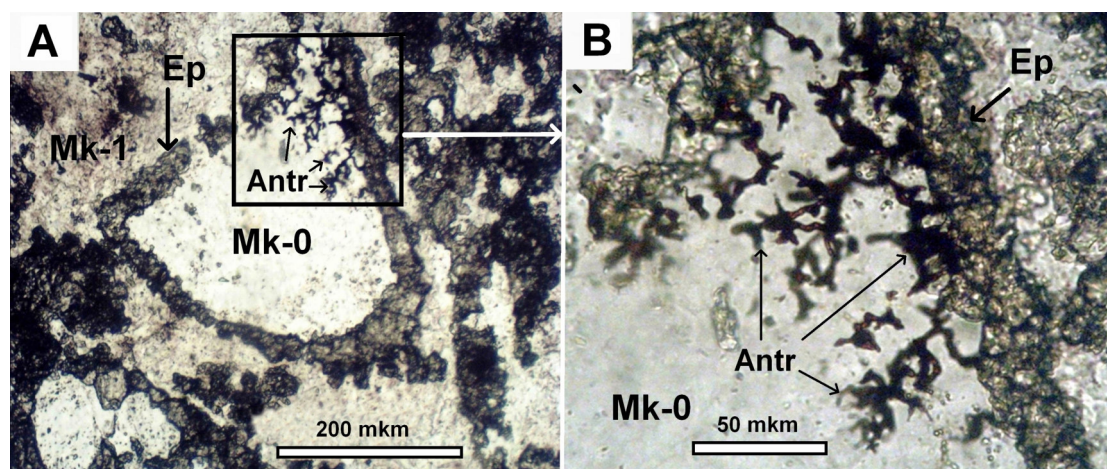


**Рис. 7.** Структура *Triceratium asvoynovi* из кремнистых пород в риолитах. Контуры сложены агрегатом зерен эпидота (Ер), снаружи и внутри раковин микрокварцита (Mk-1, Mk-0). На Фото А, слева от треугольного, возможно, поперечное сечение крышечки диатомеи. На Фото А слева внизу для сравнения показаны: меловая диатомея *Triceratium cellulosum* – Тс (Стрельникова, 1992), и палеогеновой диатомеи *Triceratium morlandii* – Тм (Новая Зеландия). Фото А и В проходящем свете: А – без анализатора; В – тоже, что А, с анализатором.

В некоторых сечениях *Triceratium asvoynovi* на внутренней границе раковины наблюдаются ветвистые выделения твердого асфальтита – изотропного антракосолита (Antr), выходящие из оболочки раковины диатомеи и локализованные между кристаллами кварца (Фото 7, 8). Они могли образоваться в результате

