

Ранняя Земля: лавовые потоки и возможность жизни

Астафьева М.М.

Палеонтологический институт РАН
astafieva@paleo.ru

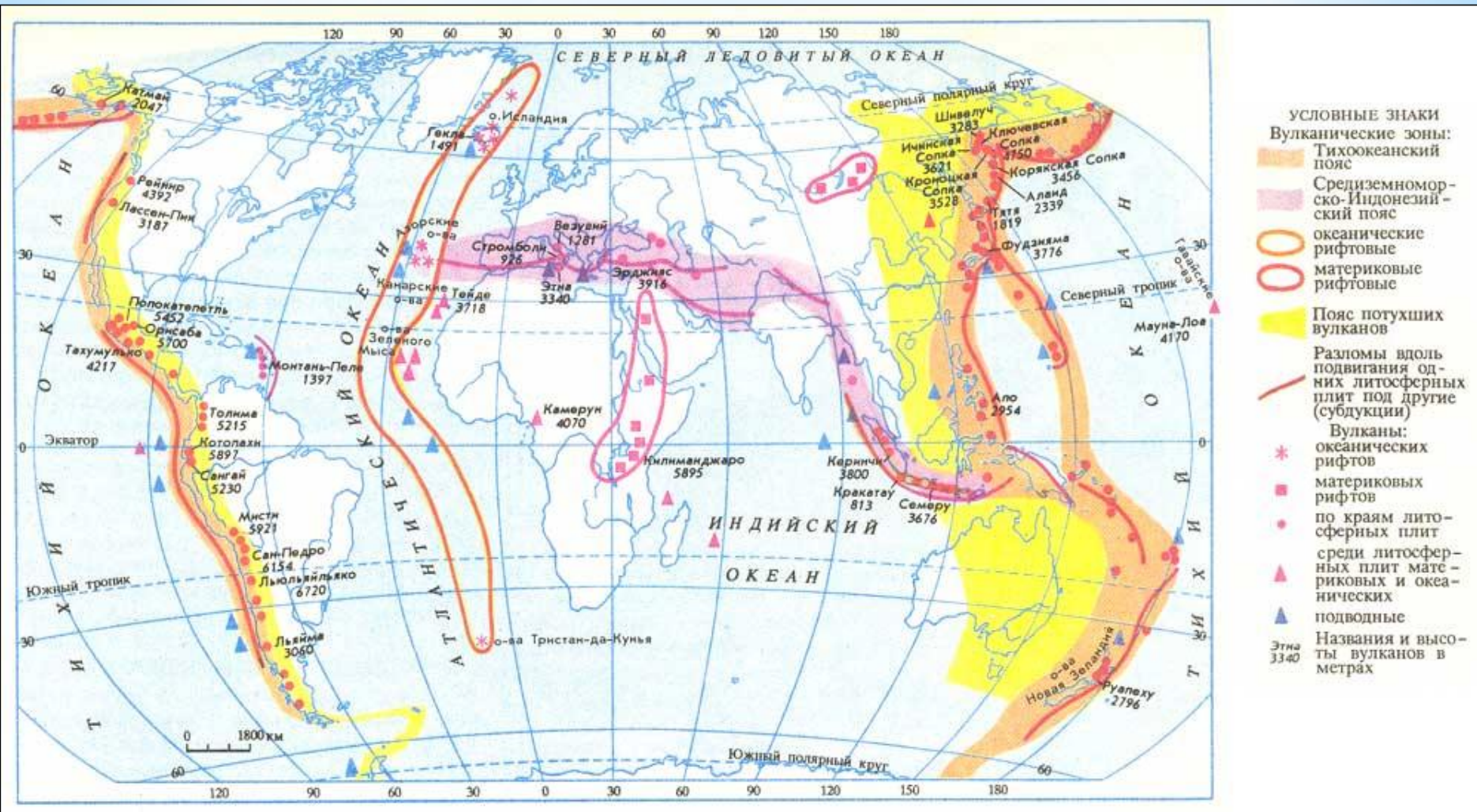
Вулканические, или вулканогенные, породы довольно широко распространены на поверхности современной Земли (как на суше, так и в океанах).



Вулканические горные породы это один из классов магматических пород, являющиеся продуктами кристаллизации магмы (лавы), вышедшей на земную поверхность по вулканическим каналам и застывшей в течение короткого промежутка времени

(Петрографический кодекс, 2008, Краснощекова, 2012).

Пространственное распространение вулканических пород целиком определяется расположением вулканов (Арабаджи, 1988).





Освоение и преобразование вулканических пород микроорганизмами интересует и микробиологов и геологов. Сейчас широко обсуждается развитие жизни в вулканогенных породах далекого прошлого и современности (Rasmussen, 2000; Fisk et al., 2003, 2006; Furnes et al., 2004, 2007; McLoughlin, 2007; Astafieva et al., 2008, 2009 а,б; Rozanov, Astafieva, 2009).

Вулканические породы способны поддерживать разнообразные микробные сообщества, которые обитают вдоль поверхностей, трещин и разломов. Микроорганизмы живут во влажных трещинах вулканогенных пород и оставляют свидетельства их существования как отпечатки в породе или как химические остатки их жизнедеятельности. С другой стороны, в приповерхностных условиях проявления современной микробиальной жизни часто тесно связаны с границей между вулканогенной породой и водой (Fisk et al., 2006).

Микробы живут как на поверхности влажных трещин, так и могут всверливаться в минералы, оставляя следы. Микробиальная активность в изверженных породах производит характерные изменения вулканического стекла и силикатных минералов. Образуются ямки, туннели и неправильные границы между стеклом и палагонитом (хлоритоподобное в-во переменного состава).

Вопрос освоения лавовых потоков микроорганизмами интересен сам по себе, вопрос же колонизации лав на самых ранних этапах эволюции жизни на Земле имеет колоссальное значение.



На самых ранних этапах развития Земли, в архее, большая часть Земли была расплавленной из-за активного вулканизма и интенсивной метеоритной бомбардировки, которая закончилась около 4.0 млрд. лет тому назад. Прекращение или ослабление космических бомбардировок позволило планете остыть и образовать твердую земную кору. Именно с этого времени и начинается геологически документированная история Земли (Розанов, 2009). Соответственно самые ранние породы Земли были вулканогенными, метаморфические и осадочные породы были образованы позднее (древнейшие метаосадочные породы имеют возраст 3.7-3.85 млрд. лет).

Наиболее древние земные породы, в которых обнаружены биоморфные микроструктуры, это породы архейских зеленокаменных поясов Западной Гренландии, Южной Африки и Австралии (Knoll, Barghoorn, 1977; Walter, 1983; Schopf, 1983, 1993; Knoll, 1994;

Весталл, Велш, 2002). В их разрезах преобладают вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы.

До недавних пор считалось, что самые древние микрофоссилии из этих разрезов относятся к мезоархейски пиллоу-лавам зеленокаменного пояса Барбетон в Южной Африке. Предполагается, что микробная жизнь заселила эти подводные вулканические породы сразу после их извержения около 3.5 млрд. лет назад (Furnes et al., 2004). Однако первым обнаружил ископаемые нитчатые микробы, напоминающие цианобактерий, в раннем архее (3.465 GA) западной Австралии Дж. Шопф (1993). Еще одна архейская (3.235 GA) находка микрофоссилий в вулканогенных породах зафиксирована в вулканогенном массиве сульфидных отложений в Кратоне Пилбара в Австралии. В этом случае бактериальная жизнь была приурочена к системе подводных термальных ИСТОЧНИКОВ (Rasmussen, 2000).

Предположение, что вулканические породы являются местообитанием ранней микробной жизни, не является неожиданным. Некоторые из самых нижних ветвей древа жизни представлены термофильными микробами и существует доказательство того, что ранняя жизнь могла быть приурочена к вулканическим территориям, в том числе к гидротермальным источникам (Furnes et al., 2004). Так, например, нитчатые микрофоссилии, описанные из массивных сульфидных отложений (возраст 3.235 млрд. лет) интерпретируются как образовавшиеся условиях подобных современным черным курильщикам (Rasmussen, 2000). Это соответствует оптимальным температурам роста термофильных бактерий (около 70° C).



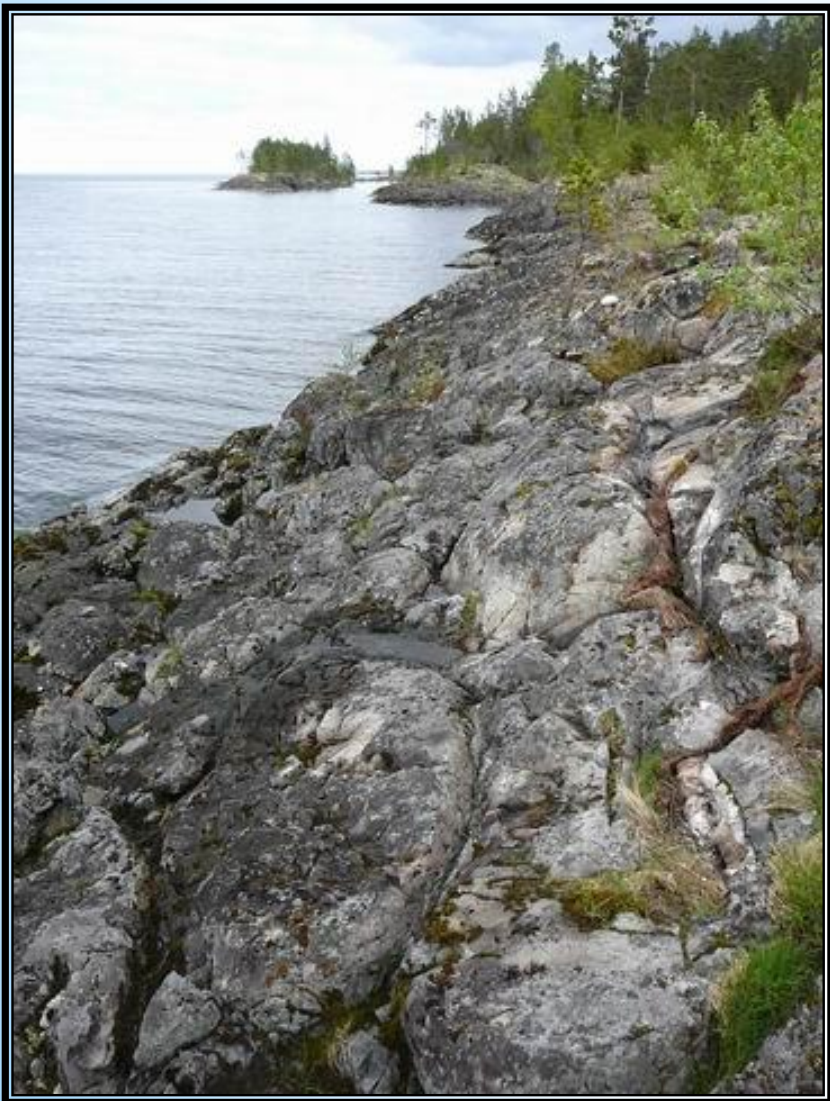
Более того, было доказано, что вскоре после извержения, когда температура поверхности пород падает ниже 113°C , жизнь уже может существовать (Stetter et al., 1990; Stetter, 2006), причем колонизация микроорганизмами происходит одновременно везде, куда может проникнуть морская вода (Thorseth et al., 2001).

