

# ГЛУБИННАЯ БИОСФЕРА ЗЕМЛИ, СОВРЕМЕННАЯ И ДРЕВНЯЯ

**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/>

## THE DEEP BIOSPHERE OF THE EARTH, MODERN AND ANCIENT

**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/>

### Summary

The analysis of the study of the modern deep biosphere of the Earth suggests that its substance participates in the global biological cycle. Deep waters containing underground microorganisms can come out in artesian springs and on continental slopes, enriching upwelling zones and ocean currents with organic matter. At the same time, mineralized groundwater has the possibility of constant movement, due to the rhythmic change in intra-breed pressure at daily earth tides.

The most favorable conditions for the habitation of colonial microorganisms of the ancient deep biosphere existed inside rocks in the cavities of agate chambers, before filling them with siliceous matter. Underground organisms formed layered, bubbly, branched and kidney-shaped structures on the walls of agate cavities, similar to bacterial mats, subsequently replaced by siliceous matter. Zonal micro- and macro-rhythms in banded agates were formed as a result of sedimentary siliceous matter deposition from flowing silicon-containing solutions with pulsating pressure changes during rock tides. Later, under the influence of lithostatic pressure, fields of multidirectional dynamic stresses appeared in the already hardened structures of agate geodes, leading to the crystallization (devitrification) of siliceous matter and the formation of chalcedony microliths.

The morphological diversity of branched, vesicular and kidney-shaped structures in agates may indicate the biodiversity of ancient deep organisms.

Keywords: deep biosphere, Earth tides, chalcedony micro rhythms, moss agates, biogenic mats, silification, microfossils.

### Аннотация

Анализ изученности современной глубинной биосферы Земли позволяет предположить, что ее вещество участвует в глобальном биологическом круговороте. Глубинные воды, содержащие подземные микроорганизмы, могут выходить наружу в артезианских источниках, и на континентальных склонах, обогащая органическим веществом зоны апвеллинга и океанические течения. При этом, минерализованные подземные воды имеют возможность постоянного движения, за счет ритмичного изменения внутрипородного давления при ежесуточных земных приливах и отливах.

Наиболее благоприятные условия для обитания колониальных микроорганизмов древней глубинной биосферы существовали внутри горных пород в полостях агатовых камер, до заполнения их кремнистым веществом. Подземные организмы образовывали на стенках агатовых полостей слоистые, пузырчатые, ветвистые и почковидные структуры, подобные бактериальным матам, впоследствии замещенные кремнистым веществом. Зональные микро- и макроритмы в полосчатых агатах формировались в результате отложения осадочного кремнистого вещества из проточных кремнийсодержащих растворов при пульсационном изменении давления во время каменных приливов. Позднее, под воздействием литостатического давления, в уже затвердевших структурах агатовых жеод, возникали поля

разнонаправленных динамических напряжений, приводивших к раскристаллизации (девитрификации) кремнистого вещества и формированию микролитов халцедона.

Морфологическое многообразие ветвистых, пузырчатых и почковидных структур в агатах может свидетельствовать о биоразнообразии древних глубинных организмов.

Ключевые слова: глубинная биосфера, земные приливы, микроритмы халцедона, моховые агаты, биогенные маты, окремнение, микрофоссилии.

### Современная глубинная биосфера Земли

Часть биосферы планеты, которая локализована в горных породах и простирается на континентах до глубины 5-ти километров, и на несколько метров ниже поверхности морского дна, относится к глубинной биосфере Земли. По некоторым оценкам обитатели глубинной биосферы составляют 90% биомассы всего мира прокариот и архей на планете и 15 % массы от всей биосферы (Y.Bar-On et al., 2018). В глубинной биосфере обитают бактерии, археи, эукариоты, а также, постоянно сопровождающие их, вирусы (Colwell et al. 2013). Изучение геномов подземных обитателей показало их генетическое разнообразие, такое же, как и микроорганизмов на поверхности (Collins, Pratt, et al. 2018).

Микроорганизмы в горных породах могут существовать, как в глубинных холодных минерализованных водах при температурах 10-12°C (Лебедева и др. 2018), так и в термальных водах при температурах от 40° до 120°C (Verena B. Neuer et al. 2020). Самая высокая температура, при которой организмы культивировались в лаборатории, составила 122°C, под давлением 20 МПа и 40 МПа (Orcutt, et al., 2011).

Подземные организмы получают энергию преимущественно в процессах окислительно-восстановительных реакций. Так, в горных породах в Испании на глубинах более 600 метров обнаружены следы цианобактерий родов *Calothrix*, *Chroococcidiopsis* и *Microcoleus*, которые используют хемолитоавтотрофный тип питания вместо фотосинтеза, и получают энергию за счет окислительно-восстановительных реакций. Цианобактерии из скважины оказались практически идентичны обитающим на поверхности Земли, но в них отсутствовали активные пигменты фотосинтеза. В метагеномных исследованиях обнаружены свидетельства метаболических путей потребления водорода, который цианобактерии используют в качестве донора электронов и, потенциально, железо, марганец, оксид азота и др. в качестве акцепторов электронов. Цианобактерии были также найдены в водоносном слое. Авторы допускают, что они попали туда вместе с водой с поверхности и смогли выжить (Fernando Puente-Sánchez et al., 2018).

В современной подземной биосфере так же были обнаружены вирусные частицы. Метагеномный анализ проб воды, извлечённой из скважины водоносного горизонта с глубины 2 км в Томской области, показал наличие трех кольцевых ДНК, которые принадлежат вирусам-бактериофагам порядка *Caudovirales* (Kadnikov, et al., 2019).

В современной подземной биосфере обитают не только простейшие микроорганизмы, но и животные. В пробах трещинных вод из скважин нижних уровней шахты золотого рудника Беатрикс в Южной Африке в интервалах глубин от 0.9 до 3.6 км обнаружены не только микроорганизмы, но и несколько видов крошечных нематод (дьявольские черви) длиной около 0.5 мм. Они живут в анаэробных условиях при температурах до 46°C, питаются бактериями, и размножаются партеногенетически. Эти нематоды являются коренными жителями глубин, так как не встречаются в поверхностных горных водах (Borgonie et al., 2011).

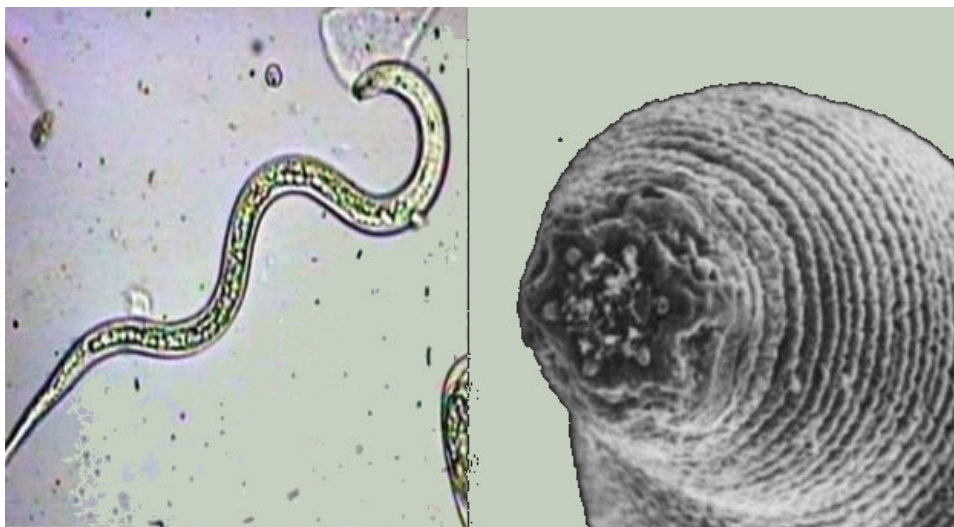


Рис. 1. Подземные нематоды *Halicephalobus mephisto* – «дьявольские черви» (Borgonie et al., 2011).

