

УДК 549.551(477.75.549)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО ВОЗРОЖДЕНИЮ К ЖИЗНИ СООБЩЕСТВ АРХЕЙ И БАКТЕРИЙ МИОЦЕНА ИЗ ГЕРАКЛИТОВ

Лысенко В.И.

Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в
г. Севастополе, г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: niagara_sev@mail.ru

В статье приводятся результаты опытных работ по оживлению сообществ прокариот из миоценовых карбонатных образований под названием гераклиты. Эксперименты доказали, что образование органического и карбонатного вещества происходит за счёт переработки метана сообществом бактерий и архей. На биохимические процессы в растворе при проведении прокачки метаном указывают изменения температуры и pH. Образование бактериального карбонатного материала происходит в кислой среде раствора с pH от 5,750 до 6,674. От растворения новообразования карбоната защищает бактериальная плёнка. Удивляет разнообразие форм бактериального карбоната, которые имеют внешнее сходство с морфологией современных карбонатных построек морей и океанов, гераклитов и оксфордских метанолитов. Высокие скорости роста бактериального карбоната в опытах, ставят под сомнение тысячелетний возраст современных карбонатных построек на дне морей и океанов. Цветовая форма и зональность бактериального обрастания миоцена имеет внешнее сходство с современным в Чёрном море, что подтверждает гипотезу о незначительных их эволюционных изменениях. Целесообразно продолжить на более высоком аналитическом уровне экспериментальные работы по изучению сообществ микроорганизмов из гераклитов миоцена.

Ключевые слова: метанотрофные и метаногенные прокариоты; хемосинтез; бактериальные маты; карбонатные постройки; метан; карбонатные новообразования; гераклиты.

Введение

В наши дни большое внимание уделяется изучению образования карбонатных пород с участием сообществ прокариот (Вологдин, 1947; Исаченко, 1948; Вернадский, 1967; Заварзин, 2002; Розанов, 2003). Большинство исследователей считают, что их формирование связано с процессами жизнедеятельности цианобактерий (Matsumoto, 1990; Aharon, 2000; Заварзин, 2002; Розанов, 2003; Кузнецов, 2015). В шестидесятых годах XX века на больших глубинах дна морей и океанов были найдены аутигенные карбонатные постройки, образование которых произошло в ходе переработки метана бактериальными сообществами (Хорн, 1972; Fuex, 1977; Suess et al., 1985; Burne, Moore, 1987; Иванов и др., 1991; Sibuet, Olu, 1998; Taldenkova et al., 2005; Tianfu et al., 2017). Физико-географическая ситуация их образования значительно отличается от условий формирования построек цианобактерий, известных как строматолиты (Matsumoto, 1990; Иванов и др., 1991; Шнюков и др., 1995; Леин, 2005). В наше время актуальными научными проблемами стали выяснения экспериментальными методами механизмов образования карбонатного вещества, процессов биохимических реакций и с чем связана энергетика бактериального хемосинтеза (Зайцева и др., 2007; Леонова и др., 2015). Результаты многочисленных экспериментальных исследований процессов образования карбонатов микроорганизмами не дают окончательных однозначных ответов на эти актуальные вопросы. Автор на протяжении многих лет изучал карбонатные постройки прокариот зон палеодегазации из неогеновых пород Крыма, известных как гераклиты (Лысенко, 2014). В их микритовых структурах отмечаются фрагменты фоссилизации бактерий (Лукин и др., 2006; Лысенко, 2014). Расположение гераклитов в геологическом разрезе, данные геохимического опробования и состав палеофлюидов однозначно указывают, что их образование связано с жизнедеятельностью сообществ архей и прокариот около центров углеводородной палеодегазации на дне соответствующих по

возрасту морей (Лысенко, 2014). В обломочном материале гераклитов и вмещающих их породах отсутствуют следы воздействия процессов катагенеза и метагенеза (Лысенко, 2014), что позволило выдвинуть предположение о сохранении способности к жизнедеятельности создавших их прокариот. Поэтому автор попытался провести опыты по возрождению к жизни спорный материал сообществ бактерий и архей из карбонатного материала гераклитов верхнего сармата. Выполнение этих лабораторных исследований позволили приблизиться к решению выше перечисленных вопросов образования карбоната прокариотами.

Целью данных экспериментальных работ являлось изучение условий образования карбонатного вещества бактериальных сообществ «миоцена» из метана в искусственно созданной водной среде.

Материалы и методы исследования

Как было сказано выше, гераклиты являются карбонатным материалом бактериальных построек миоцена (Лысенко, 2014). Этот материал характеризуется особым нахождением в геологическом разрезе, своеобразной внешней морфологией, цветовой окраской, структурными и текстурными признаками, минералогическим составом, геохимией, газонасыщенностью, пропиткой нефтепродуктов и наличием микро и макрофауны (Лысенко, 2014). По этим признакам они отличаются от вмещающих карбонатно-терригенных пород миоцена. По внешней морфологии среди них выделяются разновидности следующих гераклитов: «шлаковидных», «полосчатых», «плит цементации», «угловатых» и «микрометанолитов» (Лысенко, 2014).

Для проведения опытов отбирались «шлаковидные» гераклиты из обнажений береговых обрывов мыса Херсонес (юго-западная оконечность Крымского полуострова). Такие разновидности имеют наибольшее распространение в геологическом разрезе. Бралась образцы размерностью не менее 5 см. Материал дробился на более мелкие обломки. В пробу отбирался мелкий щебень из центральных частей гераклитов (рис. 1). Чтобы исключить участие в опыте современных бактерий, этот мелкообломочный материал перед проведением опытов опускался на несколько минут в азотную кислоту. После этого промывался несколько раз дистиллированной водой, затем сушился в муфельной электропечи при температуре 200° в течение шести часов. После этого часть материала дробилась до пыли (0,5 мм и менее), которая являлась дополнительной подсыпкой к крупнообломочной фракции.

Морская вода для проведения опытов была отобрана в ноябре месяце на пляже Херсонесского городища, где существует прямая связь с открытой поверхностью Черного моря. Перед началом проведения опытов вода кипятилась в течение 30 минут.

В качестве источника газа для воссоздания процессов дегазации использовался метан из газовых баллонов «Турист», с объемом газа 220 грамм.

Интерес к теме эксперимента возник в результате изучения материала проб кислотного остатка гераклитов (Лысенко, 2014), который был получен при растворении его раздробленного материала в кислоте. По методике подготовки проб нерастворимый кислотный осадок промывался несколько раз в дистиллированной воде, а высушенный материал использовался для проведения анализов (рис. 2).

Случайно одна промытая проба с дистиллированной водой простояла в химическом стакане полмесяца. За этот период в ней почти высох водный раствор, а на поверхности дна химического стакана, покрытого тяжелым нефтепродуктами, находились многочисленные пятнистые и сферолитовые минеральные образования белого цвета (рис. 3).

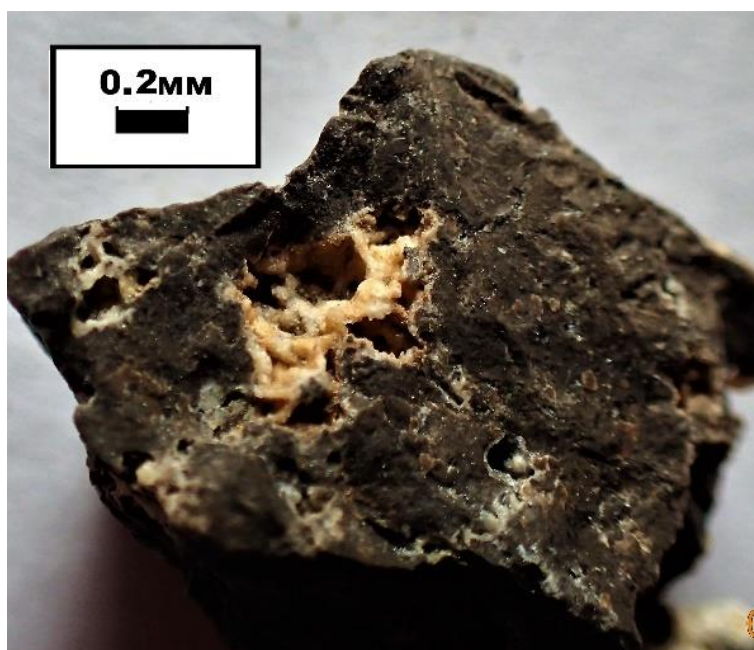


Рис. 1. Щебень дробления гераклитов. Чёрно-коричневая окраска связана с пропиткой материалов тяжёлыми нефтепродуктами и органическим веществом



Рис. 2. Материал кислотного остатка растворения гераклитов после промывки его дистиллированной водой

Сферолиты имели форму «ёжиков», а в их центре находилось белое пятнышко округлой формы размером от 0,5 до 1,7 мм. От центрального ядра в разные стороны отходили стреловидные волосяные отростки размером 1,0 – 2,5 мм. На некоторых насчитывалось до 30 выростов. Часто сферолиты срастались друг с другом. Иногда на удлинённых кристаллах одного сферолита отмечались зародыши более мелких белых пятен округлой формы, из центра которых отходили в стороны стреловидные кристаллики.