Для изучения колонизации микроорганизмами остывающих лав нами было выбрано несколько модельных объектов, представляющих различные пиллоу-лавы. Колонизацию древних пиллоу-лав микроорганизмами мы рассматривали на примере нижнепротерозойских пиллоу-лав Карелии (2.41 и 2.0 млрд. лет) и Южной Африки (2.22 млрд. лет). Распределение микрофоссилий по зонам пиллоу-лав рассматривалось на примере пиллоу-лав суйсарской свиты нижнего протерозоя Онежской мульды Центральной Карелии. В качестве сравнительного материала использовались вулканические стекла из осевой части рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта (Центральная Атлантика, полигон Сьерра-Леоне).

Фоссилизация микроорганизмов происходит крайне быстро (Герасименко и др., 1994, 1996, 1999; Westall et al., 1995; Розанов, 2003), поэтому, обнаруженные в результате изучения интересные и довольно обильные микробные остатки представлены исключительно микрофоссилиями.

ПИЛЛОУ-ЛАВЫ

Когда жидкий магматический расплав достигает земной поверхности, происходит его извержение, характер которого определяется составом расплава, его температурой, давлением, концентрацией летучих компонентов и другими параметрами.



При подводных и подледных извержениях (как правило, при небольшой скорости излияния) образуются пиллоу-лавы, или подушечные (шаровые) лавы, вероятно, самый распространённый тип застывшей лавы на Земле (Moore, 1975). Потоки шаровой лавы формируются на склонах подводных вулканов. Особенно часто шаровые лавы образуются в океанических рифтовых зонах.

Пиллоу-лавы обычно базальтовые или андезитовые. Пиллоу-лавы встречаются в разновозрастных формациях, включая современные.



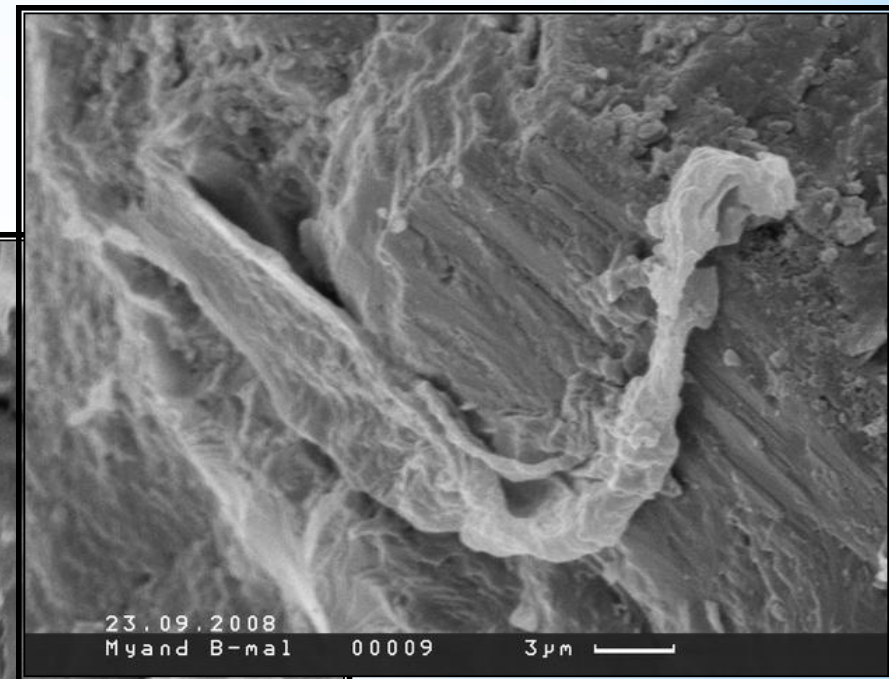
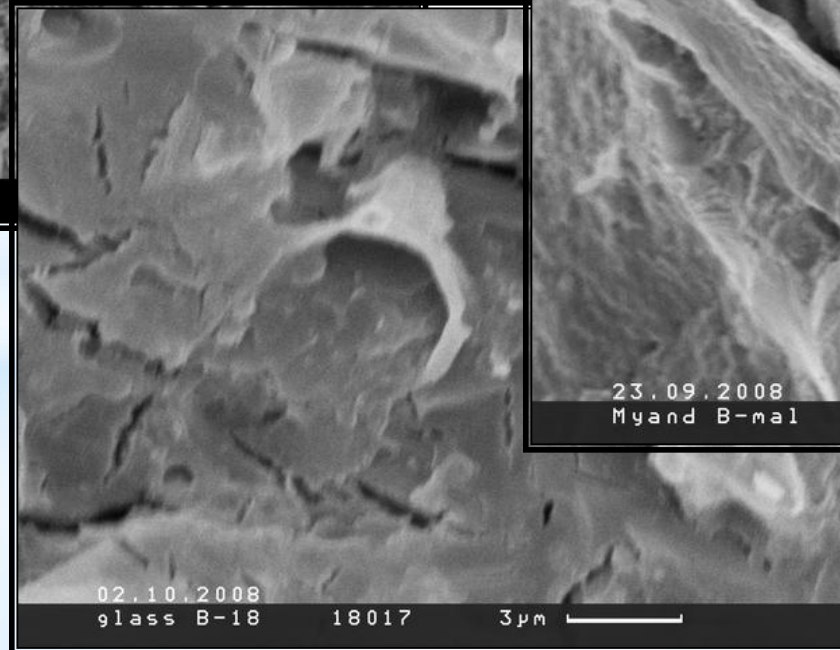
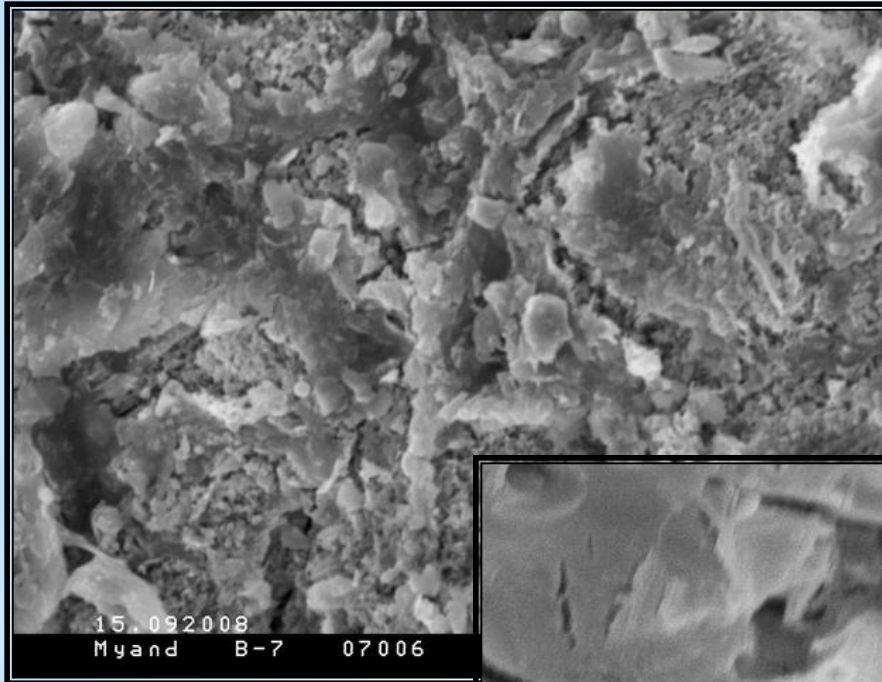
Чем меньше размеры отдельностей, тем более правильна их шаровая форма. Отдельности плотно прилегают друг к другу. Их поверхности покрыты пузыристой или стекловатой коркой, в поперечном сечении проявляется концентрическое строение. Зернистость внутри отдельности уменьшается от центра к краевым частям.

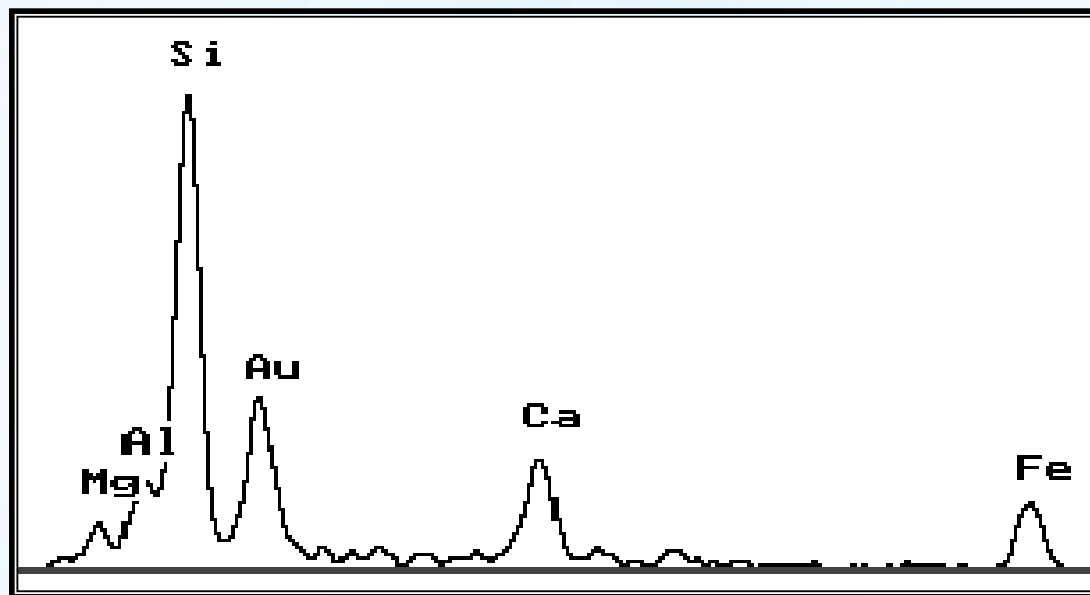
Поры и
небольшие
пространства
между
отдельностями
заполнены
межподушечным
материалом.



Во всех изученных пиллоу-лавах обнаружены довольно разнообразные псевдоморфозы по биогенным объектам: нитчатым, коккоидным и другим формам, а также многочисленные биопленки. Превалируют нитевидные формы, из которых наиболее важны нитевидные структуры диаметром около 5-10 мкм.