В горных породах Австралии на глубине 60 м обитает десятисантиметровая многоножка, которая использует свои 1306 ножек для маневрирования под землей.



Рис. 2. ОднаТысячаТристаНожка с глубины 60 м. Австралия  
<https://www.nationalgeographic.com/animals/article/first-true-millipede-discovered-with-thousand-legs>

Подземные животные в глубинной биосфере, скорее всего, являются потомками интродуцентов, которые мигрировали вниз по обводненным разломам и трещинам, адаптировались к высоким температурам и давлениям, и стали питаться аборигенными бактериями.

Таким образом, генетическое разнообразие подземных организмов, а также возможность проникновения наземных организмов на значительные глубины, указывает на наличие тесной связи между глубинной и поверхностной частями биосферы. Такая связь может осуществляться посредством поступления континентального органического вещества в мировой океан не только со стоком поверхностных и грунтовых, но и глубинных вод.

Механизм проникновения поверхностных вод в глубину может быть связан с постоянным движением, и оттоком трещинных и приразломных вод в моря и мировой океан. Подземные воды, содержащие микроорганизмы, скорее всего, выходят наружу на склонах пассивных и активных окраин континентов, и могут обогащать биогенным органическим веществом зоны апвеллинга и глубинные океанические течения. Таким образом, может осуществляться глобальный круговорот живого вещества между поверхностными, глубинными и океаническими водами.

Подземные микроорганизмы обитают, скорее всего, в межзерновом пространстве, трещинах или полостях внутри горных пород. Для метаболизма клеток и возможности объемного роста необходим постоянный обмен веществом и энергией с окружающей средой и стабильное поступление растворенных в воде питательных веществ: окислов углерода, азота, серы и, главное, фосфатов для синтеза органических молекул РНК, ДНК и АТФ. Кроме того, подземные микроорганизмы могут существовать только в составе сообществ, которые создают пищевые или трофические цепи от автотрофов, продуцентов к гетеротрофам, консументам.

Постоянное движение растворов в межзерновом пространстве, а также в трещинах и в полостях горных пород может быть вызвано гравитационными силами – ежедневными земными приливами (с периодами около 12 часов), вызванными силами притяжения Луны и Солнца. Наибольшее вертикальное смещение твердой поверхности происходит, когда Земля, Луна и Солнце находятся в пространстве приблизительно на одной линии (новолуние и полнолуние). Полусуточная амплитуда современных земных приливов на экваторе может достигать 55 см (Приливы твердой Земли, 2015). Периодическое воздымание и опускание земной тверди должно приводить к изменению плотности и, соответственно, пористости горных пород, которое сопровождается изменением давления в межзерновом пространстве. При этом, подземные, в том числе гидротермальные воды, получают возможность постоянного пульсирующего приливного движения, обеспечивая «глубинное дыхание Земли», с амплитудой «вдоха и выдоха» в двенадцать часов. Таким образом, ежедневные земные приливы могут прокачивать межпоровые и трещинные воды сквозь толщи горных пород подобно насосу, и проявляться в суточном дебете артезианских скважин.

#### **Условия существования и фоссилизации древних подземных организмов**

Несомненно, что глубинная подземная биосфера существовала на планете и в древние геологические периоды, возможно, с самого начала зарождения жизни на Земле. Обитатели глубинной биосферы могли быть представлены археями, прокариотами, эукариотами и вирусами. Однако микрофоссилии организмов, обитавших в глубинных горных породах, пока не обнаружены. Основные условия жизни глубинных обитателей современной биосферы и подземной палеобиосферы, скорее всего, были сходными. Древние подземные микроорганизмы, могли жить в межзерновом пространстве. Однако после смерти бактерии испытывали постмортальные преобразования, и протоплазма клеток сжималась (коллапсировала) или растворялась (лизинг). Поэтому обнаружить микрофоссилии микроорганизмов, ранее живших в межзерновых порах горных пород, которые впоследствии заполнились твердым веществом, в настоящее время технически довольно сложно.

Вместе с тем, древние трещины или полости внутри горных пород могли обеспечивать возможность объемного роста не только для одиночных бактерий, но и для значительных сообществ микроорганизмов, в том числе и колониальных. Со временем эти полости так же заполнились твердым веществом, например, минеральными образованиями кремнезема.

Жизнь в подземных полостях была не только возможна, но и неизбежна. Наиболее благоприятные условия для древней подземной жизни могли существовать в агатовых камерах, до заполнения их кремнистым веществом, в котором могли сохраниться и псевдоморфозы окремненных организмов.

Агатами называют ритмично-полосчатые поликристаллические агрегаты, сложенные в основном минералами семейства кремнезема (халцедоном, кварцином, кварцем, опалом) с зонами и включениями других низкотемпературных минералов (карбонатов, цеолитов, оксидов и гидроксидов железа и т. д.). К ним также относят полупрозрачные и окрашенные разновидности халцедона, содержащие моховидные, игольчатые и другие включения



характерной формы, получившие названия моховых, дендритных агатов (Годовиков и др., 1987). Агаты широко распространены среди магматических пород, излившихся на поверхность материков или под водой – базальтов, андезитов, риолитов, а также в осадочных породах и корках выветривания. Халцедоновый агат заполняет швы и газовые пустоты в магматических породах и замещает минералы в осадочных породах. При этом, «халцедон образуется из жидкостей, состоящих частично или главным образом из «метеорной воды» (Heaney, 1993). Следует отметить, что агатовые жеоды в магматических породах формировались в «зоне жизни» – подземных областях доступных для проникновения поверхностных вод и существования организмов глубинной биосферы.

Температуры кристаллизации халцедона в агатовых жеодах оценивались по включениям в других минералах и находятся в широком диапазоне температур от 30-40<sup>0</sup>С до 420<sup>0</sup>С (Годовиков и др., 1987). Существуют и экспериментальные данные по синтезу непосредственно агатового халцедона, которые предполагают температуры его образования выше 375<sup>0</sup>С. Однако, экспериментальный синтез халцедона, как правило, выполнялся при повышенных температурах для того, чтобы сократить длительность процесса. Поэтому, эксперименты не исключают возможности образования халцедона в более холодных 39-85<sup>0</sup>С градусов обстановках из жидкостей, состоящих частично или главным образом из "метеорной воды" (Heaney, 1993). Следует подчеркнуть, что температуры до 100<sup>0</sup>С, существовавшие в некоторых агатовых полостях, были вполне благоприятны для жизни подземных организмов (Verena et al. 2020).

Есть несколько гипотез происхождения агатовых жеод, и тонкой полосчатости халцедоновых слоёв в них. Однако, в настоящее время, наибольшим признанием пользуется механизм образования ритмично-полосчатых агатов, при котором из растворов, циркулировавших по ранее образованным полостям и каналам (газовым пузырям в эффузивных породах или пустотам выщелачивания в осадочных породах), последовательно отлагались слои халцедона, кварца, опала и других минералов (Годовиков и др., 1987). Однако, до сих пор не ясны главные причины ритмичности поступления минералообразующих силикатных растворов в агатовые полости в разных горных породах, в разных месторождениях Земли, и в разные геологические периоды.

Наиболее распространены ритмично-слоистые агаты сложенные чередующимися слоями халцедона (макроритмами), которые часто обладают изменчивостью окраски (Рис.3).