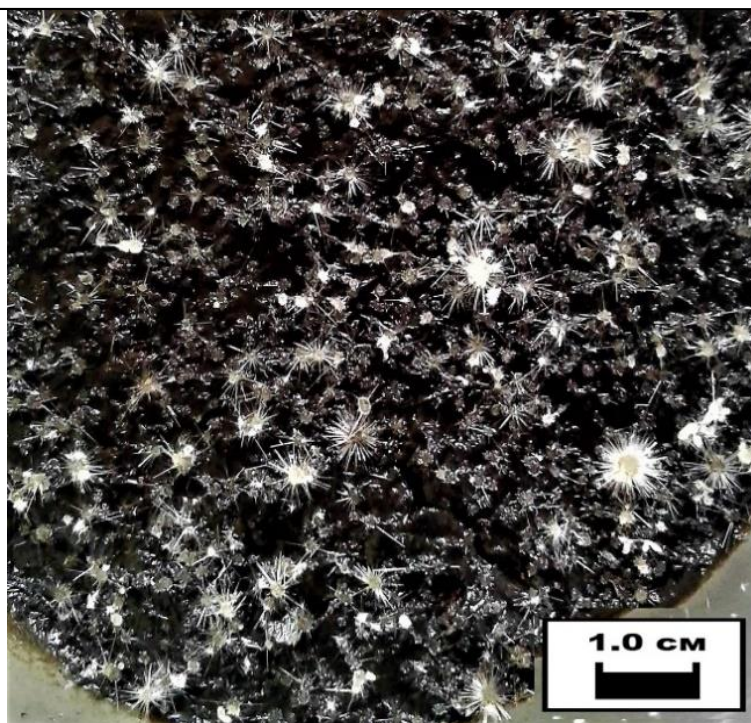


Рис. 3. Сферолитовые образования карбоната на поверхности кислотного остатка растворения гераклитов

Довольно часто в центральной части крупных сферолитов наблюдалась прерывистая зональность. При более детальном просмотре поверхности битумов на ней отмечались более мелкие белые шарики, от поверхности которых отходили от одного и более игольчатых кристалликов (рис. 3). Можно предположить, что это первоначальный период образования сферолитов. После визуального изучения этого материала, химический стакан заполнили водой. Прошло две недели и в центральной части водной поверхности наблюдали скопление мелких пузырьков газа (размерностью меньше миллиметра). Сам раствор имел мутновато серую окраску, поэтому невозможно было определить, откуда идет поднятие пузырьков. При удалении их с поверхности через сутки произошло скопление на том же месте новых. Это свидетельствовало о биологическом происхождении газовых пузырьков.

После этого мы промыли дистиллированной водой материал бывшего кислотного остатка. В нем находились игольчатые, пластинчатые, губчатые и сферолитовые сростки белого материала размерностью меньше одного миллиметра (рис. 4). При просмотре материала под бинокулой хорошо видно, что сферолитовые образования имеют большое сходство с подобными современными карбонатными выделениями около газовых сипов в конгломератах бухты Ласпи (Лысенко, Шик, 2013).

Азотная кислота, которую мы капнули на предметное стекло для проверки состава наших микробиолитов, сразу не вступила в реакцию. Только спустя несколько минут на поверхности минеральных образований появилось многочисленное количество пузырьков углекислого газа. После этого карбонат микробиолитов в течение минуты полностью растворился в кислоте, а на стекле остались чёрные микропятна. Это позволяет сделать вывод, что наши карбонатные выделения были покрыты коллоидной бактериальной пленкой, которая являлась защитой от процессов кислотного растворения. Данный факт запуска специфических биохимических процессов на основе нерастворимого остатка гераклитов вызвал интерес и требовал более точного экспериментального повторения.

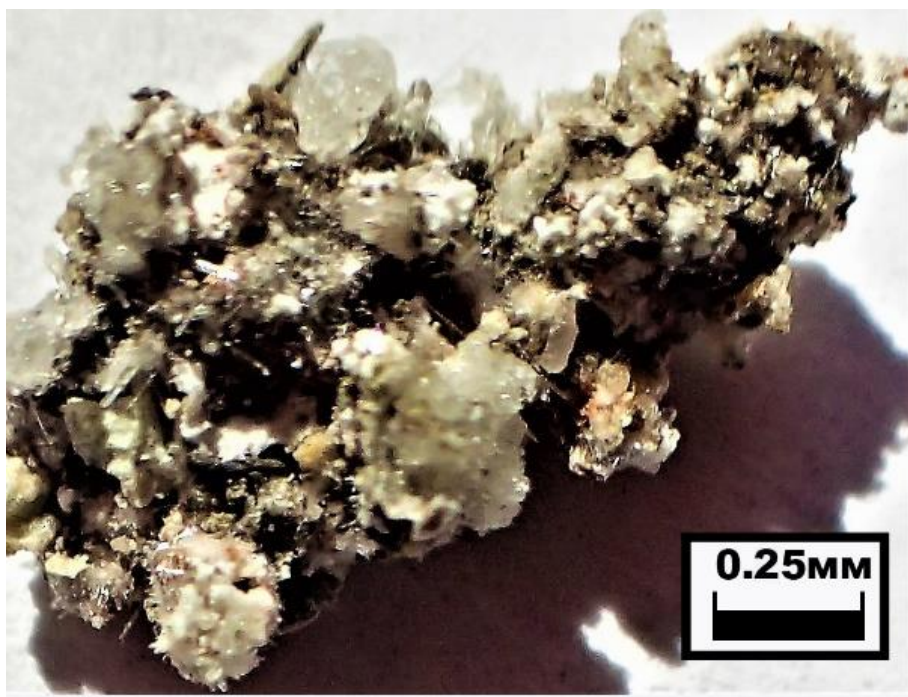


Рис. 4. Пластинчатые, игольчатые и сфероидальные сростки новообразования карбоната

Вторым этапом наших опытных работ была попытка восстановить жизнедеятельность бактериальных сообществ миоцена из каменного материала гераклитов. Для этого эксперимента было подготовлено пять сосудов (пластиковые бутылки объемом 400 мл), которые заполнялись морской водой. В них помещался дробленый материал гераклитов, к которому подсыпался их истёртый порошок (рис. 5). Так как для создания живого углеводородного вещества требуется азот и сера, в две емкости было добавлено по 10 капель азотной кислоты и сульфида натрия.



Рис. 5. Обломочный материал гераклитов, подготовленных для проведения опытных работ. (место отбора – пляж Хрустальный)

Имитация природной дегазации производилась трубкой газового баллончика, которая опускалась в ёмкость на полную глубину (рис. 6) Три-пять дней в неделю бурный поддув газа осуществлялся от 10 до 15 минут. В течение всего эксперимента емкости с материалом находились в темном шкафу. Лишь во время прокачки происходило кратковременное воздействие рассеянного света на них. Общее поступление световой энергии составило не более трех часов в неделю. В первые дни проведения газовой прокачки раствор имел молочную окраску.