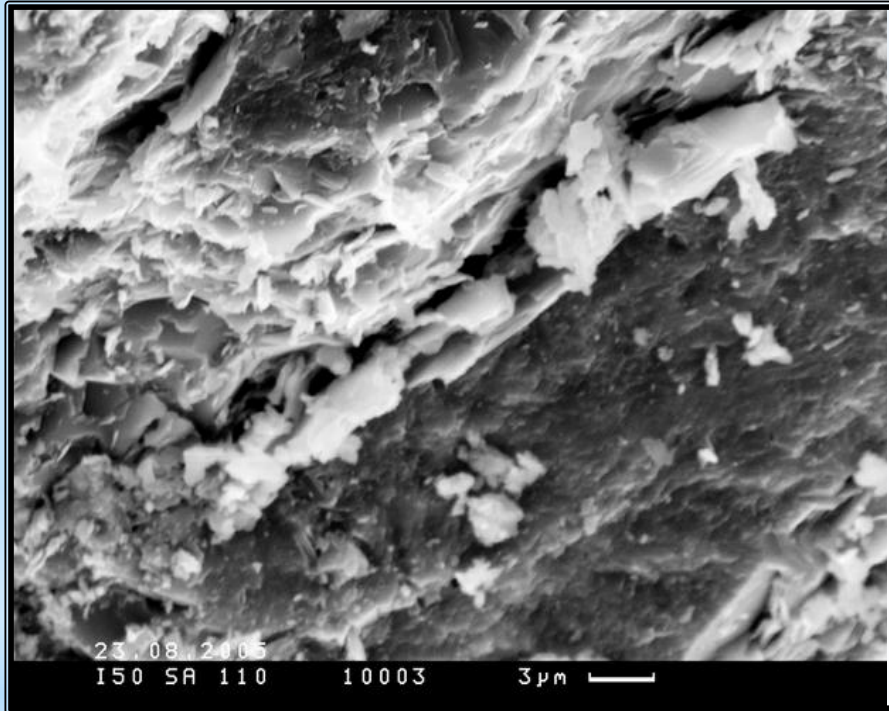
Нитевидные формы. Они преобладают и в раннепалеопротерозойских и в современных вулканических стеклах.





Химический состав нитей идентичен составу вмещающих пород и представлен преобладающим кремнием, кальцием и железом, а также алюминием и магнием

По размеру и морфологии нитевидные формы часто сходны с цианобактериями современных родов *Phormidium* и *Microcoleus*.

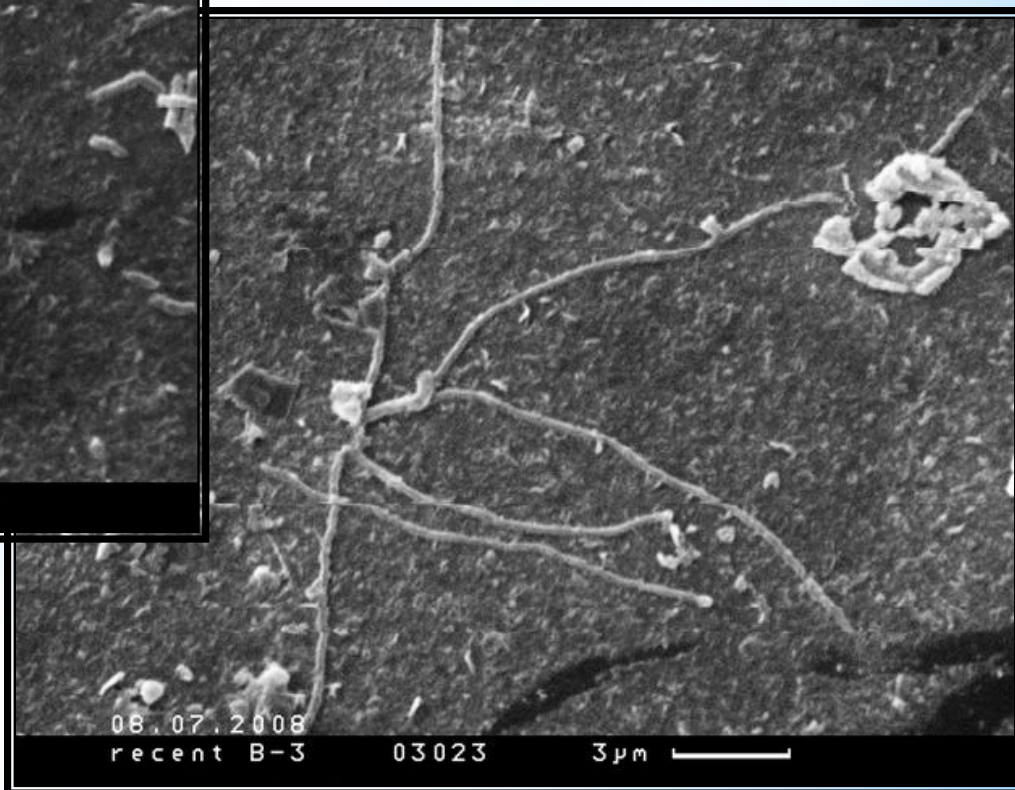
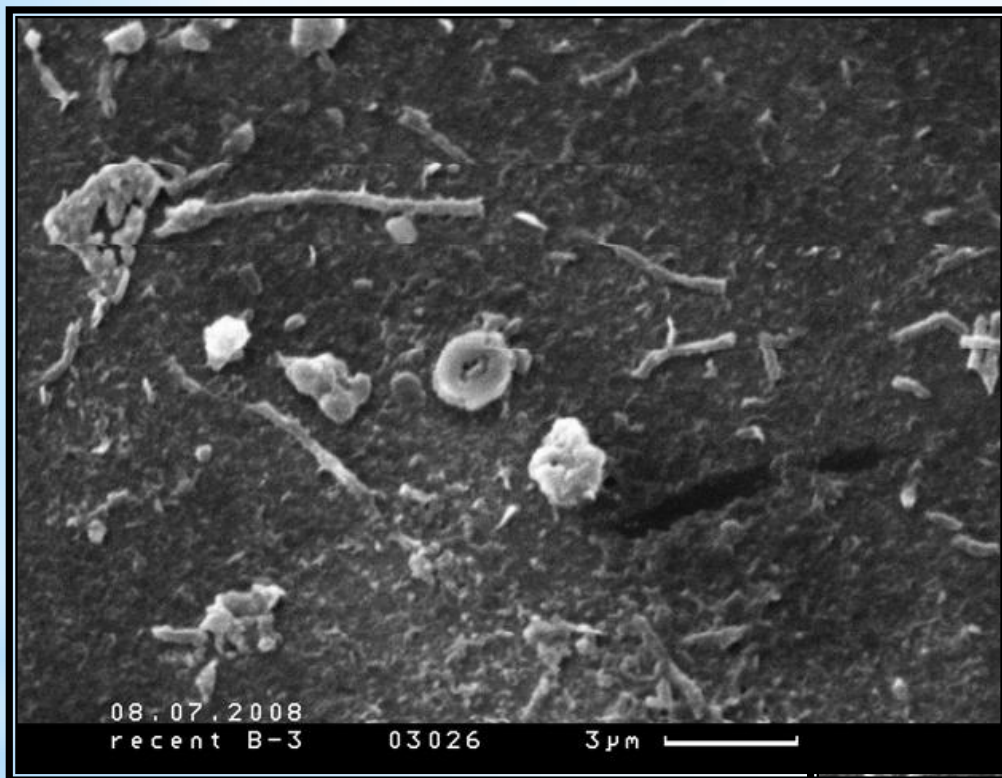


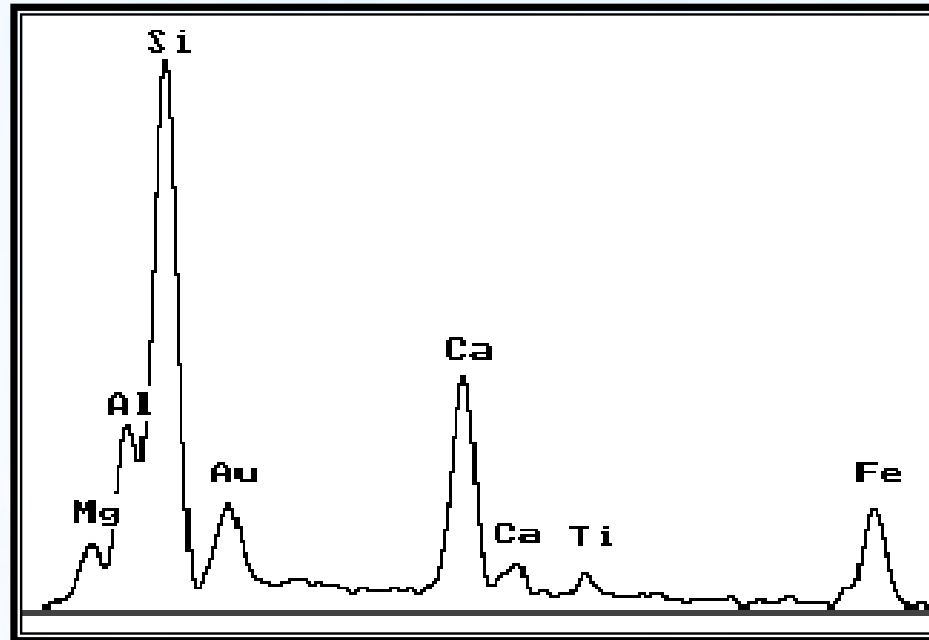
Вероятно, ископаемые чехлы цианобактерий с полой внутренней частью.



Пучки чехлов нитей. Это слегка переплетающиеся и расходящиеся полые трубки, напоминающие представителей современных цианобактерий *Microcoleus*.

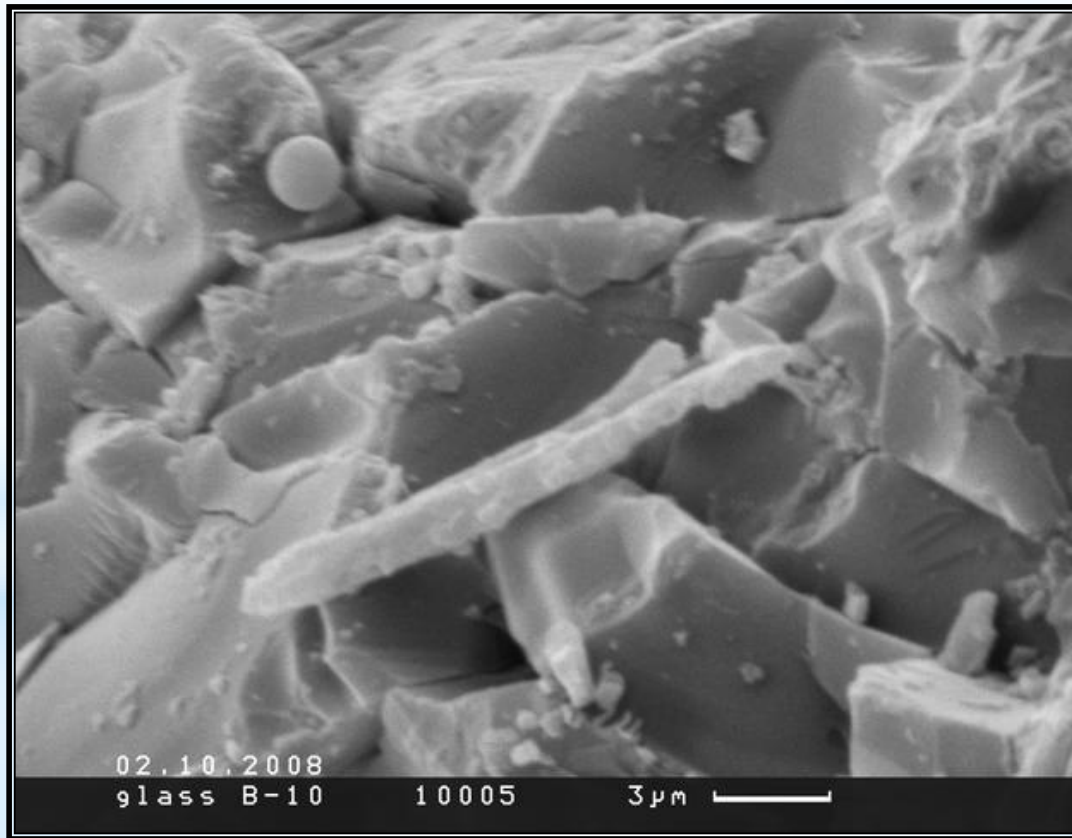
Длинные нитевидные формы современного вулканического стекла диаметром много меньше 1 мкм