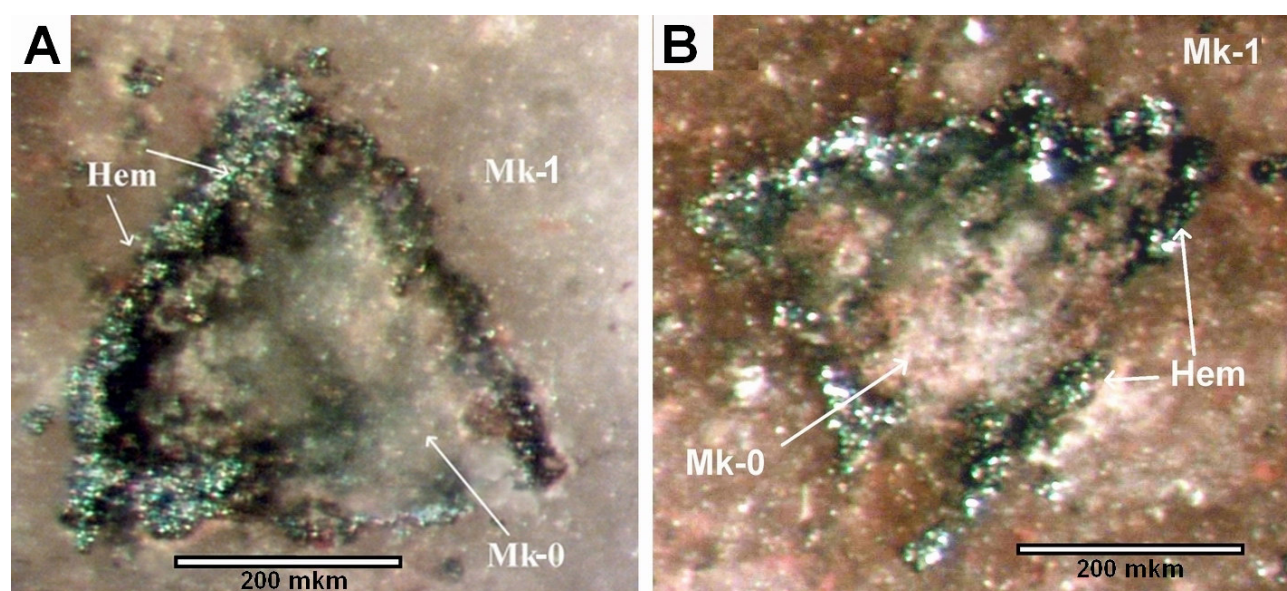


метаморфического преобразования органического вещества в составе раковины. У современных диатомей кремнистые оболочки клеток не гомогенны, снаружи и внутри панцирей располагается тонкий слой органического вещества.



**Рис. 8.** Структура с предварительным названием *Triceratium asvoinovi* из микрокварцитов в риолитах (на Фото А и В, в проходящем свете, без анализатора). Контуры «раковины» сложены агрегатом зерен эпидота (Ep), снаружи и внутри раковин микрокварциты (Mk-1, Mk-0). На Фото В – фрагмент фото А, ветвистые выделения изотропного антраксолита из оболочки раковины.

В микрокварцитах из цемента брекчий в риолитах также встречаются образования в форме треугольников размером 200-400 мкм, которые по внешней морфологии сопоставимы со структурой ископаемых меловых диатомей - *Triceratium* (Рис. 9). Их контуры сложены цепочками зерен гематита, который, вероятно, образовался в результате ракристаллизации гидроокислов железа, адсорбированных на поверхности диатомей (Рис. 9). Внутри и снару контуров микрофоссилий микрокварциты.



**Рис. 9.** На Фото А и В структуры в кремнистых породах из цемента брекчий в риолитах подобные по морфологии диатомеям рода *Triceratium*. Контуры «раковин» сложены цепочками зерен гематита. Снаружи и внутри раковин микрокварцит (Mk-1, Mk-0). Пришлифованный образец. Масштабная линейка 200 мкм.

## Дискуссия

В отложениях Мезозоя было выявлено уже около 200 родов и более 2000 видов диатомей с достаточно сложной структурой панцирей. Это позволяет предположить, что эта группа водорослей возникла в более раннюю геологическую эпоху и к тому времени прошла длительный эволюционный путь развития (Стрельникова, 1992). Однако, несмотря на то, что кремнеземные панцири или створки диатомей способны сохраняться в ископаемом состоянии длительное время, их останки пока не были обнаружены в породах Палеозоя и Протерозоя. Отсутствие достоверных находок ископаемых диатомей в более ранние геологические периоды может быть вызвано несколькими причинами:

Так, Н. М. Страхов (1966) допускал возможность существования и широкого развития диатомовых в древних бассейнах, и объяснял отсутствие их остатков в древних кремнистых породах раскристаллизацией слагавшего их опала, а также быстротой растворения створок.

Возможно древние диатомеи, как и многие современные пелагические планктонные виды, имели тонкие или рыхлые кремнеземные панцири, которые растворялись в недосыщенной кремнеземом морской воде после отмирания клеток. А в процессе эволюции, начиная с Мела, их кремнистые панцири стали более устойчивыми к растворению и могли быть обнаружены в осадочных породах.

Панцири древних диатомей могли формироваться не только путем поглощения из воды растворенного кремнезема или сгустков  $\text{SiO}_2$ , но и в результате агглютинации мельчайших глинистых, или иных минеральных частиц, прилипших к слизистому веществу внешних оболочек. При отмирании клеток, такие агглютинированные панцири не были устойчивы к фоссилизации и захоронению и распадались на составляющие их минеральные частицы.