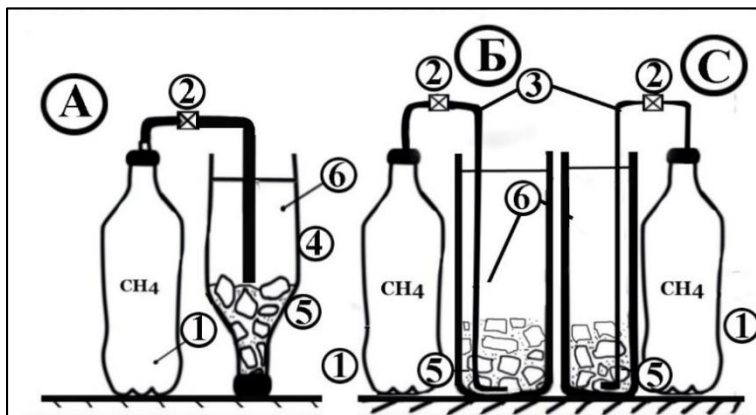


Рис. 6. Материалы для проведения опытов второго (А) и третьего этапов (Б и В). Условные обозначения: 1 – газовые баллончики «Турист»; краны открытия и закрытия газа; 3 – трубки подачи метана; 4 – пластиковые бутылки объёмом 400 мм с материалом гераклитов; 5 – химическая посуда объёмом 400 мм (Б) и 250 мм (В) с материалом гераклитов; 6 – раствор морской воды

Основным методом исследования на данном этапе эксперимента являлось наблюдение за изменением прозрачности раствора и появлением новообразований на поверхности гераклитов. Были получены следующие результаты. Через 30 дней после начала эксперимента пропала мутность водного раствора при поступлении газовых пузырьков, но только в сосудах, где присутствовали соли азотной кислоты и сульфиды натрия. При детальном осмотре выяснилось, что поверхность обломочного материала в емкостях покрылась белой микропленкой, похожей на бактериальную «слизь». Еще через 60 дней поверхность опытного материала покрылась отдельными пятнами буровато-оранжевого налета, а глубже появились разрозненные черно-коричневые микропрослой.

В течение следующих двух месяцев «твёрдая» поверхность гераклитовой смеси покрылась тёмно-оранжевой коркой. Её мощность составила около 0,5 мм. Под этим «ковром» образовался прослой черно-коричневого цвета. В самой нижней части емкости на стенках и поверхности обломков гераклитов появились налеты белого цвета. Через полгода, с начала проведения опыта, цветовая дифференциация материала значительно усилилась (рис. 7). Поверхность крупных обломков гераклитов обросла мохнатой оранжевой пленкой мощностью до 2 мм. На спрессованном мелкообломочном материале гераклитов между крупными обломками оранжево-коричневое обрастание имело мощность от 3,0 до 5,0 мм. Верхняя и нижняя границы этой зоны резкие и повторяют неровную первичную поверхность. По цвету это обрастание делится на две подзоны: верхнюю волокнистую темно- оранжевую и нижнюю, которая была представлена желеподобной светло-оранжевой массой. На границе их раздела отмечаются точечные новообразования белого кальцита (рис. 7). При сильном увеличении видно, что они имеют угловатую и сферическую форму (рис. 8). Подобные белые микроточки встречаются в зарослях буро-оранжевого обрастания на поверхности крупных обломков гераклитов (рис. 7).

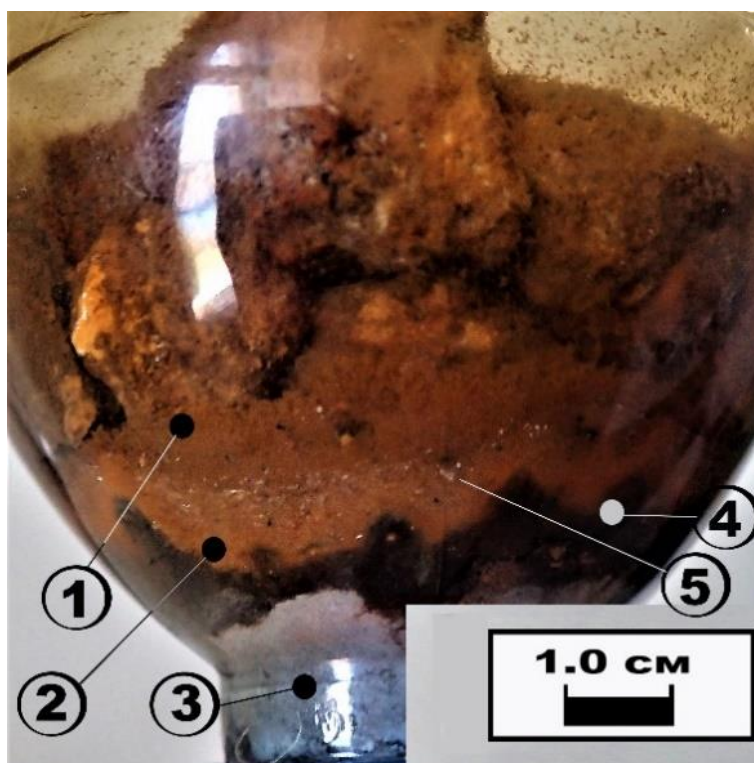


Рис. 7. Зональная окраска бактериального обрастания поверхности обломочного материала гераклитов. Условные обозначения: 1 – волокнистая тёмно-оранжевая подзона; 2 – желеподобная светло-оранжевая подзона с включениями новообразований кальцита; 3 – чёрно-коричневая зона; 4 – зона белого цвета; 5 – включения новообразования кальцита

В период, когда прокачка газом не проводилась в течение двух недель, произошло своеобразное засыхание верхней темно-оранжевой волокнистой зоны обрастания. Стоило насытить раствор метаном, как через несколько минут происходило поднятие темно-оранжевого ветвистого материала. Это является подтверждением того, что бактериальные сообщества питаются в основном метаном, растворенном в воде.

Ниже залегающая зона черно-коричневого цвета имеет довольно резкие границы, а её мощность от 1,5 до 2,5 мм (рис. 7). Предположительно, такая цветовая окраска связана с органическим веществом.

В самой нижней части бутылки под чёрным материалом находится зона белого цвета (рис. 7). Она имеет резкие и заливообразные контакты с верхней зоной. В этой зоне стенки бутылки и крупнообломочный материал гераклитов покрыты белым налётом, имеющем сходство с вышеописанным новообразованным кальцитом (рис. 8). Мощность этих изменений составляет 45–50 мм.

Довольно интересные данные были получены после промывки обломочного материала. Чёрно-коричневая «плесень» средней зоны хорошо смывалась водой, что подтверждает высказанное ранее предположение, что это органический углеводородный материал бактериального хемосинтеза. Значительно изменился внешний вид поверхностей обломков гераклитов после проведения опытов. Оказалось, что большая их часть была покрыта серо-коричневой плёнкой карбоната мощностью 0,5–2,5 мм с характерными микро дырчатыми отверстиями (рис. 9). Встречаются отдельные поверхности на гераклитах, покрытые сотовыми образованиями с вертикальными микротрубочками (рис. 10).

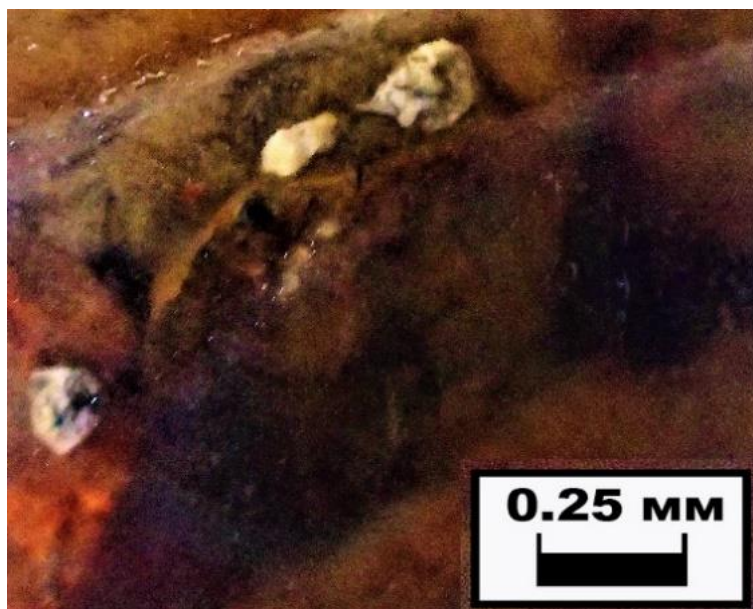


Рис. 8. Новообразование кальцита в бактериальных матах



Рис. 9. Плоскость гераклитов после проведения опытов, покрытая плёнкой новообразованного кальцита с дырчатой поверхностью

Подобные формы выделения автор наблюдал на поверхности бактериального обрастания сульфидно-карбонатных труб лавовых палеопотоков верхнего триаса Горного Крыма и гераклитах (Лысенко, 2014). Отмечаются отдельные обломки гераклитов со следами «кислотного» растворения (рис. 11). На их поверхности происходит обесцвечивание чёрно-коричневого антраконита до белого сахаровидного кальцита (рис. 11). Можно предположить, что битумное и «органическое» вещество из гераклитов (Лысенко, 2014) послужило пищей для «оживших» бактериальных сообществ миоцена.