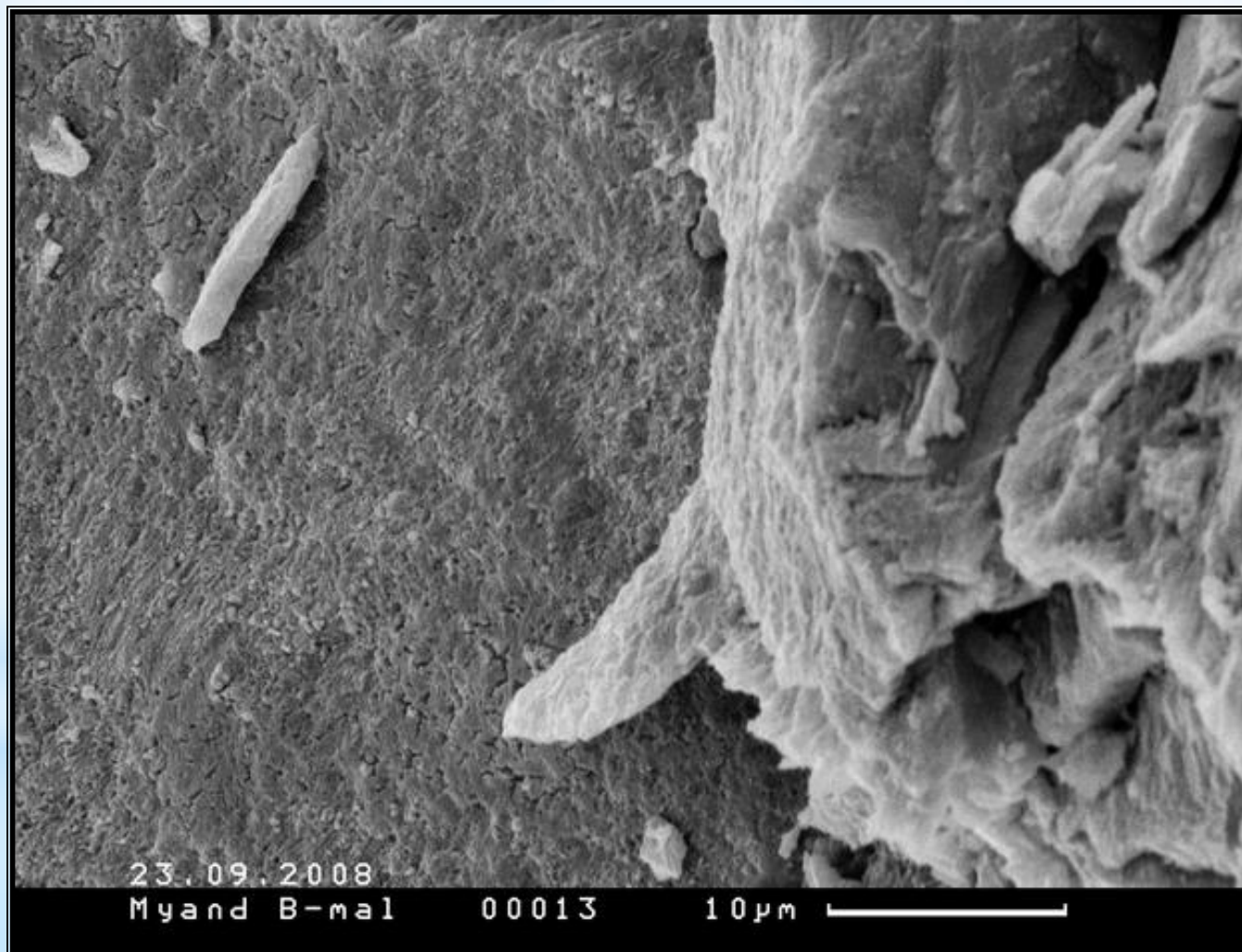
**Химический состав обнаруженных нами нитей
(также как и других микрофоссилий)
соответствует составу вмещающих пород**

В современных пиллоу-лавах также встречены и нити (трубочки) с диаметром около 2 мкм, по всей видимости, покрытые чехлом, что лучше всего видно в месте погружения нити в породу.



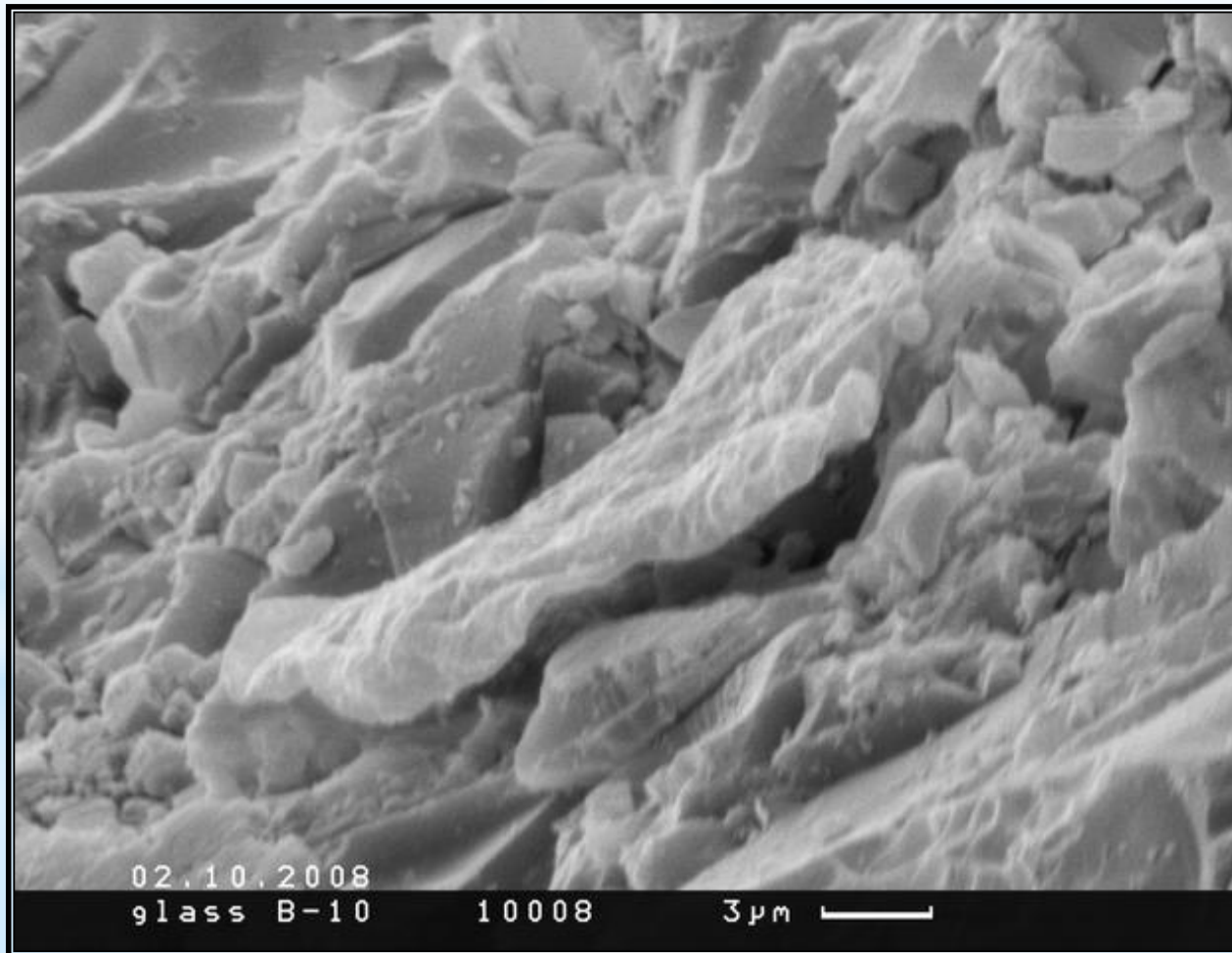
Современные

**Фрагмент более короткой нити
(длина до 10 мкм), с диаметром 3-6 мкм.**

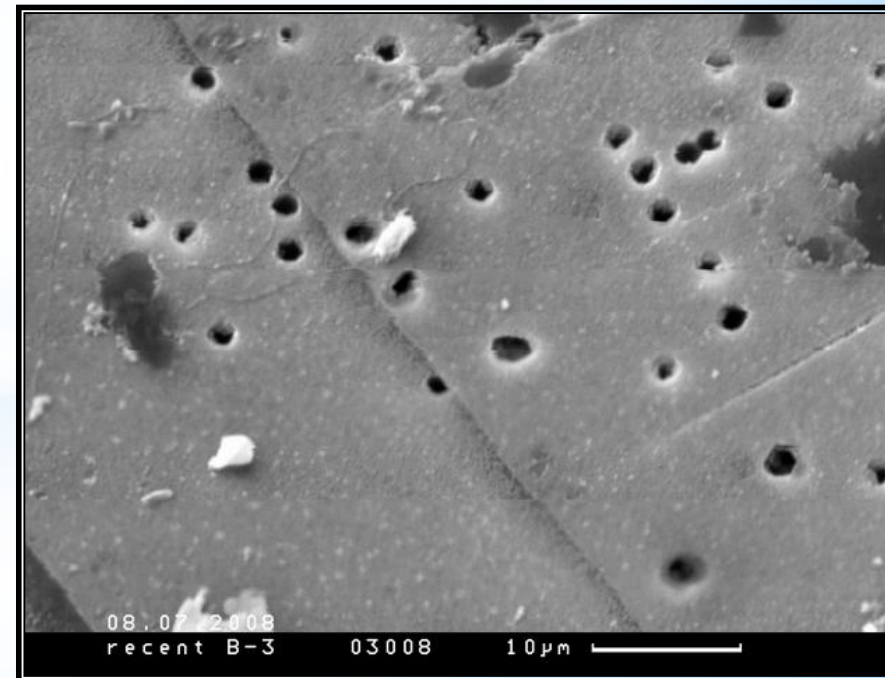
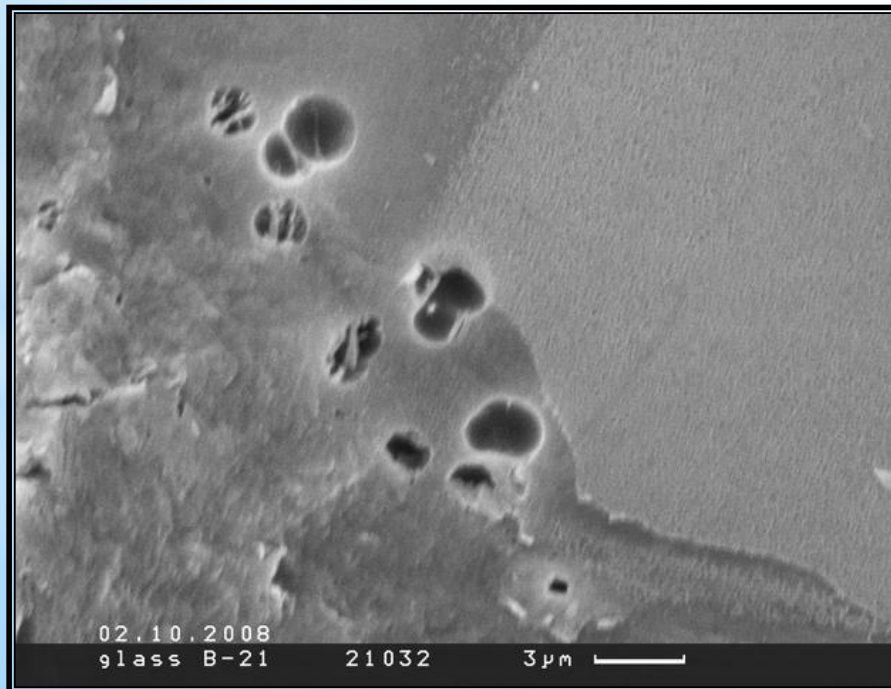