Можно также предположить, что обнаруженные останки древних диатомей не были определены как представители живого мира, или были отнесены к группе одноклеточных организмов неясного происхождения – акритархам. В микропалеонтологии описаны сотни видов окаменевших микроскопических останков (микрофоссилий) акритархов, среди которых есть структуры, похожие на микрофоссилии диатомей, в частности акритархи палиноморфы из отложений Кембрия, по форме похожи на диатомеи рода *Triceratium*. <https://paleonerdish.wordpress.com/2013/04/08/the-enigmatic-acritarchs-2/amp/>

Возможно, что хемотропные кремнистые осадки среди вулканических пород еще недостаточно тщательно изучены на предмет обнаружения микрофоссилий кремнеземных и железистых планктонных микроорганизмов.

## Выводы.

В целом, вполне вероятно, что минеральные образования, сложенные эпидотом, в форме дисков с несколькими отверстиями по периферии, являются микрофоссилиями диатомей и древнейшими предками рода *Corona*; структуры в форме чашек могут быть окаменевшими останками организмов диатомей рода *Hemiaulus*, а близкие к треугольным формам родоначальные для рода *Triceratium*. Однако структуры диатомей в кремнистых породах Палеопротерозоя в несколько раз превосходят по размерам мезозойские и кайнозойские, что, на наш взгляд, связано с благоприятными эколого-геологическими условиями в водах внутриконтинентального моря, насыщенных биофильными элементами (Беляев, 2018, Belyaev, 2018)

Древние диатомеи, как и эукариоты в составе планктонных экосистем, могли долгое время оставаться изолированными во внутриконтинентальном море в пределах грабена Балтийско-Ладожского геоблока. Интрузивный магматизм и вулканизм формации Рапакиви по периферии этого блока продолжался 150 миллионов лет (Ларин, 2011). Возможно, что палеопротерозойская экосистема планктона смогла успешно

пережить два периода Неопротерозоя (Криогений и Эдикарий), в которые происходили гипотетические глобальные оледенения, и Земля была полностью покрыта льдом.

1. Атлас текстур и структур осадочных горных пород. Часть 3, Кремнистые породы. Дмитриева Е. В., Либрович В. Л., Некрасова О.И., Петровский А. Д., под ред. А.И. Жамойды и А.В. Хабакова. Издательство «Недра», Москва, 1973, 340 с.
2. Беляев А.М. Эколого-геологические условия эволюции и фоссилизации планктонных микроорганизмов в Палеопротерозое //Материалы Восемнадцатой международной молодежной научной конференции «Экологические проблемы недропользования. Наука и образование», 2018, с. 34-40.
3. Беляев А.М. Перспективы изучения микрофоссилий в вулканогенно-осадочных кремнистых породах Палеопротерозоя //Материалы LXIV сессии Палеонтологического общества, Изд. ПИН РАН, Москва, 2019, т.2. с. 28-43.
4. Беляев А.М., Юхалин П.В. Фосфатные останки нуклеотидов и размеры геномов микрофоссилий эукариотов из микрокварцитов Палеопротерозоя (остров Гогланд, Финский залив), 2021, PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112213>.
5. Белякова Г. А., Дьяков Ю. Т., Тарасов К. Л. Водоросли и грибы // Ботаника, Т.2. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 320 с. ISBN 5-7695-2750-1.
6. Глезер З.И., Макарова И.В, Моисеева А.И., Николаев В.А. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Спб.: Наука, 1992. 125 с.
7. Ларин А.М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы, М., Наука, 2011, 403 с.
8. Страхов Н. М. О некоторых вопросах геохимии кремнезема. В кн. «Геохимия! кремнезема», М.; изд-во «Наука», 1966.
9. Стрельникова Н.И. Палеогеновые диатомовые водоросли Спб: Изд-во С.-Петербургского университета, 1992, 311с.
10. Belyaev A.M. Paleoproterozoic Underwater Volcanism and Microfossil-Like Structures in the Metasedimentary Siliceous Rocks, Hogland Island, Russia //Journal of Earth Science, 2018; Vol. 29, No. 6, p. 1431–1442, <https://doi.org/10.1007/s12583-018-0883-4>.
11. Laurent D., De Kaenel E., Spangenberg J.E., Föllmi K.B. A sedimentological model of organic-matter preservation and phosphogenesis in the Miocene Monterey Formation at Haskells Beach, Goleta (central California) //Sedimentary Geology 326, DOI:10.1016/j.sedgeo.2015.06.008.