После прекращения опыта выяснялось, что отсутствует сплошная цементация обломочного материала в ёмкости. Возможно, это связано с поступлением газа не через исследуемый материал, а сверху из раствора.



Рис. 10. Поверхность гераклитов после эксперимента, покрытая карбонатной корочкой с трубчатыми образованиями



Рис. 11. Поверхность гераклитов со следами растворения и выщелачивания битумного и органического вещества

Кроме этого, в промытом обломочном материале из указанных емкостей встречаются новообразования карбоната различной формы размером до трёх миллиметров. Значительная часть из них представлена своеобразными «стяжениями» удлинённой неправильной формы (рис. 12). Дырчатая поверхность на них в виде микрократеров напоминает описание характеристик «микрометанолитов» оксфорда, «шлаковидных» гераклитов (Лукин и др., 2006; Лысенко, 2014) и современных карбонатных строений (Леин и др., 1975; Иванов и др., 1991; Шнюков, 1995; Mazzini et al., 2004; Крылов и др., 2008; Novikova et al., 2015; Лысенко, Цельмович, 2017). Кроме этого встречаются войлочные скопления плоской и шарообразной формы удлинённых кристаллов арагонита с чёрными точками углеродистого вещества (рис. 13). Реже встречаются сферолитовые образования, описанные нами в первом опыте.

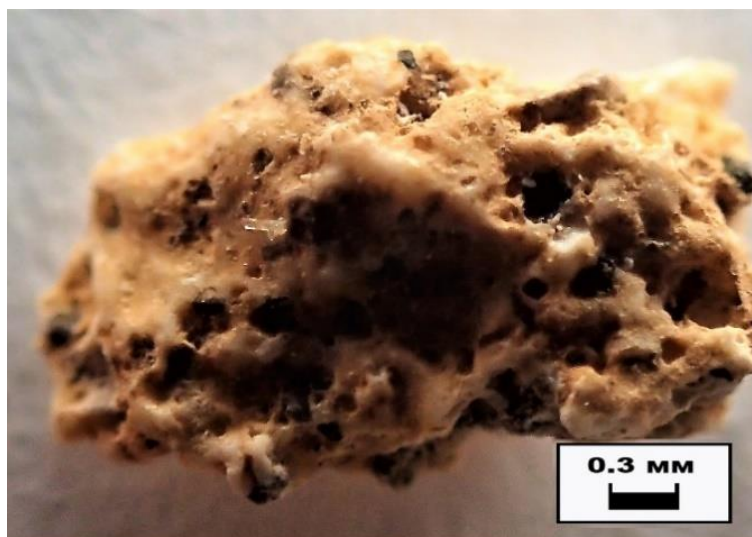


Рис. 12. Карбонатные новообразования с дырчатой поверхностью и игольчатыми кристаллами



Рис. 13. Войлокоподобные скопления удлиненных стреловидных кристаллов арагонита

В углублениях на поверхности некоторых обломков гераклитов, участвовавших в эксперименте, отмечаются войлокоподобные переплетения остроугольных игольчатых кристаллов карбоната (рис. 14).

Взаимодействие карбонатных новообразований данного опыта с кислотами подтвердили результаты, описанные нами выше. Карбонатный материал, взятый из раствора, вступал в реакцию с кислотами через некоторый промежуток времени, а высушенный – мгновенно. Бактериальная карбонатная плёнка, покрывающая новообразования карбоната, по всей видимости, разрушается в воздушной среде. После растворения карбонатных новообразований на предметном столе остаются чёрные точки. Предположительно, это следы органического вещества бактерий.

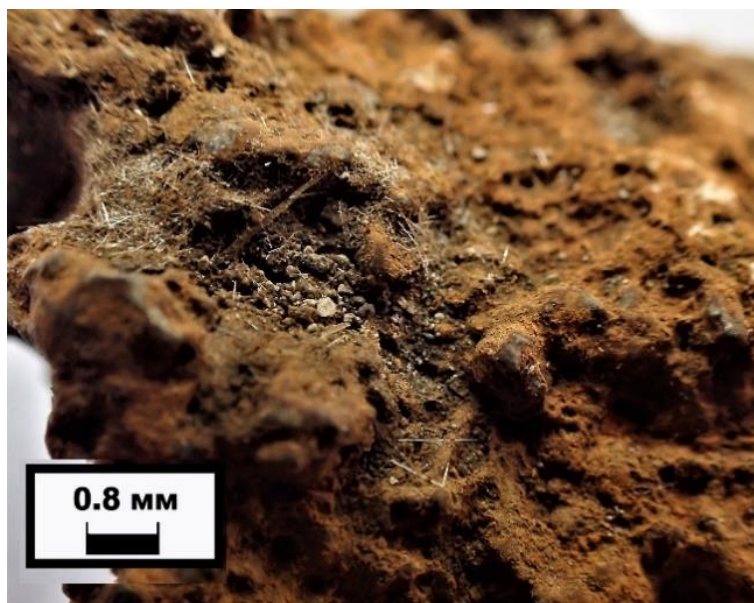


Рис. 14. Поверхность гераклитов покрытия корочкой карбоната. В центральной части понижения на ней находятся переплетения войлокоподобных игольчатых кристаллов

Взаимодействие карбонатных новообразований данного опыта с кислотами подтвердили результаты, описанные нами выше. Карбонатный материал, взятый из раствора, вступал в реакцию с кислотами через некоторый промежуток времени, а высушенный – мгновенно. Бактериальная карбонатная плёнка, покрывающая новообразования карбоната, по всей видимости, разрушается в воздушной среде. После растворения карбонатных новообразований на предметном столе остаются чёрные точки. Предположительно, это следы органического вещества бактерий.

Морфология некоторых форм новообразований карбоната на поверхности гераклитов имеет некоторое сходство с описанием, по литературным данным, материала цианобактерий, которые создают свои постройки за счёт энергии Солнца (Журавлева, 1964; Розанов, Заварзин, 1997; Жмур и др., 1999; Анисимов и др., 2012). Нельзя отрицать, что в наших опытах материал исследования в короткие временные интервалы подвергался воздействию рассеянного солнечного света, о чём указывалось выше. Поэтому отличие третьего этапа проведения опытных работ от предыдущих отличалось тем, что материал гераклитов в химической посуде обматывался несколькими слоями светоизолирующего материала. В результате исключалась всякая возможность воздействия солнечного света во время проведения опытов. Изменилась методика подачи газа в ёмкости с раствором (рис. 6). Метан подавался через трубочку, выходное отверстие которой было ниже обломочного материала гераклитов. Поэтому пузырьки метана проходили через каменный материал, как в современных сипах Чёрного моря. Отличие заключалась в прерывистом поступлении газа в экспериментальные сосуды. При проведении опыта его подпитка осуществлялась пять дней в неделю по 15–20 минут в сутки. В раствор, как и в предыдущем опыте, было добавлено несколько капель азотной кислоты и сульфида натрия.

Через шесть месяцев после начала опытов на поверхности материала отмечались многочисленные пятна белого цвета гелеобразной бактериальной слизи мощностью 1,0–1,5 мм. На выступающих над поверхностью обломках гераклитов отмечались налёты белого чешуйчатого и сферического или шарообразного карбоната (рис. 15). Общая картина имела большое сходство с результатами проведения предыдущего опыта (рис. 16).