Мяндуха

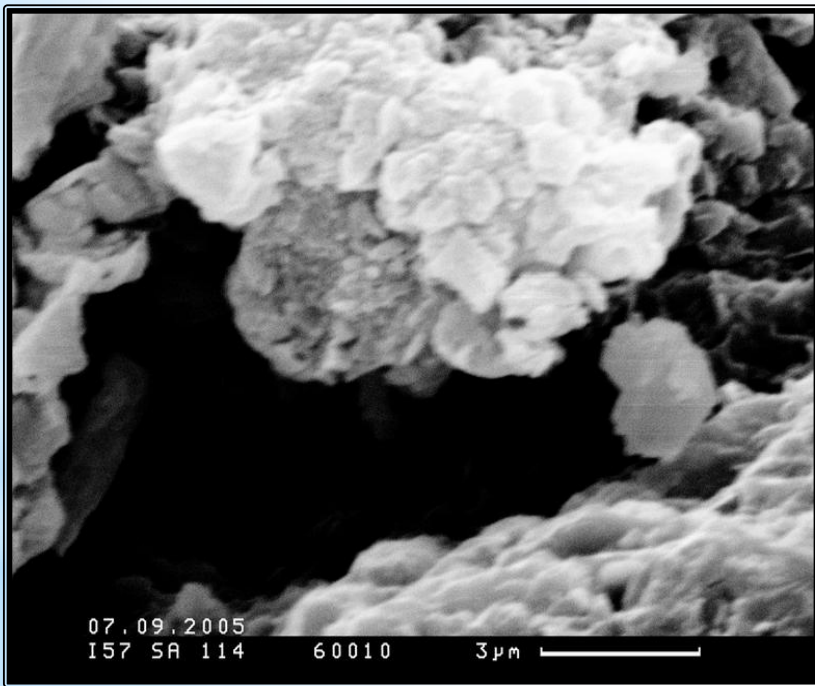
В современных пиллоу-лавах короткие нити были, вероятно, покрыты толстым чехлом и гликокаликсом. Погружение их в породу не наблюдалось. По всей видимости, подобные нити колонизировали поверхность остывающей лавы.



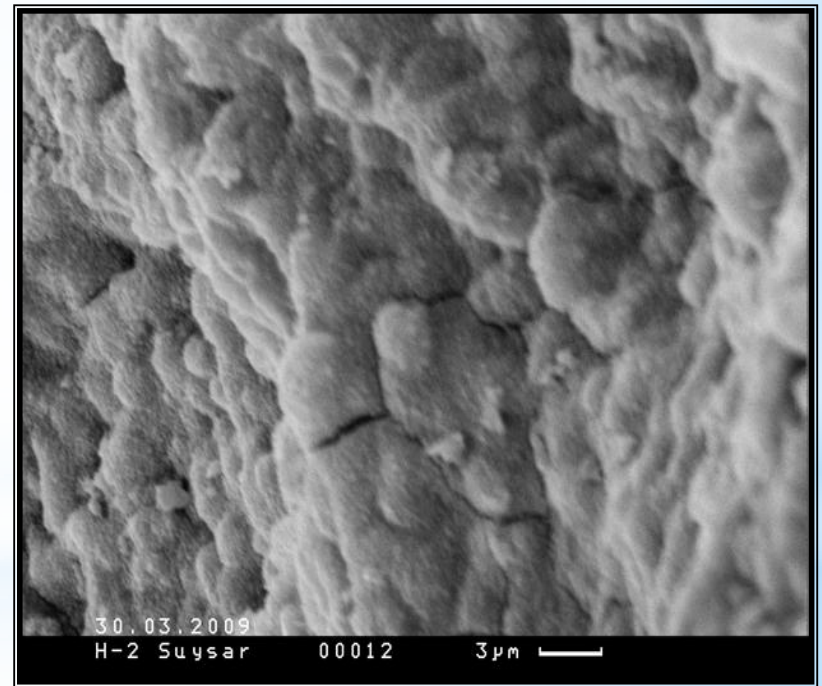
Многочисленные отверстия с диаметром от 1 до 3-5 мкм также обнаружены в современных пиллоу-лавах. Аналогичные отверстия в вулканическом стекле интерпретируются (McLoughlin et al., 2007, fig 3) как следы сверления микроорганизмов. Предполагается, что современные следы «сверления» и отверстия, обнаруженные в палеопротерозойских породах, сигенетичны. Вулканические породы после извержения с температурой $< 1130^{\circ}\text{C}$ считаются пригодными для гипертермофильной жизни (Stetter et al., 1990) и, соответственно, вулканическое стекло при контакте с морской водой могло быть колонизированным при таких условиях. Однако, вопрос о том, какие микроорганизмы оставили такие следы, остается открытым.



Кокки встречаются реже, чем нитевидные формы. В основном это одиночные кокки с шероховатой поверхностью, диаметр их, как правило, около 3-6 мкм. Колонии кокков редки. Отмечено лишь скопление кокков диаметром около 3 мкм в гликокаликсе, слагающее фрагмент породы.