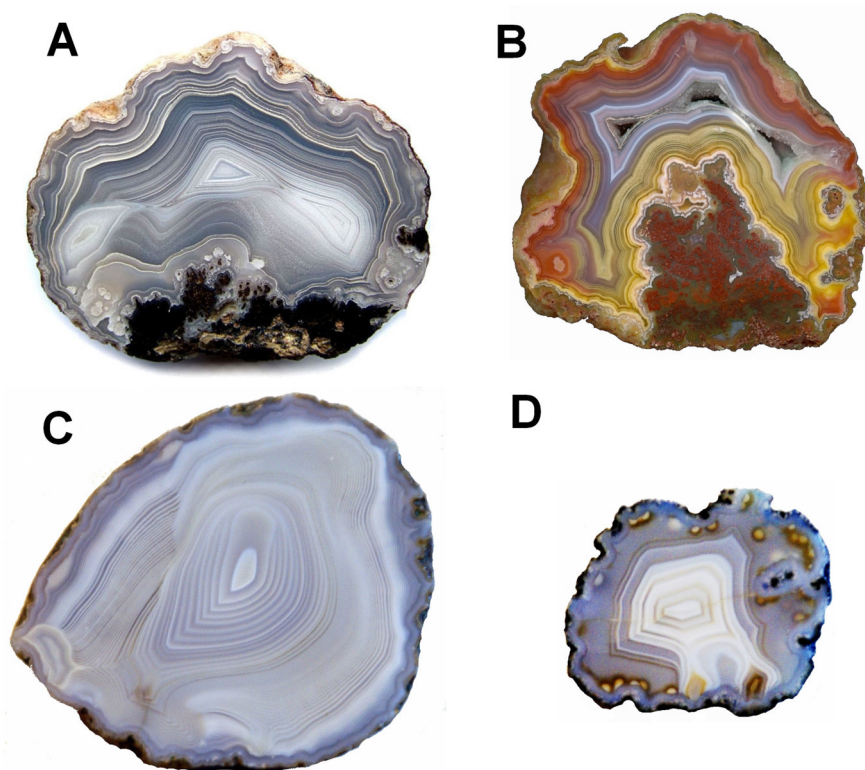


Рис. 3. Зональные агаты различных месторождений. А. Монголия; В. Мехико; Агаты Северного Тимана: С. Обр. Т-1. (7 см); D. Обр. Т-2. (4 см). По краям коричневые сферические глобулы. Из коллекции А.М. Беляева.

Изменчивость окраски объясняется примесями, захваченными при росте слоев халцедона, или диффузионным проникновением через его поры поздних растворов, отлагавших в них пигментирующие минералы (Агаты и агатовые жеоды. mindraw.web.ru.). Однако, видимая ритмичная изменчивость цвета халцедона в макроритмах, может быть также вызвана неоднородностью химизма минералообразующих кремнеземсодержащих растворов, связанных с сезонными колебаниями состава поверхностных метеорных вод.

В ритмично-зональных агатах, сформировавшихся 400 миллионов лет тому назад в газовых пустотах базальтов Северного Тимана (Годовиков и др., 1987) макроритмы имеют толщину 1–2 мм и постепенную изменчивость окраски в пределах ритма (Рис. 4.А).

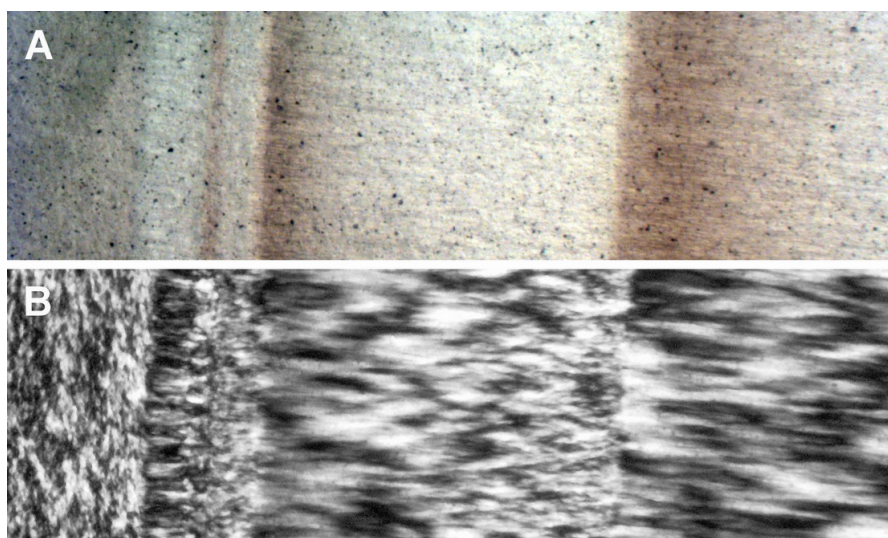


Рис. 4. Макроритмы в ритмично-зональном агате Северного Тимана (образец Т-2 на Рис. 3.С). А. Макроритмы с изменчивостью окраски. Без анализатора. В. Тот же объект, что и на Рис. А. Агрегаты микролитов халцедона слагают макроритмы перпендикулярно слоистости. Прозрачно-полированный шлиф. С анализатором. Ширина поля 4 мм.

В прозрачно полированных шлифах (образец Т-2, с анализатором) видно, что макроритмы сложены агрегатами микролитов халцедона с характерным отрицательным удлинением, которые ориентированы перпендикулярно к границам слоя, и имеют радиально-волнистое угасание (Рис. 4. В). Границы между отдельными макроритмами отчетливые.

Кроме, видимых невооруженным глазом макроритмов, в них обнаруживаются тончайшие микроритмы, которые проявляются в определенных срезах и углах наклона слоев. Их число от нескольких десятков до нескольких сотен (до тысячи) на 1 мм. «Этот факт вызывает большие трудности при объяснении пульсационного заполнения полостей, так как «невозможно найти механизм, при котором растворы поступали бы с подобной частотой в замкнутые (!) полости» (Годовиков и др., 1987). Однако, такие микроритмы могли быть сформированы из движущихся кремнийсодержащих растворов в результате пульсационного изменения давления, во время каменных приливов. Так, резкое падение давления в полостях и трещинах во время каменного прилива могло сопровождаться отложением халцедона из минеральных растворов. Во время каменного отлива и повышения давления происходило частичное растворение ранних отложений. Но из-за тепловых потерь не было полного растворения, ранее отложенного вещества, и происходило ритмичное нарастание тончайших слоев.

Если микроритмичность в полосчатых агатах, сформировалась в результате отложения кремнистого вещества, во время полусуточных каменных приливов, то микроритмы, образовавшиеся в периоды новолуний и полнолуний могут быть толще, чем в промежутке между ними. Так, в образце агата Т-2 внутри макроритмов толщиной в 1 мм содержится более 30 микроритмов (Рис. 5.А,В,С). При этом волокнистые микролиты халцедона в макроритмах ориентированы поперек первичной слоистости и росли от границ слоев. Возможно, микролиты халцедона образовались после формирования полосчатости в процессе раскристаллизации (девитрификации) первично-осадочного кремнистого вещества. Кустистые агрегаты микролитов волокнистого халцедона имеют радиально-волнистое угасание характерное для кварцев динамометаморфических пород, сформировавшихся в условиях стресса. Т.е. из-за литостатического давления пород внутри уже структурно сформировавшихся и затвердевших агатовых жезд могли возникать поля разнонаправленных динамических напряжений, и происходила раскристаллизация кремнистого вещества, начиная от границ слоев и секториальных радиальных трещин. При этом, кустистые агрегаты микролитов волокнистого халцедона формировались поперек слоистости (Рис.5.С).