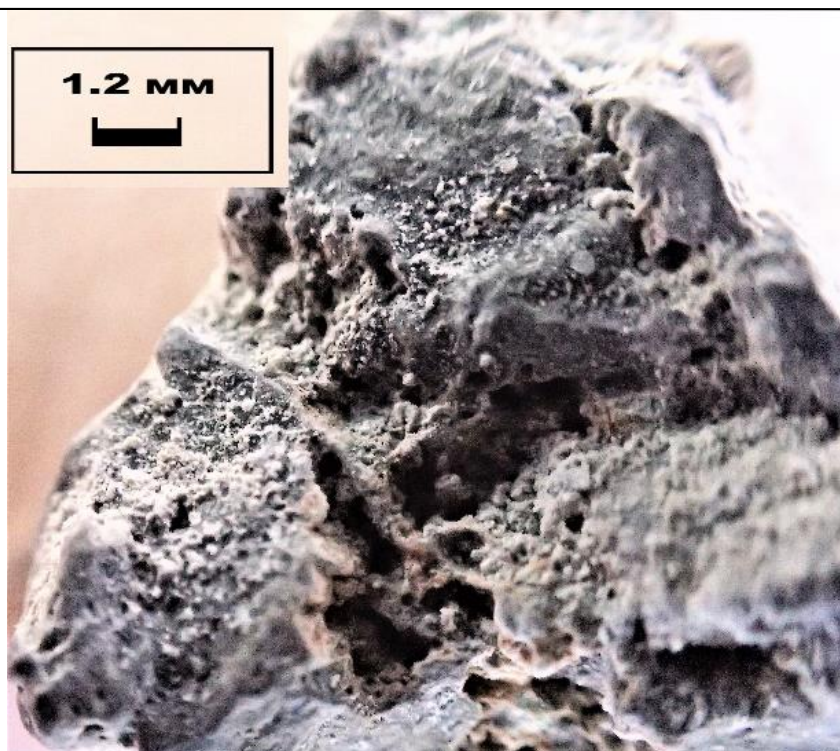


Рис. 15. Поверхность гераклитов с присыпками белого карбоната пластинчатой и шарообразной формы



Рис. 16. Бактериальное обрастание поверхности гераклитов

Через десять месяцев, с начала проведения опытных работ, верхняя поверхность материала и крупных обломков гераклитов покрылась сплошной шероховатой коркой гелеобразного материала бактериального обрастания (рис. 17). По световой окраске она несколько отличается от ранее описанных в предыдущих опытах. Верхняя часть плёнки имеет розово-оранжевую окраску, а нижняя розово-белую. Граница между ними извилистая, но не резкая. Общая мощность бактериальной плёнки обрастания от 1,5 до 3,5 мм. В нижней белой зоне отмечаются отдельные точечные округлые новообразования карбоната размером менее 0,05 мм (рис. 17).

Железная проволока диаметром 1,0 мм, которая использовалась для крепления газоотводящей стеклянной трубочки, за этот временной период из-за интенсивной

коррозии заместилась гидроокислами железа и разваливалась на части. Отдельные её куски упали на поверхность дна ёмкости и покрылись плёнкой мелких пластинчатых и шарообразных карбонатов белого цвета (рис. 18).

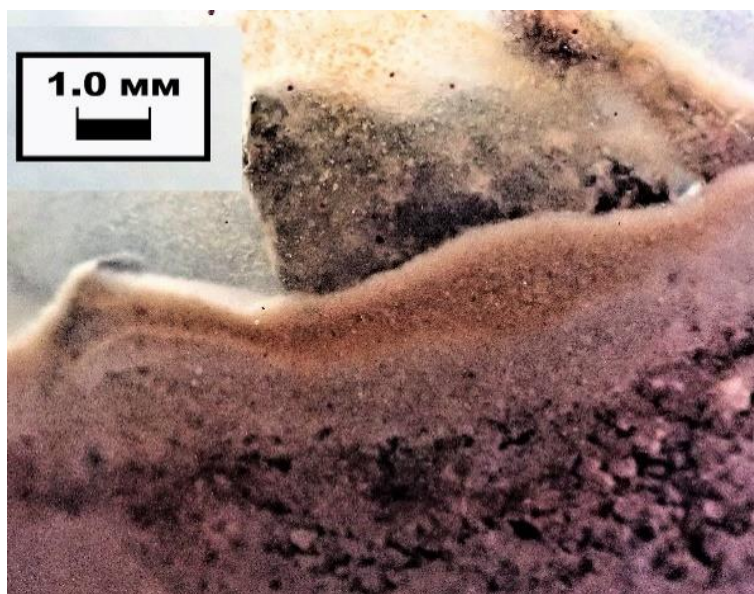


Рис. 17. Зональное строение бактериального обрастания. Верхняя подзона имеет розовато-оранжевую окраску, а нижняя – розово-белую



Рис. 18. Железная проволока, покрытая плёнкой пластинчатых и шарообразных карбонатов

В слое каменного материала, который находился в ёмкости, имелись пустоты разной конфигурации и размеров, что было связано с формой и размерностью экспериментальной смеси. При прохождении газа через слой обломочного материала полости довольно часто заполнялись пузырьками метана, которые сохраняли свое местоположение продолжительное время.

По окончании эксперимента оказалось, что часть крупных пузырьков в таких пустотах была покрыта тонкой плёнкой игольчатого карбоната, которая имеет фрагментарно полосчатое строение. Толщина налёта на таких округлых образованиях достигает 0,25 мм (рис. 19). Покрытие пустотелых шариков корочками карбоната свидетельствует о высоких скоростях образования кальцита сообществами микроорганизмов, которые, видимо, использовали газ пузырьков как субстрат.

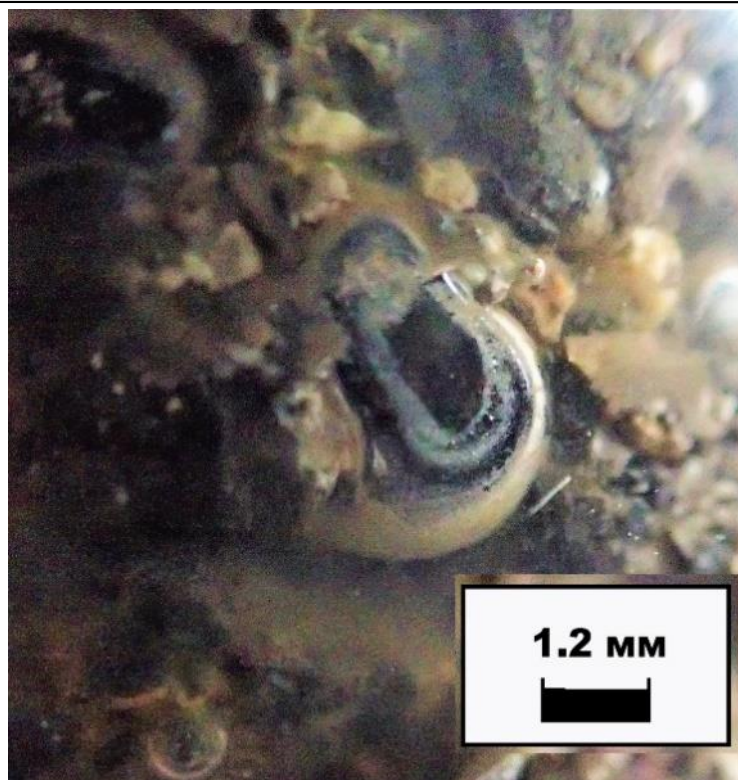


Рис. 19. Тонкая корка игольчатого карбоната на пузырьках метана

В промытом каменном материале третьего опыта встречаются все разновидности карбонатных новообразований, описание которых подробно приведено в предыдущем нашем эксперименте. Эти образования имеют вид «стяжений» неправильной формы с дырчатыми отверстиями, микротрубчатых переплетений, сферолитовых и пластинчатые образований, а также войлокоподобных и остроугольных сrostков игольчатых кристаллов (рис. 20). Поверхность обломков гераклитов покрыта подобными плёночными образованиями карбоната, описанными нами ранее. Отмечаются также обломки гераклитов со следами растворения.