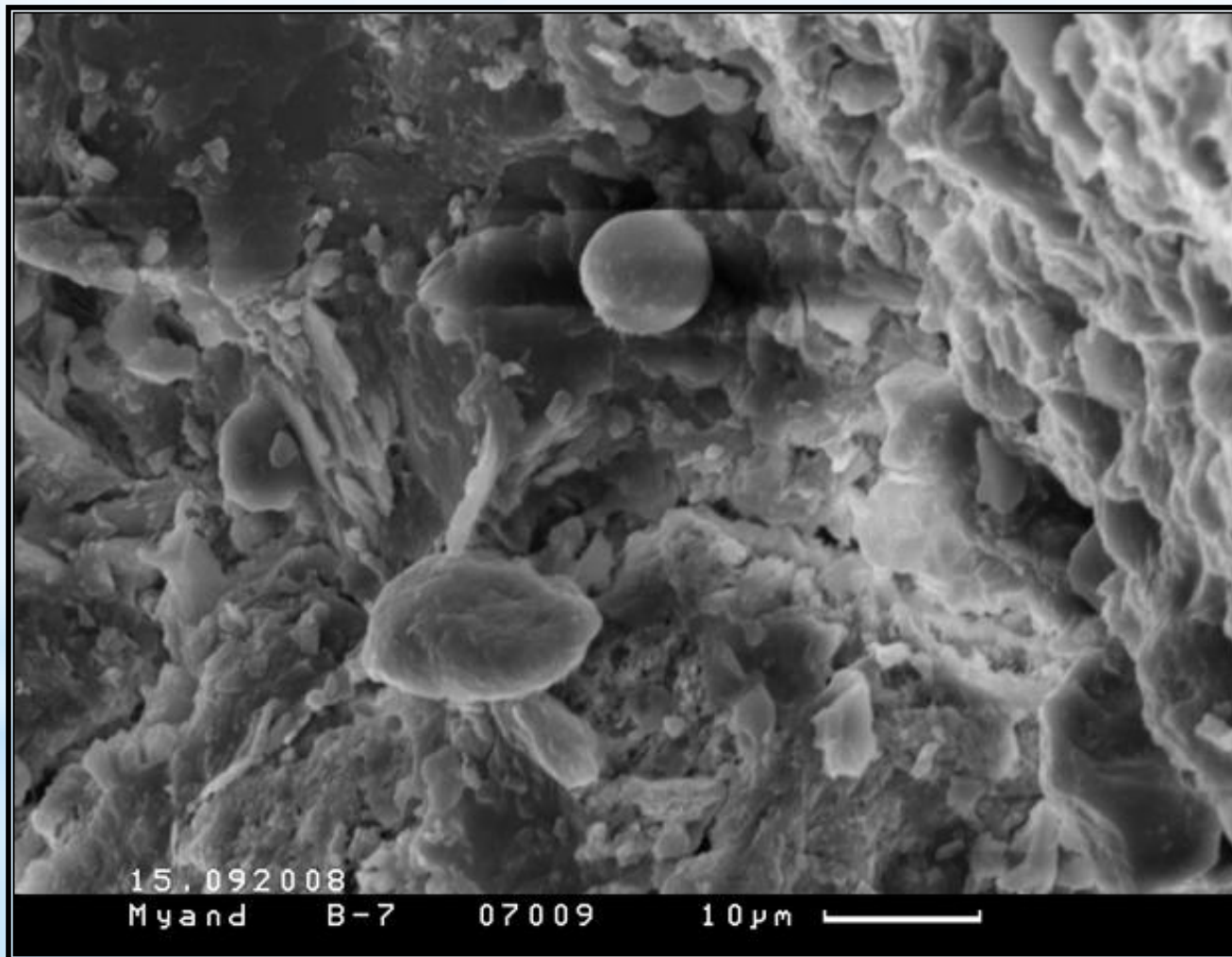
Онгелюк



Суйсарь

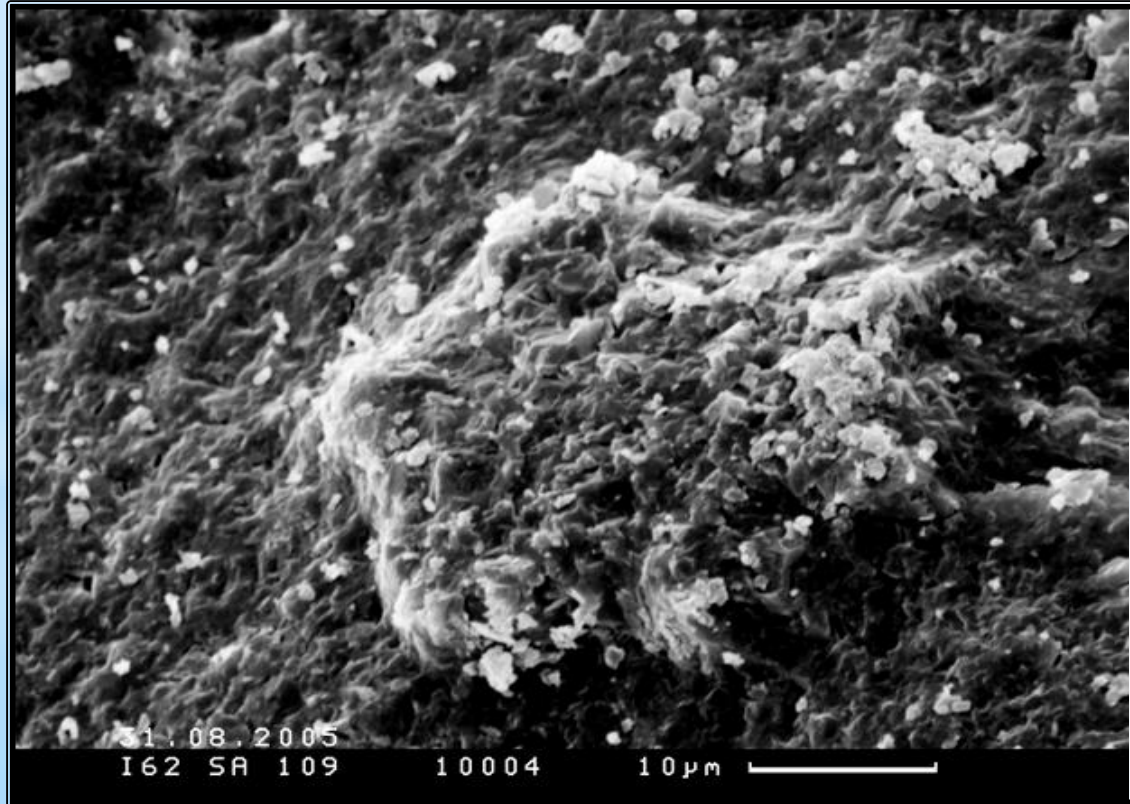
Овальные микрофоссилии.

Большой диаметр до 10-15 мкм, меньший -5-10 мкм.

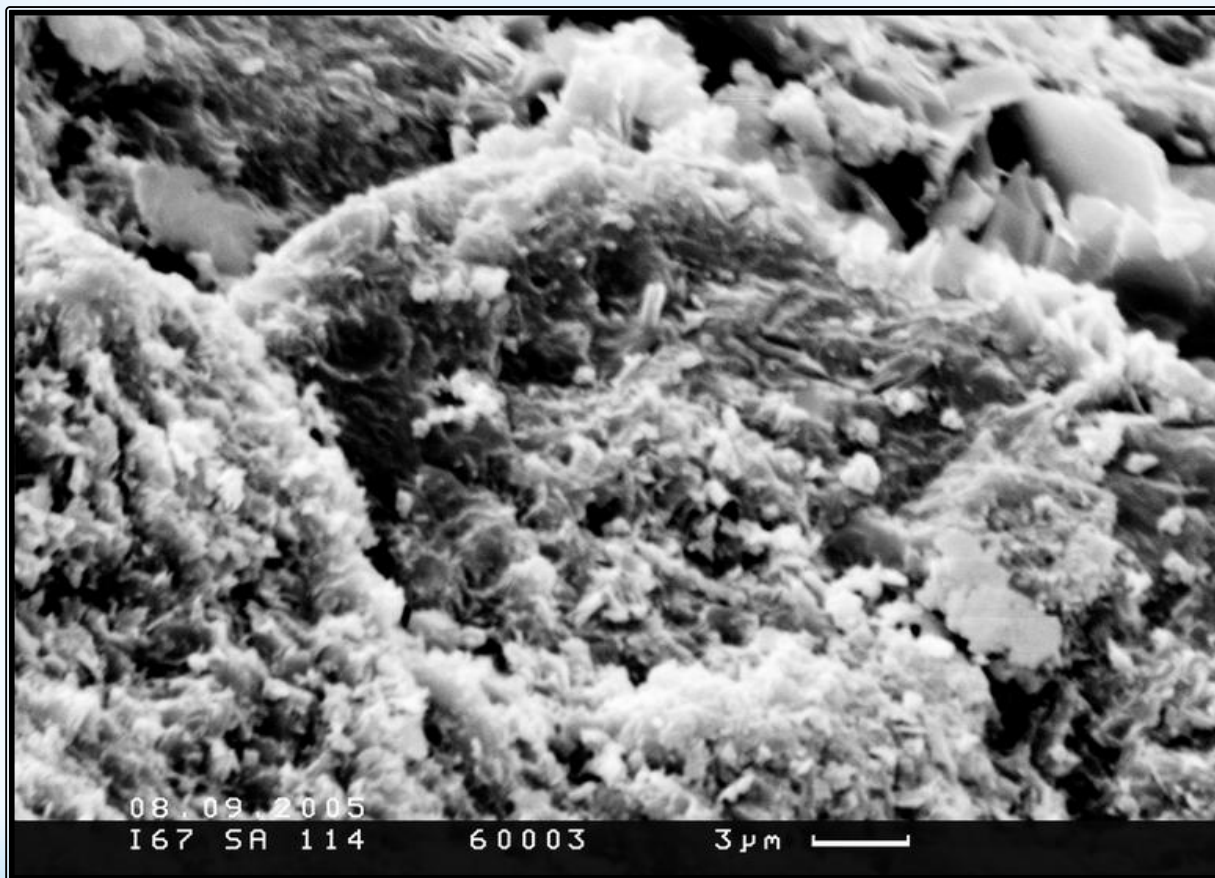


Мяндуха

В раннепротерозойских пиллоу-лавах встречены также формы по сложности своей организации, вероятно, приближающиеся к эвкариотам. Среди них наибольший интерес представляют крупные, по-видимому, пятиугольные структуры диаметром около 50-60 мкм. Углы этих структур представлены округлыми довольно крупными формами с неровной поверхностью диаметром до 15 мкм, в середине структуры также расположена округлая форма.

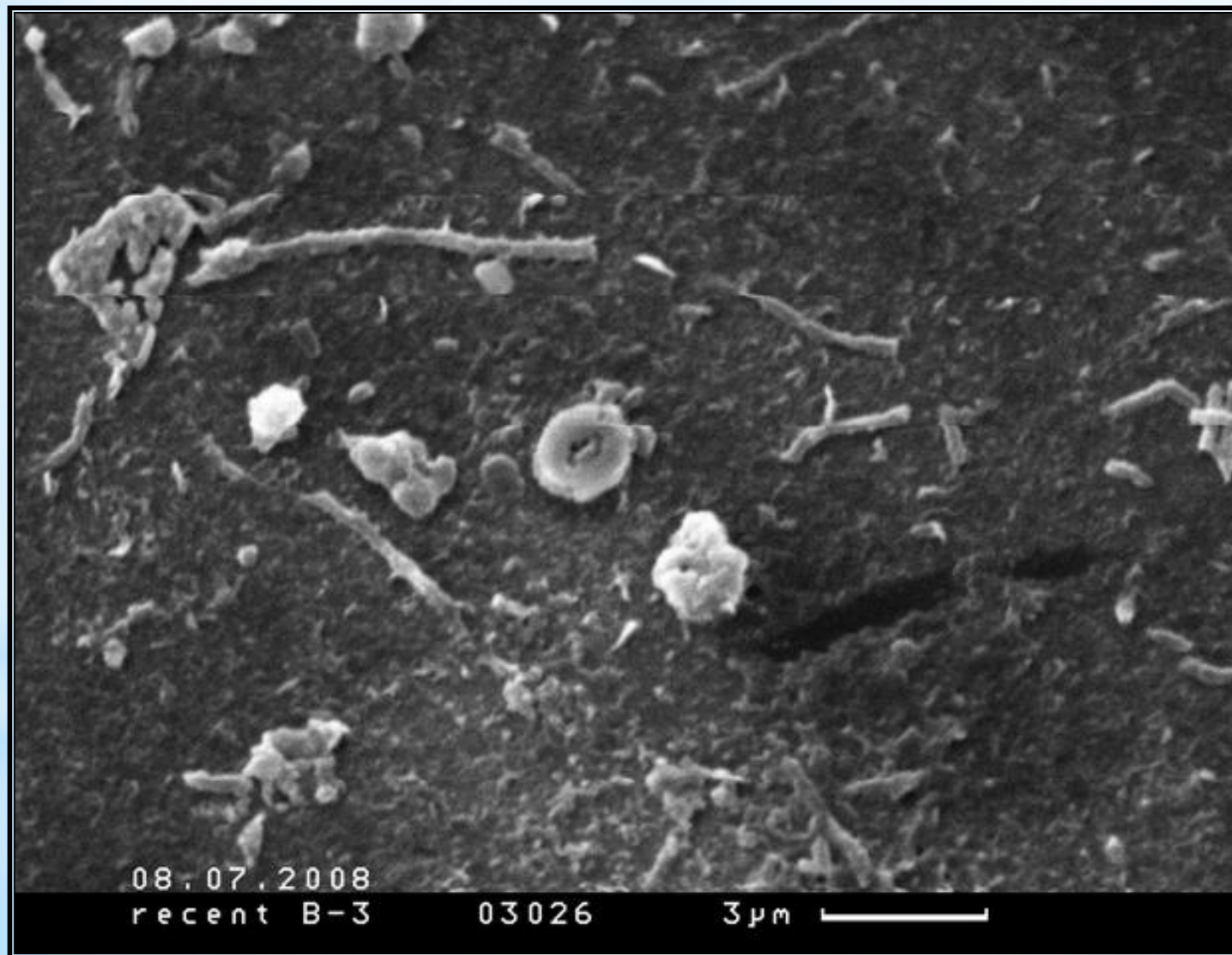


Создается впечатление, что эти округлые формы несут на себе следы кольцевидных структур, либо обрамляющих углубления, либо, наоборот, являющиеся обломками шиповидных отростков. Можно предположить, что пятиугольные формы представляли единый организм, однако нельзя исключить, что это просто колонии, в которые объединялись округлые формы. Но в любом случае такие структуры по сложности своей организации, вероятно, приближаются к эвкариотам.