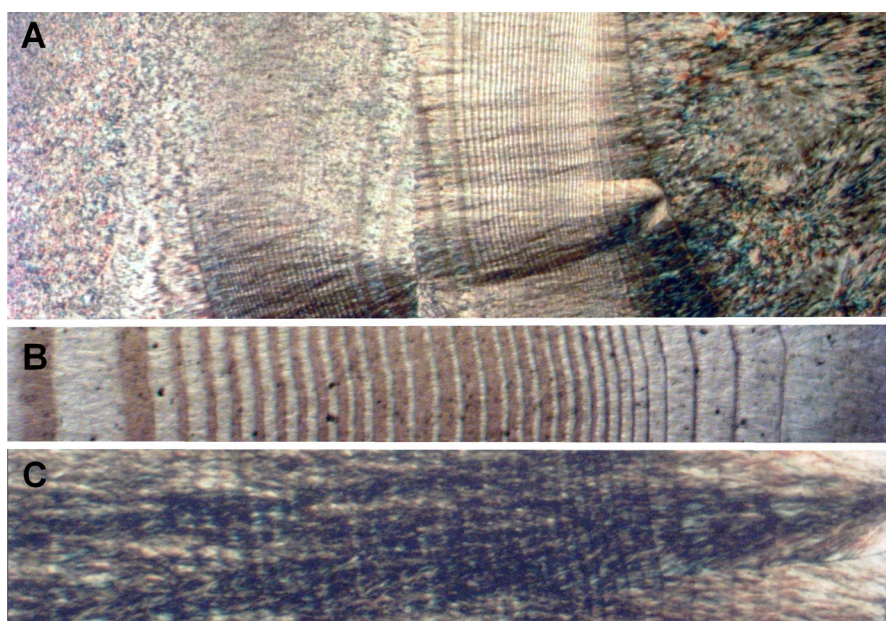


Рис. 5. Фото прозрачно-полированного шлифа от образца Т-2, показанного на Рис. 3.С. А. Слои халцедона около 1 мм толщиной (макроритмы) сложены микролитами кварца, разными для каждого слоя, и ориентированными поперек первичной слоистости. Они содержат по 32 прослоя (микроритма), мощность которых уменьшается от краев к центральной части. С анализатором. Ширина поля 4 мм. Б. Микролиты кварца в макроритмах. Деталь Рис. 1.А. Без анализатора. Ширина поля 1 мм. С. Кустистые агрегаты микролитов волокнистого кварца с радиально-волнистым угасанием, ориентированные поперек слоистости. То же, что на Деталь Рис. Б. С анализатором. Ширина поля 1 мм.

Поскольку каменные приливы должны были иметь место на всех континентах и в разные геологические эпохи, то микроритмы халцедона могут проявляться во всех ритмично-слоистых агатовых структурах. Но их толщина в разных жездах могла зависеть от величины прилива, давления и насыщенности кремнийсодержащих растворов в агатовой камере. На фото (Рис.6) показано ритмичное строение зон макроритмов, в агатах Туркменистана. В пределах каждой зоны промежутки между микроритмами закономерно уменьшаются (Барсанов, Яковлева, 1984).



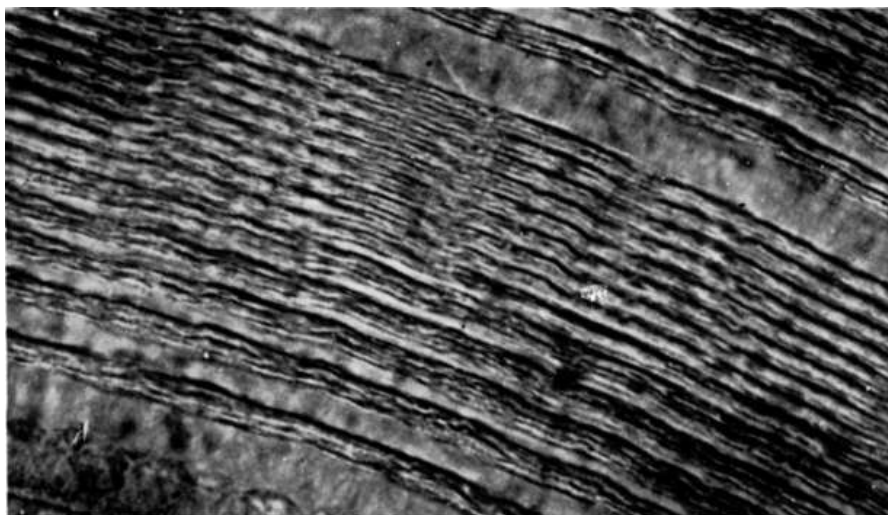


Рис. 6. Закономерное уменьшение промежутков между микроритмами в пределах макроритмов. Увеличение 500, без анализатора. Кафигшем, Туркменистан, (Барсанов, Яковлева, 1984).

Кроме агатов с ритмично-полосчатыми структурами существуют разновидности, сложенные сплошным халцедоном без видимой зональности, а также жеоды, содержащие по краям агрегаты пузырчатых структур и ветвистые образования, рисунки которых напоминают кусты, или таломы мхов. Такие агаты называют моховыми, или дендритными. Ветвистые образования в них сложены гидроокислами железа – гётитом, что, как правило, оценивается по желтовато-бурому цвету выделений (Рис. 7. Условия образования агатов. <https://juwelir.info/>).

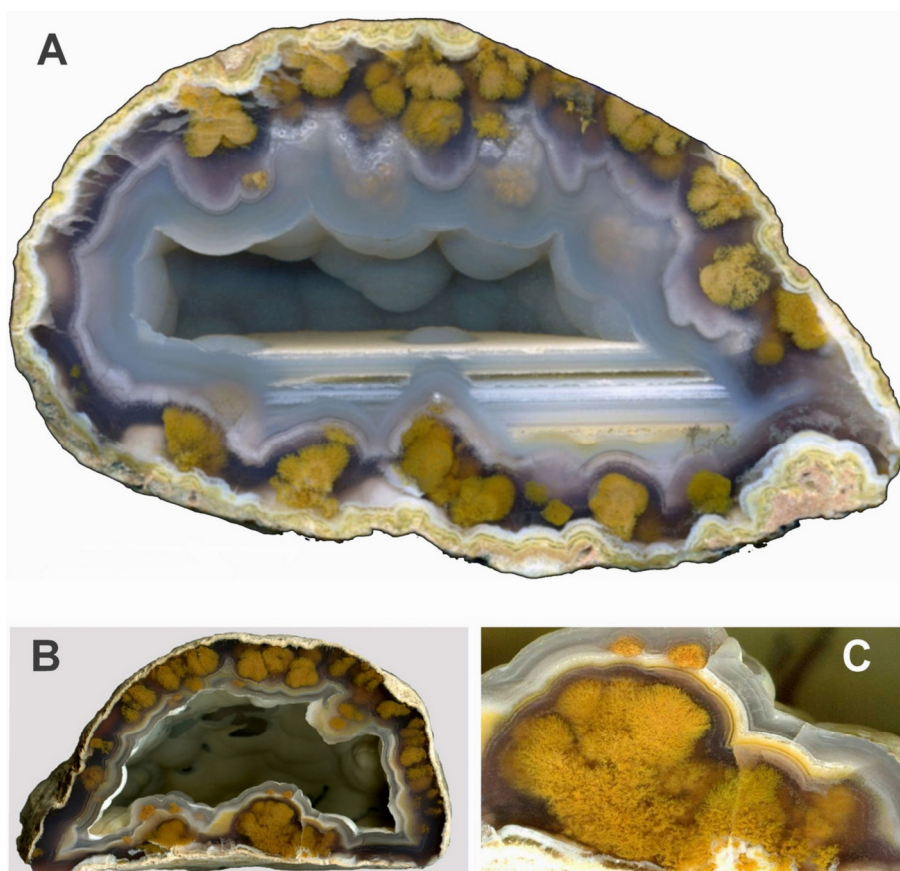


Рис. 7. Агатовые жеоды с ветвистыми включениями дендритов гётита. Бразилия. (Слётов, 2006). Фото А – 11 см, В – 9 см, С – деталь фото В. Ширина поля 3см.