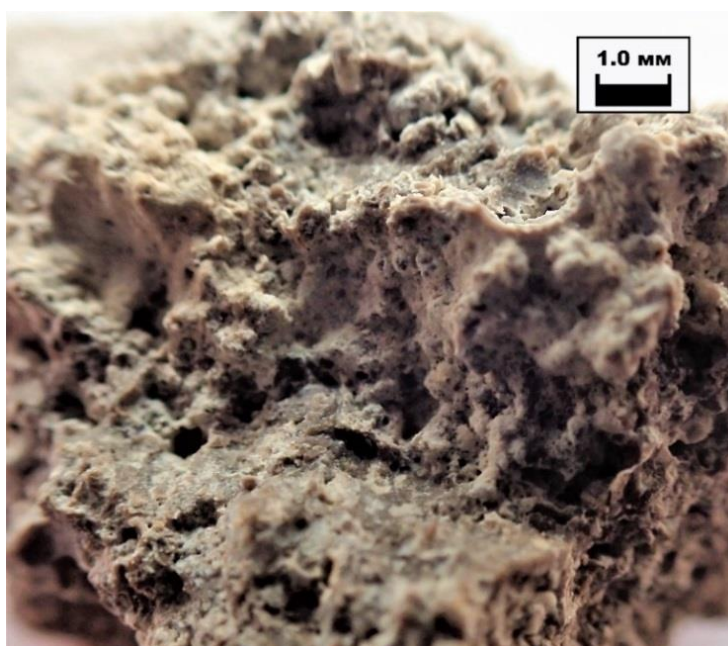


Рис. 20. Поверхность гераклитов, покрытая корочкой микротрубчатого, чешуйчатого и сфероидального карбоната

Значительным отличием конечного продукта данного опыта от предыдущих опытов являлась цементация обломочного материала гераклитов вокруг трубочки, через которую шло поступление газа со дна ёмкости. Сформировалась своеобразная искусственная брекчия с контактовым типом цемента, представленным пленкой белого карбоната. При большом увеличении видно, что плёночный цемент представлен плоскими угловатыми кристаллами. В поровом пространстве конгломератов довольно часто встречаются сферолитовые образования тонких игольчатых кристаллов. Подобная цементация материала характерна для описанных нами ранее конгломератовидных построек вблизи зон дегазации в бухте Ласпи (Лысенко, Шик, 2013).

В ходе эксперимента были выполнены замеры щёлочности и температуры раствора прибором pH-метром Inolab pH Level-2. Предположительно, из-за различия объёмов растворов в химических сосудах опытов, показания pH незначительно различались между собой. Измерения в разные дни перед началом прокачки установили, что в ёмкости химической посуды с объёмом раствора 400 мл pH изменяется от 6,137 до 6,674, а где было 250 мл раствора – от 5,750 до 6,376. Необходимо отметить, что морская вода, которая использовалась для проведения опытных работ, по данным замеров характеризуется первичным pH=8,264. При прокачке происходит уменьшение кислотности раствора (рис. 21). Увеличение pH с поступлением метана в большой ёмкости возрастает в разные дни от 6,668 до 6,856, а в посуде с малым объёмом – от 6,110 до 6,520. Кислотность в течение первых 20–60 минут поступления газа уменьшается в абсолютных величинах на 0,525 – 0,925 от предшествующего общего значения pH. Абсолютные значения pH особенно сильно увеличиваются после первых 5 минут прокачки метаном (рис. 21). После окончания процедуры прокачки происходит медленное увеличение кислотности (рис. 21). Процесс восстановления имеет длительность больше суток. В течение восьми дней мы не кормили бактериальное сообщество и за этот период pH раствора равномерно уменьшилось с 6,125 до 5,753 (рис. 22).

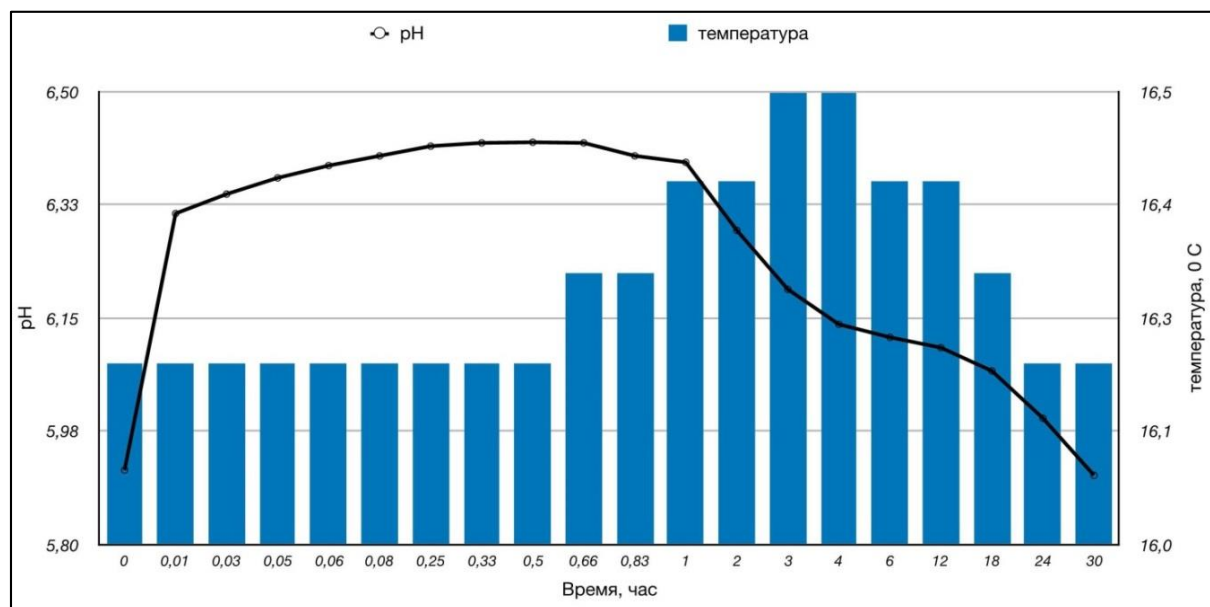


Рис. 21. Изменение pH и температуры раствора при проведении прокачки метаном в химической посуде с объёмом 250 мл. Прокачки метаном производилась в течение первых 40 минут. Температура в помещении, проведения опытов, 16,2°C

После девяти месяцев проведения опытных работ в одной ёмкости заменили раствор на первичную морскую воду. Первый замер показал, что pH раствора составляет 8,145. После проведения прокачки метаном продолжительностью 35 минут, pH среды

изменился с 8,145 до 8,578 (рис. 23). Дальнейшее поступление газа продолжительностью 20 минут происходило без изменения щёлочности среды. Через двое суток после окончания прокачки щёлочность уменьшилась до 7,657. Новое поступление газа в течение 40 минут увеличило pH раствора с 7,657 до 8,027. Через 48 часов после прекращения прокачки кислотность составляла 6,504.

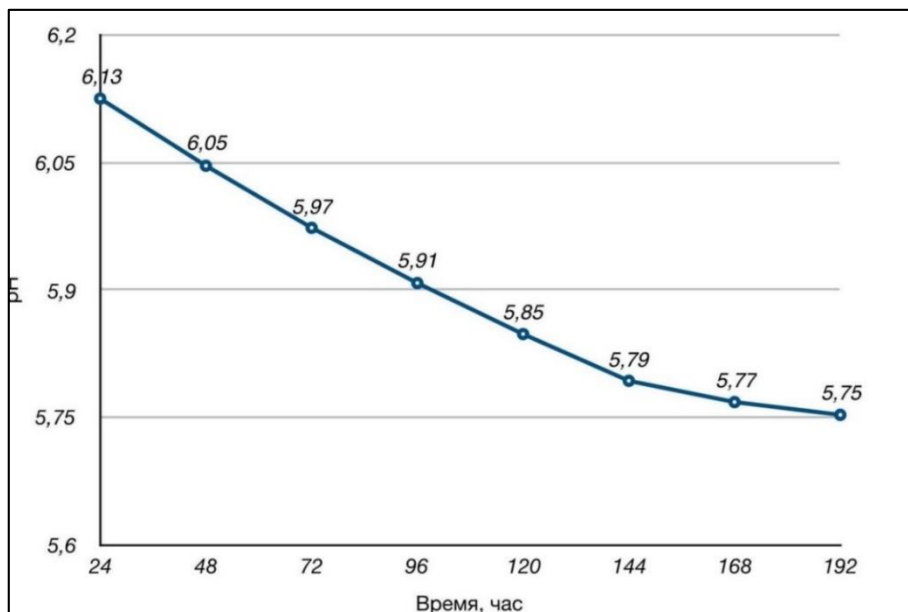


Рис. 22. График изменения pH раствора при отсутствии прокачек метана в течение восьми суток. Замеры производились ежедневно в 12 часов дня (с 07.04.19. по 14.04.19)