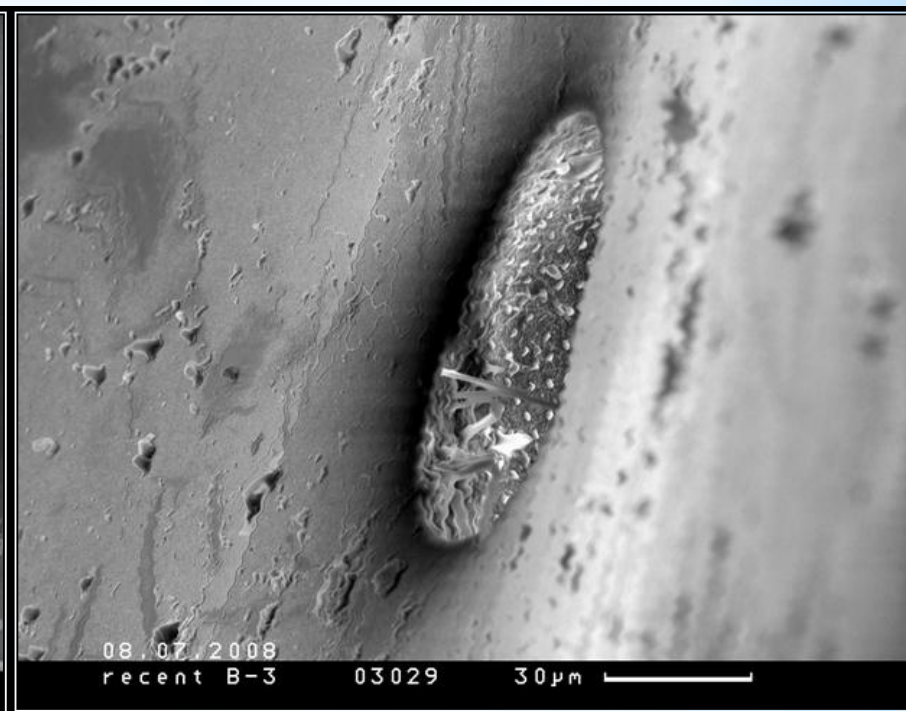
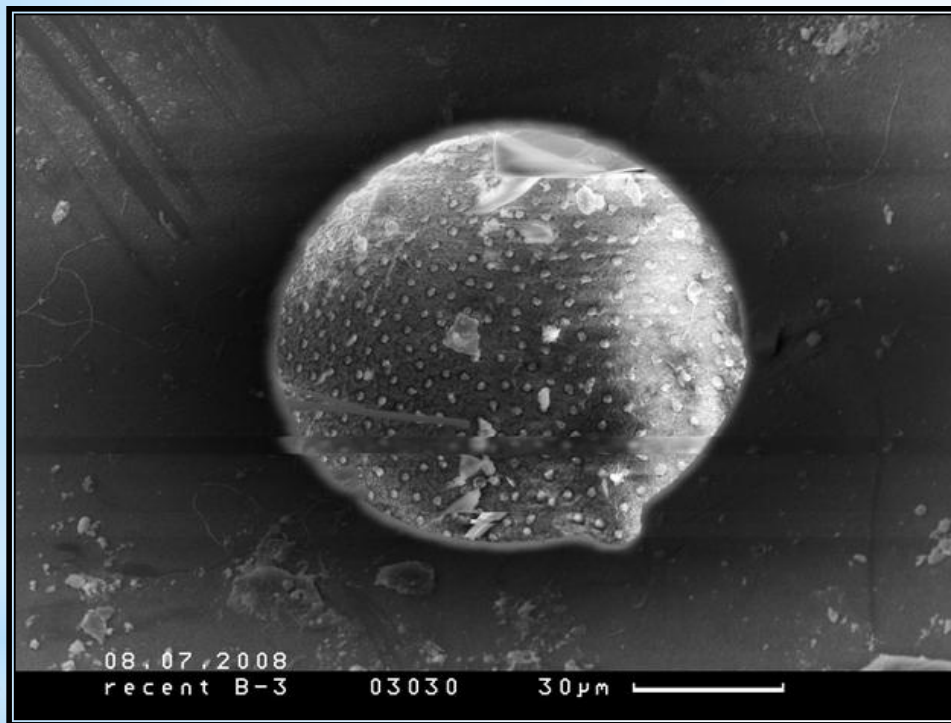


Встречены также крупные округлые структуры диаметром около 25мкм с неровной поверхностью и мелкими (диаметр 1-2 мкм) кратероподобными углублениями, обрамленными тонким валиком. Эти формы напоминают округлые структуры, слагающие пятиугольники, о которых шла речь выше.

Эвкариотные формы – Coccolithophoridae – в современных пиллоу-лавах

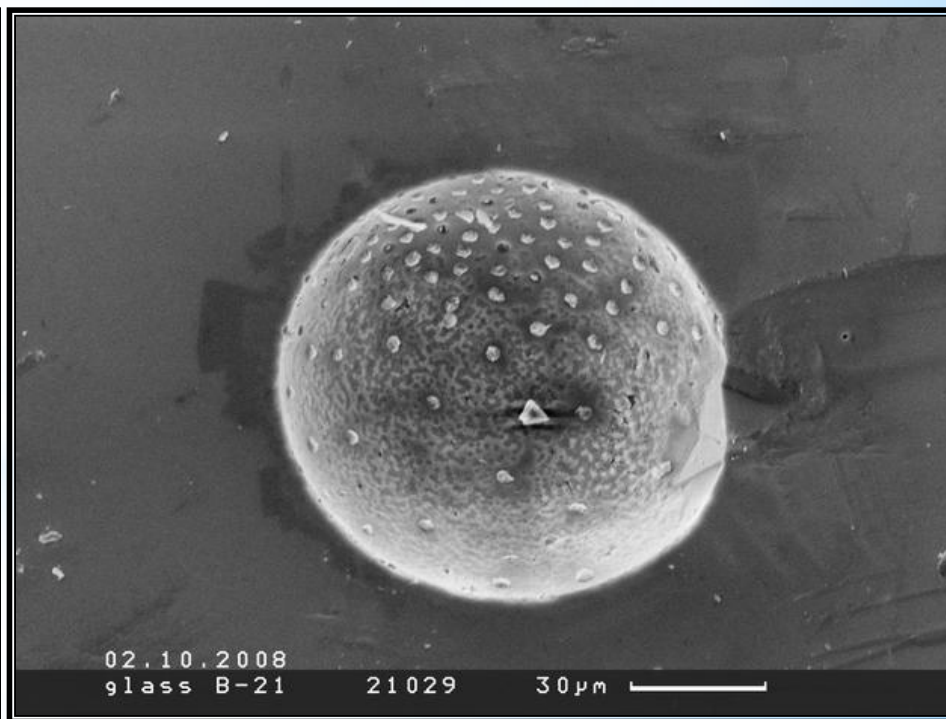
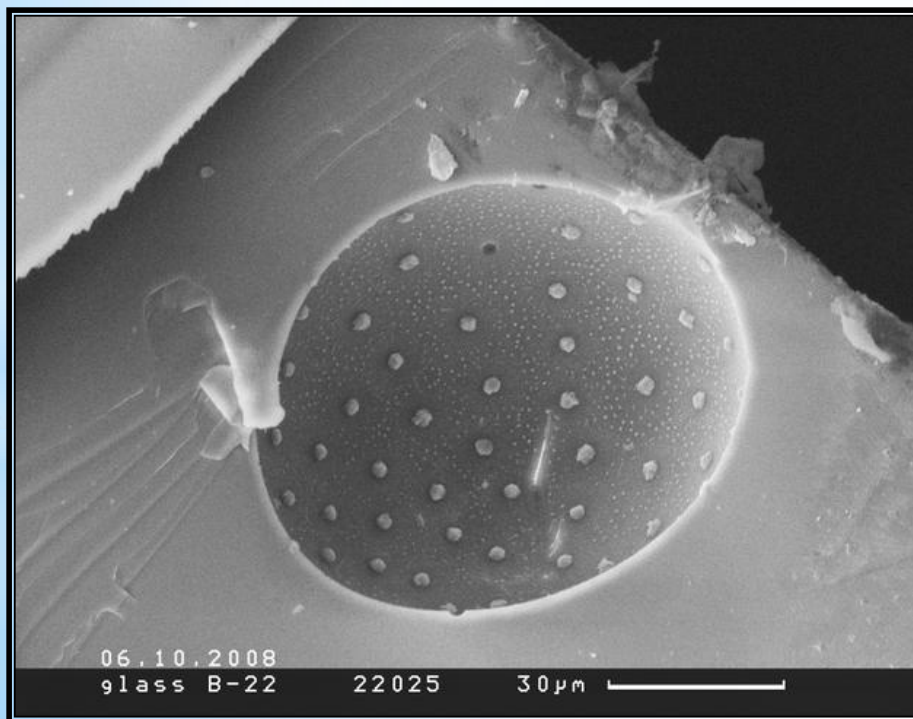


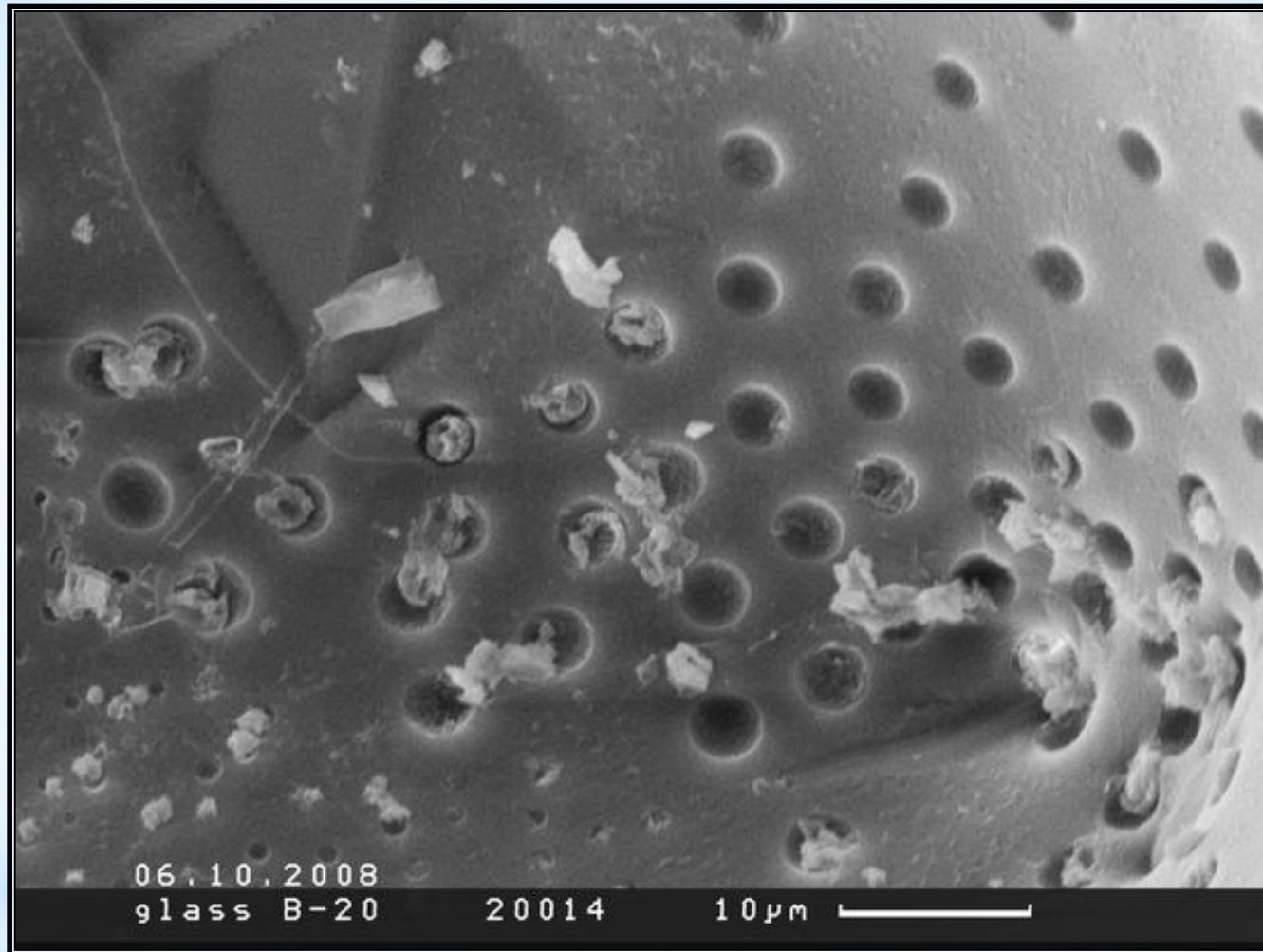
Своеобразные крупные, почти чечевицеvidные формы и их отпечатки.