Агаты с древовидными ветвящимися образованиями называли моховыми естествоиспытатели в XVIII веке, так как считали, что эти структуры представляют собой минерализованные включения мхов. Однако палеонтологи и биологи не заинтересовались изучением природы ветвистых агрегатов. Вероятно, это было связано с представлениями о высоких температурах образования агатов в глубинах земли, и невозможностью существования там живых организмов.

Минералогии не поддерживали, и до сих пор отрицают изначально биологическую природу ветвистых структур в агатах (Годовиков и др., 1987; Условия образования агатов, <https://juwelir.info/>), основываясь на исследованиях, проведенных в XVIII М. Коллини. Он установил, что включения в моховиках сложены железистым веществом, часть которого после дробления моховика притягивалась магнитом (Collini, 1776). «Тем не менее, представления об органическом происхождении включений в моховиках высказывались многими учеными и встречались на страницах учебников вплоть до середины XIX века. Только после того, как вышла работа Ф. Гергенса (Gergens, 1858), показавшего большое морфологическое сходство включений в моховиках с так называемыми «химическими садами» («силикатными растениями»), образующимися в результате реакций различных солей с разбавленными растворами растворимого стекла, с представлениями об органической природе включений в моховиках было окончательно покончено. В результате все моховики стали считать минеральными образованиями в студне кремнезема» (Годовиков и др., 1987). Довольно категоричное заявление, основанное на представлениях исследователей XVIII-XIX веков.

Физико-химические условия процессов образования моховых агатов изучали в основном в экспериментах. Опыты проводили с желеобразными веществами или гелями кремнезема и, наблюдая осмотические явления, получали мембранные трубки, похожие на образования в моховых агатах. Но искусственные твердые моховые агаты в экспериментах так и не были получены (Условия образования агатов, <https://juwelir.info/>). Следует отметить, что осмотические явления и проницаемые мембраны проявляются не только в физико-химических процессах, но и составляют основу существования клеток живых организмов. В настоящий момент нет ни одного минералогического или физико-химического критерия или эксперимента, который свидетельствовал бы о невозможности изначально биогенной природы происхождения ветвистых образований в агатах.

Анализ структур моховых агатов позволяет предположить участие биогенного вещества в их происхождения. Так, в центре жеод моховых агатов из Бразилии (Рис.7.А) видны горизонтальные отложения халцедона и опала, позволяющие определить положение жеоды в пространстве. Ветвистые структуры росли от периферии к центру по всему периметру агатовой полости. При этом они обрамляются слоистыми почковидными образованиями, нижняя граница которых расположена от ветвистых структур на некотором расстоянии. Это указывает на то, что рост ветвистых структур проходил в слое жидкого вещества, которое синхронно с ними увеличивалась в объеме. Границы этого слоя смещались от ветвистых структур по мере их роста в жидкой среде и не наблюдаются в промежутках между «кустиками». На фото Рис. 7.А видно, что жидкий слой в верхней части жеоды был значительно толще, по сравнению с нижней, и как бы свисает с верхнего края, под действием силы тяжести. Такое провисание слоистого вещества возможно, если оно еще не стало твердым халцедоном. Возможно, что провис жидкого слоя с ветвистыми структурами в верхней части жеоды приводил к некоторому снижению давления в нем, и к дополнительному поступлению вещества. При этом остальное пространство полости должно было быть полностью заполнено менее плотным раствором, из которого во все стороны поступало вещество для роста ветвистых структур, и, окружающего их, жидкого слоя. Это означает постоянное дополнительное поступление питающего раствора в агатовую камеру. После окончания поступления питающего раствора для слоя с ветвистыми структурами в полости жеоды отлагались горизонтальные слои халцедона (Рис. 7.А), и в агатовой жеоде образовалась внутренняя полость (Рис. 7.А и В). Таким образом, так называемые сферолитовые корки на стенках жеод моховых агатов формировались не в результате последовательного отложения халцедона, а представляли собой жидкую субстанцию, в которой росли ветвистые структуры. Жидкий слой превратился в

халцедон позднее, при формировании ритмично-слоистых структур из кремнийсодержащих растворов.

В некоторых агатовых жеодах ветвистые структуры росли от периферии к центру, и, обрамлялись слоистыми почковидными образованиями по внешнему контуру, тогда как остальной объем жеоды полностью заполнен прозрачным халцедоном со слабо выраженной зональностью (Рис. 8.А). Иногда, ветвистые структуры растут от центра к краям, заполняя весь объем агатовой жеоды (Рис. 8.В).



Рис. 8. Моховые агаты.

А. Зейское месторождение, Забайкалье. 9 см.; В. Монголия. 5 см.

Желтовато-бурые ветвистые включения (Рис. 7 и 8) традиционно рассматривают как дендриты гётита. Однако, известно, что дендриты оксидов железа могут формироваться не только в процессах кристаллизации из пересыщенных растворов, но и в результате жизнедеятельности живых организмов, например в осадочных горных породах, и в почвах. Там они образуются не за счет достижения концентраций насыщения железа в растворах, а за счет достижения концентрации его насыщения в бактериальных пленках. При этом, хемотробики могут получать энергию за счет окисления ионов железа, извлекаемых ими из растворов (Розанов и др. 2011). Поэтому, ветвистые структуры в агатовых камерах могли быть сформированы в результате биогенных процессов, и представлять собой остатки жизнедеятельности глубинных колониальных организмов, впоследствии замещенных кремнистым веществом.

Стенки внутренних полостей в агатовых жеодах часто бывают сложены полусферическими поверхностями –сферолитовыми корками халцедона, внутри которых присутствуют ветвистые, или пузырчатые структуры. Так, в базальных слоях жеод зональных и моховых агатов видны слоистые почковидные образования халцедона, обрамляющие ветвистые, или пузырчатые структуры (Рис. 3,7). Такие структуры на стенках агатовых камер имеют явные признаки одновременного образования и роста совместно с включающим их слоем. При этом часто наблюдаются несколько чередующихся слоев, подобных бактериальным.

В ритмично-зональных агатах Северного Тиммана (образцы Т-1 и Т-2), на стенках агатовых камеры присутствуют агрегаты пузырчатых структур, которые окаймляются слоистыми почковидными образованиями (Рис. 9.А,В). Так же как и в случае моховых агатов с ветвистыми структурами, пузырчатые структуры имеют признаки одновременного образования и роста совместно с включающим их слоем. Это указывает на то, что рост пузырчатых структур проходил в слое жидкого вещества, которое синхронно с ними увеличивалась в объеме.

К почковидным образованиям примыкают, или находятся в непосредственной близости, сферические глобулы размером 1–1.2 мм. В центральных частях сфер видны отчетливые коричневые точки, похожие на ядра эукариотов. Глобулы окружены коричневатыми ореолами (Рис. 9.А). Иногда, они образуют тесно сближенные пары, также окруженные общей оболочкой (Рис. 9.В). Возможно, ореолы представляют собой окремненные слизистые оболочки микроорганизмов.