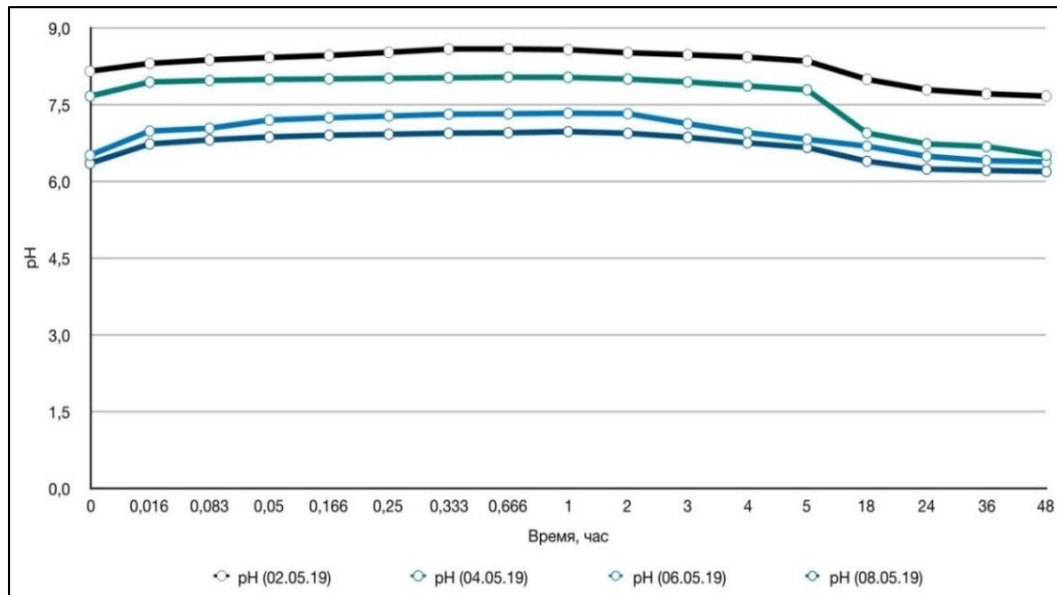


Рис. 23. График характера изменения pH раствора морской воды после проведения ряда последовательных прокачек метаном. По замерам pH морской воды перед сменой раствора составлял 8,264. Прокачки газом были продолжительностью: 02.05.19. – 55 минут; 04.05.19. – 48 минут; 06.05.19. – 50 минут; 08.05.19. – 60 минут

Третье включение газа в течение 50 минут увеличило pH раствора с 6,504 до 7,325. После прекращения поступления газа кислотность через 45 часов составила 6,373. Во время последней прокачки продолжительностью 60 минут pH раствора увеличилось с 6,373 до 6,965. После суточного перекрытия искусственной дегазации pH уменьшился

до 6, 235. Время проведения прокачек в этих опытах, связано с изменением pH среды. Если этот показатель в течение 5 минут не менялся, то клапан поступления газа перекрывался. Результаты данных опытов показали, что время насыщения метаном раствора с каждым опытом увеличивается, но при этом уменьшается pH среды (рис. 23).

За время проведения опытов произошло изменение состава морской воды. В первичной морской воде содержание катионов $\text{Ca}^{+2} = 14,5$ ммоль/дм³ и $\text{Mg}^{+2} = 39,25$ ммоль/дм³. За девять месяцев проведения опытных работ увеличилась концентрация Ca^{+2} до 150,3 ммоль/дм³ и уменьшилась - Mg^{+2} до 29,8 ммоль/дм³. Высокие содержания кальция предположительно связаны с растворением карбонатного вещества гераклитов в кислой среде и созданием из него новообразований кальцита. Незначительное изменение катионов Mg^{+2} в растворе указывают, что они тоже принимают некоторое участие в образовании карбоната.

Другие изменения, происходящие в растворе, связаны с температурой (рис. 21). В помещении, где проводились опыты, она находилась в пределах от +12° до +21°. Обычно через 30–40 минут после начала прокачки и её остановки начинается медленный рост температуры раствора. В течение 2–6 часов она повышается на 0,3°–0,5°, относительно температуры помещения. После этого температура раствора и pH понижалась до первоначальных величин. Возможно, более контрастные изменения кислотности и температуры происходят на поверхности бактериального обрастания обломочного материала, где проживают сообщества архей и бактерий, так как они контролируют процессы этих изменений.

Выполненные нами экспериментальные работы подтвердили выдвинутое ранее предположение, что главными условиями образования современных карбонатных построек (Леин и др., 1975; Шнюков и др., 1995; Medvedev, Makarikhin, 2008; Лысенко, Шик, 2013) и гераклитов (Лысенко, 2014) являются наличие дегазации метана и сообществ бактерий и архей по его переработке.

Результаты и обсуждение

В наши дни в научной литературе приводятся многочисленные описания опытных работ по образованию карбонатного вещества сообществом прокариот (Schubert, 1997; Taldenkova et al., 2005; Зайцева и др., 2007; Саввичев и др., 2011; Леонова и др., 2015). Особое внимание уделялось изучению образования и осаждения карбонатных частиц цианобактериями (Розанов, Заварзин, 1997; Заварзин, 2002; Зайцева и др., 2007). Их высокие скорости образования подтвердили экспериментальные работы в Институте микробиологии РАН (Заварзин, 2002; Леонова и др., 2015). Несмотря на многочисленные опыты, в наши дни нет единого мнения о роли цианобактерий и сине-зелёных водорослей в образовании карбоната (Schubert, 1997; Matsumoto, 1990; Aharon, 2000; Леонова и др., 2015). Не ясен процесс преобразования мягких бактериальных плёнок в твёрдые карбонатные строения. В то же время большинство исследователей считают, что только цианобактериальные сообщества создавали постройки строматолитов и микрофитолитов (Matsumoto, 1990; Розанов, Заварзин, 1997; Aharon, 2000; Анисимов и др., 2012). Находки этих строений являются доказательством образования пород в хорошо освещённых мелководных условиях зон прилива и отлива или лагун (Герасименко и др., 1996; Саввичев и др., 2011; Анисимов и др., 2012; Кузнецов, 2015).

В вышеописанных опытах автор попытался доказать, что подобные карбонатные образования гераклитов связаны с тектоническими зонами на дне морей и океанов, которые сопровождалась углеводородной палеодегазацией Земли. В более ранних наших работах отмечалось, что гераклиты, предположительно, созданы сообществом архей и бактерий, поэтому имеют довольно сложную структуру на микроуровне (Лукин

и др., 2006; Лысенко, 2014). Их довольно трудно изучать по отдельным срезам в шлифах из-за их разнообразия бактериального выделения карбоната. С такими же сложностями столкнулись исследователи при изучении современных карбонатных строений Чёрного моря (Хорн, 1972; Medvedev, Makarikhin, 2008). При изучении микритовых образований с помощью электро-микроскопа видно, что они представлены сплетением пластинчатых, трубчатых, нитевидных, округлых, хлопьевидных и гантелеобразных форм (Лукин и др., 2006; Лысенко, 2014). Было высказано предположение, что это продукты фоссилизации бактерий (Лысенко, 2014). Образование подобных разнообразных форм новообразований карбоната происходит в наших экспериментальных работах.