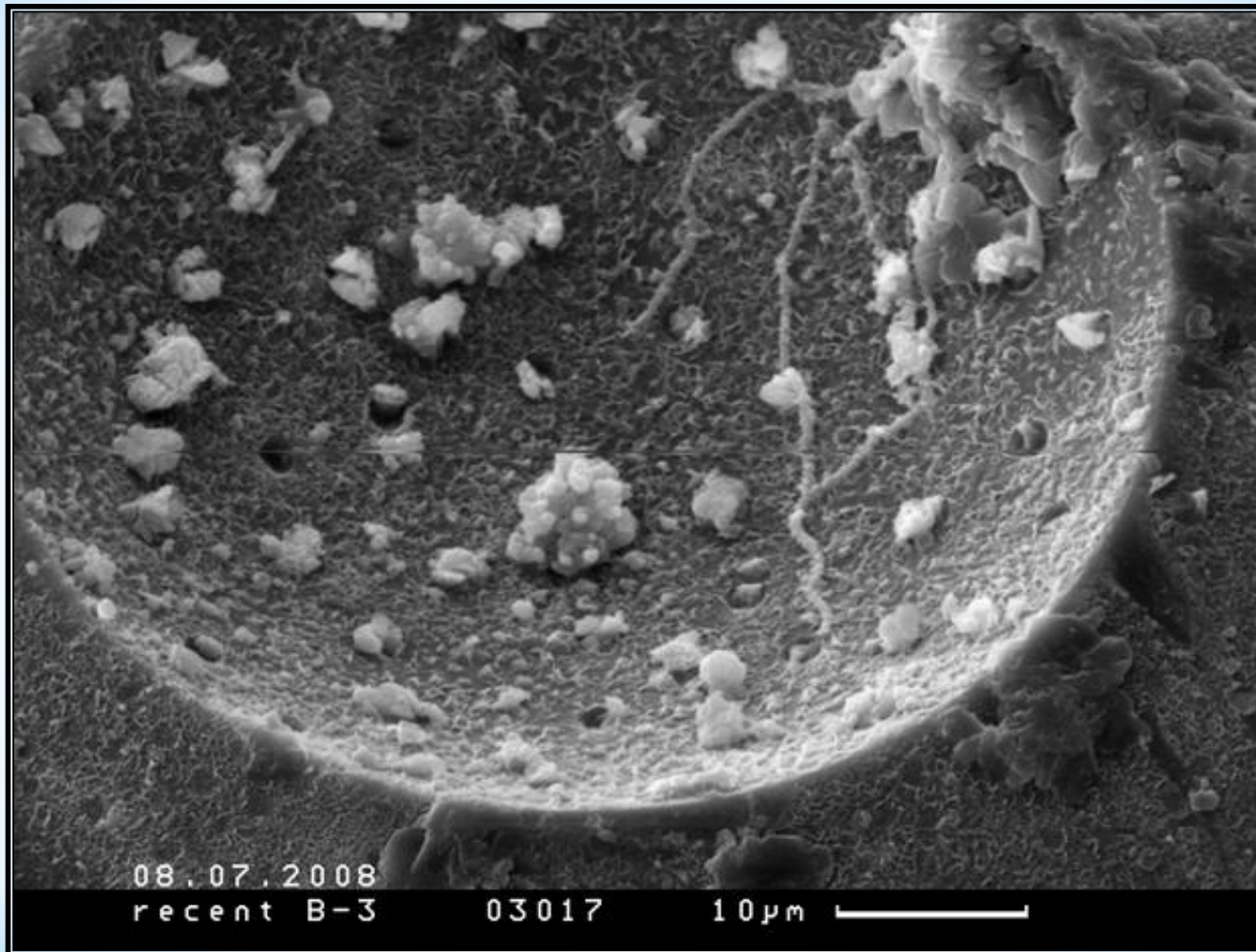
**Небольшой вырост, высотой порядка 5 мкм. Диаметр
может превышать 100 мкм, «высота» - 20-60 мкм.
Оболочка тонкая, возможно, однослойная это видно на
сколах образцов.**

Наружная поверхность шероховатая, покрыта правильно расположенными порами с диаметром порядка 2 мкм. Пory, как правило, прикрыты выпуклыми пластинками, иногда, треугольной формы.





Иногда создается впечатление, что в порах находятся, скорее всего, коккоидные формы (диаметром 2-3 мкм).



Следы длинных нитчатых микрофоссилий с диаметром около 1 мкм. Вполне вероятно, нитчатые бактерии обитали на участке породы уже после образования отпечатка, но нельзя исключить и возможности и прижизненного заражения чечевицевидных форм паразитирующими нитчатыми микроорганизмами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно предположить, что мы имеем в некоторых раннепротерозойских пиллоу-лавах (Онгелюк) все составляющие классического цианобактериального мата: ископаемые осцилляториевые цианобактерии (подвижные нитчатые организмы) - представители форм, напоминающих *Phormidium* и *Microcoleus*, пурпурные бактерии и фрамбоидальные структуры, связанные с процессом сульфатредукции. Застывающая базальтовая лава, контактируя с водой, могла создавать достаточно благоприятные условия для развития многослойных цианобактериальных матов, причем воды должны были содержать достаточное количество сульфатов для бактериальной сульфатредукции.

Подтверждено, что микробы колонизировали базальтовое стекло раннедокембрийских подводных извержений, точно также как современные микробы колонизируют при извержениях вулканическое стекло. Как современных, так и раннепалеопротерозойских комплексах преобладают разнообразные нитевидные формы и встречены предположительно эвкариотные формы. В то время как кокки и овальные формы, вероятно, имели подчиненное значение. Таким образом, вулканогенные породы являлись благоприятной средой для развития жизни.

Были изучены комплексы фоссилизированных микроорганизмов суйсарской свиты (2 млрд. лет) (стратотипа для людиковийского горизонта карельского комплекса) нижнего протерозоя Центральной Карелии.

В результате сравнительных бактериально-палеонтологических исследований различных пород пиллоу-лав: пород из межподушечного пространства, из краевых и центральных зон были выявлены существенные различия в распределении микрофоссилий.

Главное - то, что комплекс микрофоссилий межподушечного пространства и краевых частей подушек намного обильнее и разнообразнее, чем центральных частей.

Химический состав фоссилизированных организмов во всех случаях (межподушечный материал, краевые и центральные части подушек) соответствует химическому составу вмещающих пород.

Это согласуется с захоронением микроорганизмов *in situ* и подтверждает тот факт, что мы имеем дело исключительно с псевдоморфозами и практически исключаем возможность сохранения органического материала.

Порода (образец)	Нитевидные формы				Кокки		Шаро- образные диаметр 10 мкм	Био пленки
	переплетение нитей	одиночные		отверстия от нитей	одиночные диаметр 3 мкм	колонии		
		диаметр до 3 мкм	диаметр до 10 мкм					
Межподушечный материал	+	+++	+	++	+	+	+	+++
Краевая зона подушек	—	++	—	+	+	—	—	++
Базальты	—	+	—	—	+		—	—

Распределение (количественное и качественное) микрофоссилий в различных частях раннепротерозойских пиллоу-лав.

В результате бактериально-палеонтологических исследований было обнаружено доминирование нитевидных ископаемых форм в краевых частях подушек и в межподушечном материале. Биопленки также играют большую роль среди обнаруженных фоссилизированных остатков. Следует подчеркнуть, что при описании речь идет исключительно о фоссилизированных бактериальных (цианобактериальных) остатках, а точнее о псевдоморфозах по бактериям и цианобактериям.

Образование пиллоу-лав суйсарской свиты, очевидно, связано с многократными подводными извержениями, в результате которых ранее образованные пиллоу-лавы перекрывались продуктами более поздних извержений. Межподушечный материал был образован также в суйсарское время в перерывах между извержениями. Распределение микрофоссилий в пиллоу-лавах (табл.) говорит о том, что наиболее благоприятные условия для развития и процветания жизни были в осадке на поверхности пиллоу-лав, за счет которого и был сформирован межподушечный материал. Краевая часть пиллоу-лав, граничащая с осадком также была довольно благоприятна для развития микроорганизмов.

Итак.

Самые ранние породы Земли были вулканогенными, остальные типы пород были образованы позднее. Вулканогенные (изверженные) породы подвергались микробной колонизации как на поверхности, так и в самой толще породы.

Высокие температуры остывающей лавы не являются препятствием для развития микробиальной жизни. Кроме того, для существования жизни на Земле необходимо наличие воды, которая появилась около 4 млрд. лет назад.

Таким образом, колонизация жизнью нашей планеты могла начаться с образованием земной коры и охлаждением ее до 113°, а по некоторым данным микробиальная жизнь возможна уже при 120-130°. Колонизация происходила по влажным трещинам и поверхностям. Вода также играла роль экрана для жесткого ультрафиолетового излучения, т.к. озоновый слой, по-видимому, отсутствовал.

Авторы признательны всем, кто помогал в проведении этой работы: за предоставленный материал - М.М. Богиной, А.В. Чистякову, Е.В. Шаркову, Д. Корнеллу, а также за обсуждение результатов и ценные советы, особенно А.Ю. Розанову, Г.Т. Ушатинской и Е.А. Жегалло; А.В. Кравцеву - за помощь при работе на электронных сканирующих микроскопах.

Работа выполнена по Программе Президиума РАН «Эволюция органического мира и планетарных процессов» (подпрограмма 2) и поддержана грантами РФФИ №№ 14-04-00260 и 15-04-00774.



Thank you
for attention!

The END.