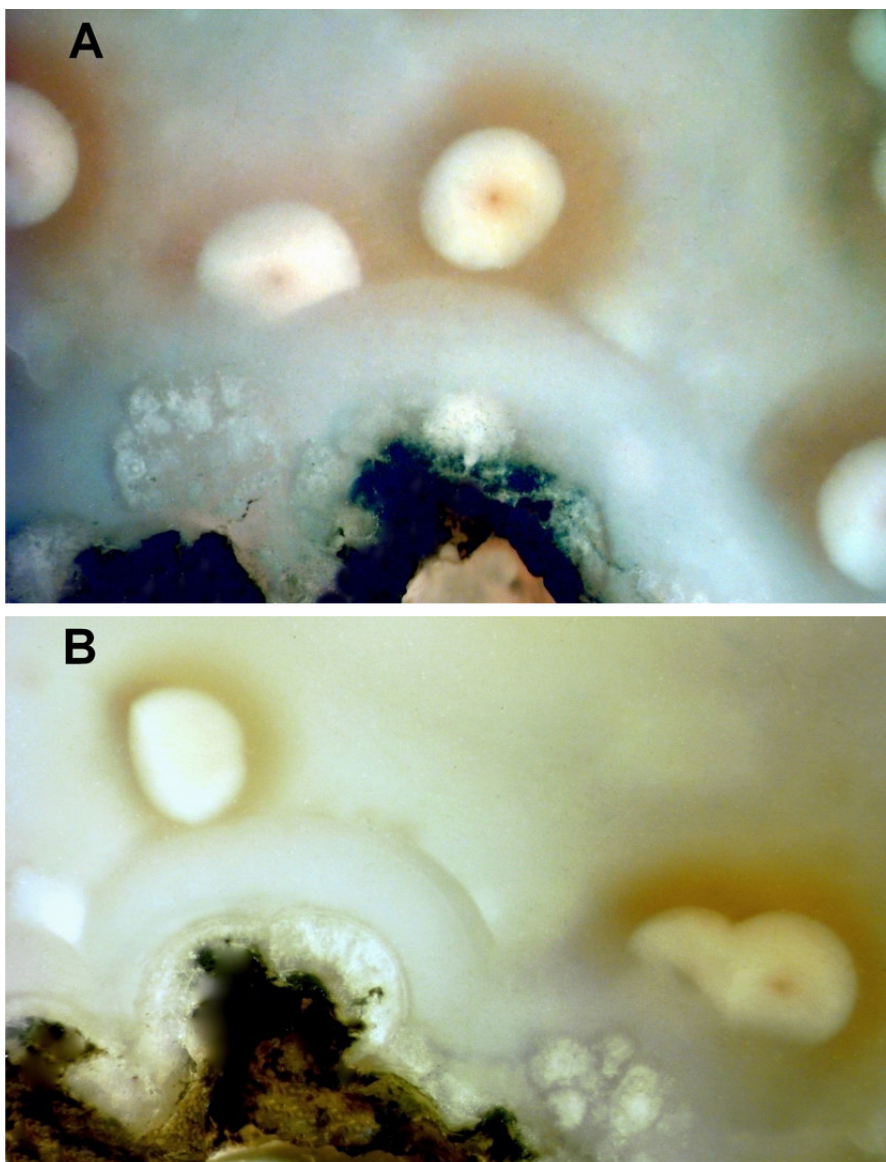


Рис. 9. Так могли выглядеть глубинные обитатели газовых пустот в базальтах Северного Тимана 400 миллионов лет тому назад. Пузырчатые структуры на стенках агатовой камеры, окаймленные слоистыми почковидными образованиями, к которым примыкают сферические глобулы, с отчетливо выраженными точечными центрами и окруженные коричневатыми ореолами. Полированный образец. Агат Т-1 из коллекции А.М. Беляева. Ширина поля 6 мм.

Изучение пузырчатых и почковидных образований в прозрачно полированных шлифах с анализатором (образец Т-1) показало, что они сложены радиально-лучистыми агрегатами микролитов халцедона, с характерным для халцедона отрицательным удлинением. Пузырчатые структуры выражены агрегатами с микросферолитовыми структурами 200-300 мкм в поперечнике (в нижней части Рис. 10). В окружающих почковидных образованиях 2-4 мм в поперечнике микролиты ориентированы перпендикулярно к границам и имеют волнистое угасание (Рис. 10). Это может быть связано с тем, что рост микролитов халцедона начинался от границ слоев внутри уже структурно оформившихся твердых сферических образований. При этом, радиально-лучистая сферолитовая структура сформировалась из-за внешнего литостатического давления и возникновения в пределах жеоды полей радиальных динамических напряжений (Рис. 10).

Сферические глобулы, примыкающие к почковидным образованиям, и окруженные коричневатыми ореолами, также сложены радиально-лучистым агрегатом микролитов волокнистого халцедона с волнистым угасанием. Однако, в отличие от почковидных



образований, микролиты халцедона пересекают правильную сферическую границу глобул, и продолжают до границ ореолов, окружавших глобулы (Рис. 10).

Таким образом, микролиты халцедона в сферолитовых структурах формировались не путем непосредственного отложения из кремнийсодержащих растворов, а появились в процессе раскристаллизации (девитрификации) кремнистого вещества в полях радиальных напряжений уже затвердевших структур.

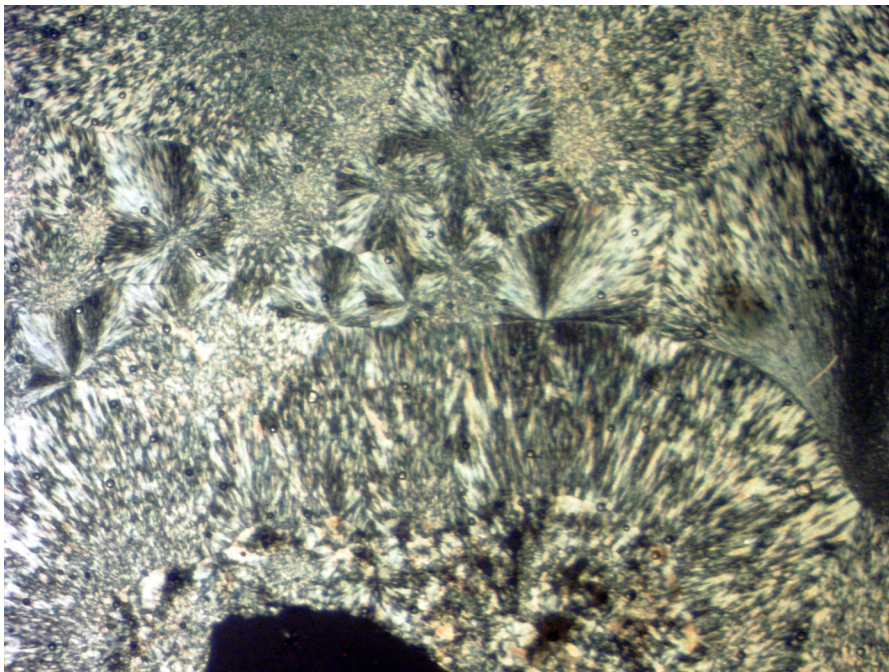


Рис. 10. Почковидные образования на стенке агатовой камеры и сферические глобулы в поляризованном свете. Образец Т-1, прозрачно-полированный шлиф, с анализатором. Внизу почковидное образование сложенное радиально-лучистым агрегатом микролитов халцедона, с волнистым угасанием, растущего перпендикулярно границам структуры. В верхней части фото сферические глобулы с характерным сферолитовым угасанием микролитов волокнистого халцедона. Из коллекции А.М. Беляева. Ширина поля 6 мм.

Древние подземные организмы могли участвовать в процессах разрушения горных пород на стенках агатовых полостей, подобно тому, как наземные бактерии разрушают горные породы, и формируют почвенный слой. При этом на разрыхленных стенках агатовых полостей, к тому же обогащенных биогенным органическим материалом, могли формироваться слоистые образования, подобные бактериальным матам, сложенные продуцентами и консументами.

Таким образом, формирование агатовых структур представляется следующим образом: на стенках камер, предварительно разрушенных бактериями и обогащенных органическим веществом, происходило последовательное нарастание нескольких жидких слоев, ограниченных проницаемыми мембранами, и содержащих ветвистые и/или пузырчатые структуры. К ним примыкали окруженные ореолами сферические глобулы. Под воздействием кремнийсодержащих растворов происходило окремнение биологических структур и ритмичное отложение слоев осадочного кремнистого вещества. Позднее, под воздействием литостатического давления, в уже затвердевших структурах агатовых жеод, возникали поля разнонаправленных динамических напряжений, приводивших к раскристаллизации (девитрификации) кремнистого вещества и формированию микролитов халцедона.

Процессы замещения халцедоном останков древних животных, деревьев, и минералов чрезвычайно широко распространены в земной коре. Постоянное движение межпорых

кремнийсодержащих растворов, вызванное ежесуточными земными приливами, сопровождалось растворением биогенного органического вещества и одновременным отложением халцедона. Возможно, что концентрация насыщения кремнекислоты достигалась при проникновении их внутрь клеток мертвой органики. Поэтому, в окаменевших деревьях видна структура годовых колец, а в ископаемом зубе гигантской акулы Мегалодона, возрастом около 2 миллионов лет, сохранилась даже окремненная зубная эмаль (Рис. 11).

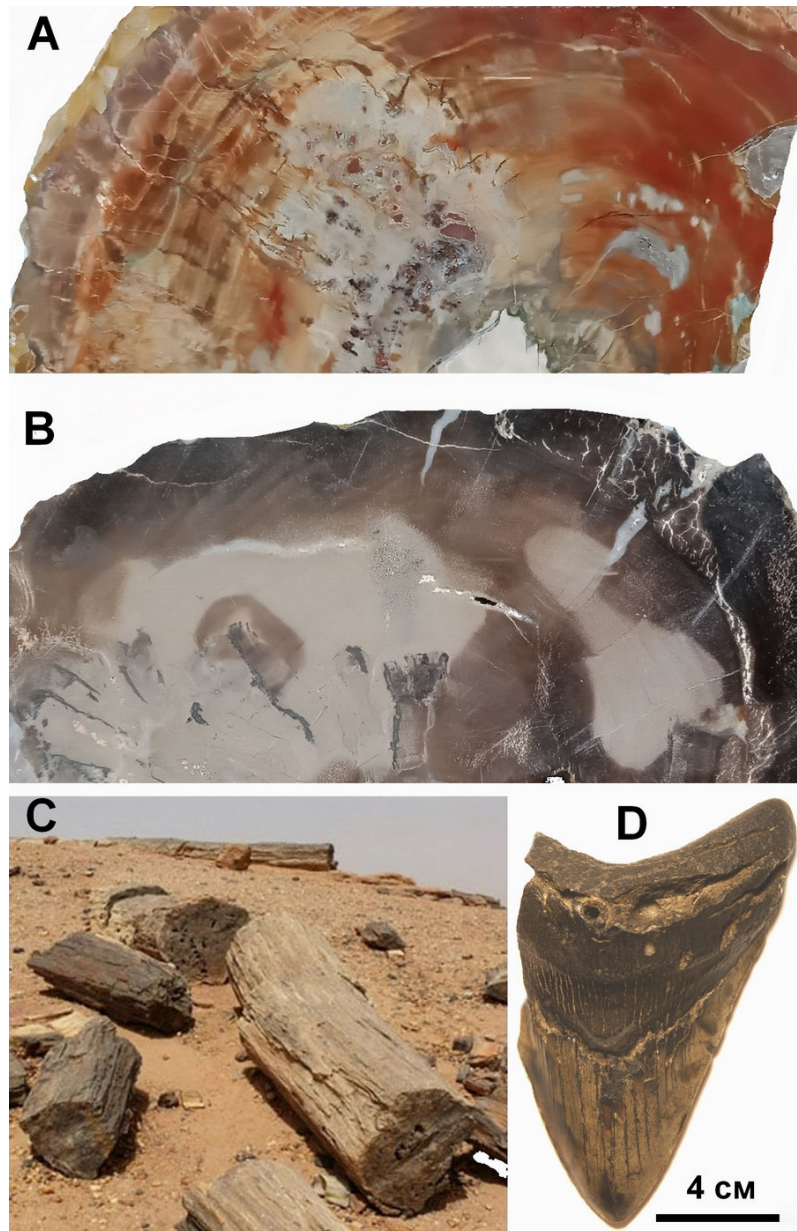


Рис. 11. Окремнённые остатки древних деревьев и животных. Поперечные срезы стволов деревьев (из коллекции С.В. Кобылкова): А – Забайкалье, ширина поля 20 см; В – Бразилия, ширина поля 20 см; С – стволы окаменевших[ деревьев в пустыне Судана; D – окремнённый зуб гигантской акулы Мегалодона (из коллекции А.М. Беляева).

Окремнению подвергаются не только останки древних животных и растений, но и живые микроорганизмы. Насыщенные растворы кремния достаточно легко и быстро проникают сквозь клеточные мембраны, и замещают кремнистым веществом цитоплазму и другие клеточные органеллы практически при жизни микроорганизмов. Так в термальных источниках кальдеры Узон, на Камчатке окремнению подвергаются живущие в них термофильные

цианобактерии (Розанов и др., 2002; Жегалло и др., 2007). При этом хорошо сохраняется внешняя и внутренняя морфология окремненных клеток (Рис. 8).

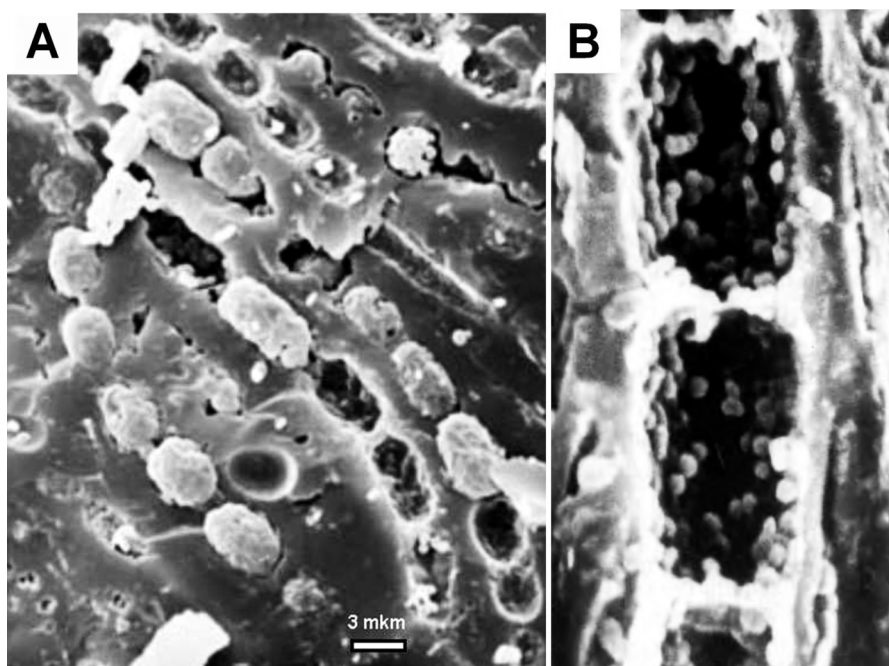


Рис. 12. Окремнение термофильных цианобактерий кремнеземсодержащими растворами в термальных источниках кальдеры Узон, Кроноцкий заповедник, Камчатка, фото электронного микроскопа (Розанов, Ушатинская, 2011; Жегалло и др., 2007). А – Слои кремнезема с запечатанными внутри окремненными трихомами клеток цианобактерий. В – выпадения сферических глобул опала на стенках и перегородках клеток цианобактерий.

Возможно, что при окремнении цианобактерий из термальных источников кальдеры Узон (Рис. 8.В), центрами для коагуляции кремнезема и образования глобул, служили вирусы, находившиеся внутри и снаружи клеток цианобактерий (Беляев, Юхалин, 2022; Belyaev, Yukhalin, 2022).

Вместе с древними микроорганизмами в подземной биосфере должны были сосуществовать вирусы, которые представляют собой самую многочисленную биологическую форму на Земле. Они, влияли на ход эволюции биосферы, являлись важным естественным средством переноса генов между различными видами, и способствовали их эволюции и генетическому разнообразию (Sanchaya et al., 2003). Однако, несмотря на очевидное многообразие и многочисленность вирусов в прошлом, их окаменевшие останки до сих пор не были обнаружены в горных породах. Вместе с тем, имеются данные об экспериментальном окремнении вирусов. Эти исследования предполагают, что окремненные микрофоссилии вирусов могут быть обнаружены в горных породах (Laidler, et al., 2010). Ранее сообщалось, что несколько разновидностей вирусоподобных микрофоссилий, близких по морфологии к современным гигантским вирусам семейства *Mimiviridae* были обнаружены в микрокварцитах в составе вулканогенно-осадочных толщ с возрастом 1640 миллионов лет на острове Гогланд в Финском заливе (Беляев, Юхалин, 2021; Belyaev, Yukhalin, 2021).

Таким образом, среди организмов древней глубинной биосферы, в том числе, обитавших в полостях агатовых камер, до заполнения их кремнистым веществом, могли, и должны были, присутствовать вирусы, как обязательный компонент жизни на Земле.

## Выводы.

Анализ изученности современной глубинной биосферы Земли позволяет предположить, что ее вещество участвует в глобальном биологическом круговороте. Глубинные воды,



содержащие подземные микроорганизмы, могут выходить наружу в артезианских источниках, и на континентальных склонах, обогащая органическим веществом зоны апвеллинга и океанические течения. При этом, минерализованные подземные воды имеют возможность постоянного движения, за счет ритмичного изменения внутрипородного давления при ежесуточных земных приливах и отливах.

Наиболее благоприятные условия для обитания колониальных микроорганизмов древней глубинной биосферы существовали внутри горных пород в полостях агатовых камер, до заполнения их кремнистым веществом. Подземные организмы образовывали на стенках агатовых полостей слоистые, пузырчатые, ветвистые и почковидные структуры, подобные бактериальным матам, впоследствии замещенные кремнистым веществом. Зональные микро- и макроритмы в полосчатых агатах формировались в результате отложения осадочного кремнистого вещества из проточных кремнийсодержащих растворов при пульсационном изменении давления во время каменных приливов. Позднее, под воздействием литостатического давления, в уже затвердевших структурах агатовых жеод, возникали поля разнонаправленных динамических напряжений, приводивших к раскристаллизации (девитрификации) кремнистого вещества и формированию микролитов халцедона.

Морфологическое многообразие ветвистых, пузырчатых и почковидных структур в агатах может свидетельствовать о биоразнообразии древних глубинных организмов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам СПбГУ Кобылкому С. В. и Смирновой Т.П. за техническую помощь в исследовании.

#### Литература

1. Агаты и агатовые жеоды. mindraw.web.ru.
2. Барсанов Г. П., Яковлева М. Е. Минералогия поделочных и полудрагоценных разновидностей тонкозернистого кремнезема. М., Наука, 1984, 140 с.
3. Беляев А.М. Юхалин П.В. О происхождении и эволюции вирусов по результатам исследований вирусоподобных микрофоссилий в кремнистых породах Палеопротерозоя, остров Гогланд, Финский залив, 2021, PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112242>.
2. Беляев А. М., Юхалин П. В. Фоссилизация современных вирусов. 2022. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112413>.
3. Беляев А. М., Юхалин П. В. Возможные останки окаменевших вирусов в древних горных породах. 2022. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112417>.
4. Герасименко Л.М. и др. Силицификация цианобактерий в лабораторной культуре / В сб.: Кварц, кремнезем. Сыктывкар, Геопринт. 2004. С. 276–277.
5. Годовиков А. А., Рипинен О. И., Моторин С. Г. Агаты. М.: Недра, 1987, 368 с.
6. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах (под ред. А.Ю. Розанова и Г.Т. Ушатинской). М.: ПИН РАН, 2011. 171 с.
7. Кантор Б.З. О генезисе агатов: новые данные. 2008. <http://mindraw.web.ru/Kant-StAg.htm>
8. Лебедева Е.Г., Челноков Г.А., Харитонова Н.А. Особенности распределения различных функциональных групп бактерий и их численность в подземных холодных высокоминерализованных водах Приморского края // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 12-1. – С. 162-167; URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36991>.
9. Моховые агаты и проблема мембранных трубок// <https://juwelir.info/index.php/spravochnyky/agaty/>.
10. Приливы твердой Земли, Астрономический институт Бернского университета. Раздел 10.1.2, 2015.
11. Слётов В., Рисуя Минералы, 2012. <http://mindraw.web.ru>.
12. Условия образования агатов: <https://juwelir.info/index.php/spravochnyky/agaty/828-usloviya-obrazovaniya-agatov>.
13. Belyaev A.M., Yukhalin P.V. Virus-Like Microfossils in the 1.64 Ga Siliceous Rocks From Hogland Island, Russia, 2021, submitted to PaleorXiv, <https://DOI:10.31233/osf.io/n8zbu>.

14. Belyaev A. M., Yukhalin P. V. Experimental and natural fossilization of modern viruses. 2022. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112410>
15. Bar-On Y. et al., 2018. The biomass distribution on Earth. PNAS, <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
16. Borgonie G., et al., Nematoda from the terrestrial deep subsurface of South Africa // *Nature*. 2011. V. 474. P. 79–82.
17. Cario A., et al., 2019. Exploring the Deep Marine Biosphere: Challenges, Innovations, and Opportunities).
18. Collini M. Journal d'un voyage, qui contient differentes observations mineralogique; particulièrement sur les agates, et le basalte. A. Mannheim, Chez C. F. Schwan, Libraire de la Cour, 1776, 384 p.
19. Collins Terry, Pratt Katie. Life in deep Earth totals 15 to 23 billion tonnes of carbon—hundreds of times more than humans". Deep Carbon Observatory. Meeting, 2018.
20. Colwell, F. S.; D'Hondt, S. (13 February 2013). "Nature and Extent of the Deep Biosphere". *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 75 (1): 547–574. Bibcode:2013RvMG...75..547C. doi:10.2138/rmg.2013.75.17.
21. Fernando Puente-Sánchez et al., Viable cyanobacteria in the deep continental subsurface // PNAS, 2018, vol. 115, no. 42, p.10702–10707, DOI:10.1073/pnas.1808176115.
22. Kadnikov V. V., Mardanov A.V., Frank Y.A. et al., Genomes of three bacteriophages from the deep subsurface aquifer. // *Journal Data in Brief*. 2019, V. 22, p. 488-491. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.12.045>.
23. Laidler, J. R., & Stedman, K. M. Virus silicification under simulated hot spring conditions. *Astrobiology*, 2010; (6), pp. 569-576.
24. Gergens D. Ober die Konferven-artigen Bildungen im manchen Chalzedon — Kugeln.—N. Jb. Min. etc., 1858, 801—807.
25. Orcutt, B. N., Sylvan, J. B., Knab, N. J., et al., Microbial Ecology of the Dark Ocean above, at, and below the Seafloor. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2011, 75 (2): 361–422. doi:10.1128/MMBR.00039-10. PMC 3122624. PMID 21646433.
26. Peter J. Heaney. A proposed mechanism for the growth of chalcedony. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1993, vol. 115, pp. 66 - 74.
27. Westall F., Boni L., Guerzoni E., 1995. The experimental silicification of microorganisms // *J. Paleontol*. V. 38(3), p. 495–528.
28. Verena B. Heuer et al. Temperature limits to deep subseafloor life in the Nankai Trough subduction zone // *Science*. 2020. DOI: 10.1126/science.abd7934.