Описание сферолитовых бактериальных сообществ на поверхности тяжёлых нефтепродуктов кислотного остатка гераклитов (рис. 3) имеет большое морфологическое сходство и близкие размеры с известными, по литературным данным, желеобразными шариками на поверхности газогидратов метана на дне озера Байкал (Земская и др., 2011). У них, как и у наших образований, центральная пузырьковая часть окружена стреловидными волосяными выростами, направленными от центра (Земская и др., 2011). В желеобразных шариках со дна озера Байкала исследователи выявили богатое морфологическое разнообразие сообществ микроорганизмов. В их составе обнаружены метаногенные и метанотрофные археи и бактерии (Земская и др., 2011). Совсем другую форму имеют многолучевые шарообразные агрегаты современных нитчатых цианобактерий (Зайцева и др., 2007; Леонова и др., 2015). Возможно, эти отличия связаны с различными условиями образования и питания. Предположительно, в нашем первом опыте пищей сообщества прокариот являлись тяжёлые нефтепродукты и органическое углеводородное вещество гераклитов, запас которого создали прокариоты миоцена (Aloisi et al., 2000; Лысенко, 2014). Процессы биохимических реакций по образованию органического вещества и карбоната прокариотами подтверждались выделением газовых пузырьков. Из-за малых размеров состав газа в них установить не удалось.

Сферолитовые образования присутствуют в материале новообразования карбонатов во всех опытах. Предположительно, их формирование связано с шарообразными сообществами прокариот. Их внешняя морфология имеет большое сходство с описанием поверхности современных карбонатных построек на дне Чёрного моря (Геворкьян и др., 1991; Шнюков и др., 1995; Леин, 2005), а также с гераклитами и оксфордскими метанолитами (Лукин и др., 2006; Лысенко, 2014). Приводятся описания подобных сферолитовых образований при характеристике микрофитолитов (Жмур и др., 1999; Лукин и др., 2006; Анисимов и др., 2012; Кузнецов, 2015;). Первые описания сферолитовых образований на поверхности современных карбонатных построек приводятся в работах В.Х. Геворкьян (1991). Более детальная характеристика сферолитовых текстур приводится в статье Шнюкова Е.Ф. с соавторами (1995). Они заметили, что эти образования в постройках на континентальном склоне Чёрного моря имеют размеры менее 1,0 мм, а из шельфовой зоны – 2,0 – 3,0 мм (Хорн, 1972; Шнюков и др., 2006). Позднее исследователи описывают подобные образования в карбонатных подводного грязевого вулкана Двуреченского (Шнюков и др., 2006). Здесь сферолиты найдены под бактериальным слоем и имеют размеры от 1,0 до 2,0 мм (Шнюков и др., 2006). Описание подобных сферолитовых образований в карбонатных постройках в других частях Мирового океана описывали и другие исследователи (Леин и др., 1975; Гальченко, 2001; Леин, 2005; Крылов и др., 2008; Лысенко, Цельмович, 2017). Позже в бактериальном обрастании матов на карбонатных постройках В.Ф. Гальченко (2001) обнаружил «мелкие включения (0,5–2,0 мм) карбонатного жемчуга». Он высказал предположение, что через некоторый промежуток времени образования карбонатного жемчуга срастаются между собой и образуют карбонатную корку (Гальченко, 2001). Необходимо отметить, что в наших бактериальных обрастаниях отмечаются точечные

округлые образования белого карбоната (рис. 7, 17). Возможно, это зародыши жемчужин.

Бактериальные плёнки обрастания гераклитов во втором и третьем опытах имеют некоторое сходство с описанием подобных образований на поверхности современных карбонатных построек, поднятых с больших глубин Чёрного моря (Леин, 2005). Это фактически подтверждает гипотезу некоторых исследователей, что в течение длительного периода геологической истории Земли сообщество прокариот по переработке метана не изменило свой внешний вид до наших дней (Розанов, 2003; Саввичев и др., 2011). Поведение бактериальной «поросли» во время прокачки, обрастание пузырьков газа кристаллами кальцита, а также изменения в растворе pH и температуры свидетельствуют, что метан является главным компонентом для создания карбоната и органического вещества сообществами прокариот. Нет значительных отличий в морфологии новообразований карбоната во втором и третьем опытах. Можно считать, что их формирование не связано с солнечной энергией. Сферолитовые, микро трубчатые, сотовые и пластинчатые обрастания поверхности гераклитов в наших экспериментах имеют внешнее сходство с описанием образований микрофитолитов (Анисимов и др., 2012) и тромболитов (Журавлева, 1964; Тимофеев, 1982). В тоже время подобные морфологические формы выделения карбоната характерны для метанолитов оксфорда, гераклитов миоцена (Лысенко, 2014) и современных бактериальных построек больших глубин морей и океанов (Mazzini et al., 2004; Medvedev, Makarikhin, 2008; Novikova et al., 2015; Лысенко, Цельмович, 2017;), а также озера Байкал (Крылов и др., 2008).

Значительное разнообразие форм выделения карбонатов в наших опытах свидетельствует, что существует многообразие объединений различных микроорганизмов, связанных кооперацией по созданию различного органического вещества для продолжения жизни. В наше время большое количество органических соединений синтезировано опытным путём (Вернадский, 1967). Встречаются многочисленные органические соединения в материале извержения современных вулканов на Камчатке. В этих природных явлениях и опытах главными источниками энергии получения органического вещества являются молнии и искровые разряды в приборах. В настоящее время нет единого взгляда на химические реакции преобразования CH_4 в карбонатное вещество в анаэробных условиях. Большинство исследователей связывают окисление метана с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий, которые используют кислород из сульфатов морской воды (Hathaway, 1968; Иванов и др., 1991; Aharon, 2000; Kodina et al., 2001; Леин, 2005; Зайцева и др., 2007). Это не согласуется с изотопным составом кислорода в карбонатных постройках (Леин, 2005). Его значения отличаются от сульфатов и близки к изотопному составу морской воды (Kodina et al., 2001; Mazzini et al., 2004; Леин, 2005). Имеется значительное сходство $\delta^{18}\text{O}$ карбонатов построек и бикарбоната придонной воды (Леин, 2005). Д. Уалентайном и В. Рибургум предположили, что на первом этапе происходит окисление метана до ацетата и с последующем его окислением сульфатредуцирующими бактериями (Леин и др., 1975; Леин, 2005). Правда, многие микробиологи отрицали возможность окисления метана в процессе восстановления сульфата, так как эта реакция сопровождается поглощением энергии (Базаров, 1991). Довольно низкие концентрации SO_4^{2-} в растворе наших опытов позволяют также отказаться от предположения, что окисление метана осуществляется сульфатредуцирующими бактериями. Прокариоты метаногенов и метанотрофов известны с архея (Hathaway, 1968; Matsumoto, 1990; Саввичев и др., 2011), когда в гидросфере отсутствовали соединения с кислородом (Вернадский, 1967). Поэтому для окисления CH_4 в анаэробных условиях, по предположению автора данной статьи, прокариоты научились добывать кислород за счёт разложения воды. В дальнейшем эту методику получения кислорода переняли у них цианобактерии и

растения (Вернадский, 1967). Можно предположить, что в наших опытах бактериальные сообщества для создания биогенного углеродистого вещества используют не только энергию окисления метана, а также энергию образования конечного продукта карбоната. Энергия Гиббса окисления метана до CO_2 – 394,4 кДж/моль и H_2O – 228,6 кДж/моль, а получение кристаллического кальцита – 1127,2 кДж/моль (Базаров, 1991), поэтому в клетках бактерий происходит полный цикл окисления метана до образования карбоната. В солевом составе вод Мирового океана содержание катионов кальция в три-четыре раза меньше, чем магния (Тимофеев, 1982). Такой состав воды, по мнению многих исследователей, не изменялся в течение сотни миллионов лет (Тимофеев, 1982). Почему же для создания современных карбонатных построек (Nathaway, 1968; Шнюков и др., 1995; Von Rad et al., 1996; Kodina et al., 2001; Novikova et al., 2015; Лысенко, Цельнович, 2017), гераклитов (Лысенко, 2014) и оксфордских метанолитов археи и прокариоты используют в основном кальцит, иногда магнезиальный кальцит и очень редко доломит (Шнюков и др., 1995). Состав морской воды это не объясняет. Возможно, это связано с энергетической причиной. Энергия Гиббса образования молекулы CaCO_3 (1128 кДж/моль) несколько выше формирования MgCO_3 (1029 кДж/моль) (Базаров, 1991). Магний мог использоваться бактериальным сообществом в моменты значительных выбросов метана, когда в воде создавался дефицит катионов кальция для получения карбоната.

В кислой среде растворов наших опытов происходит образование карбонатного вещества предположительно в клетках прокариот, где живые организмы создают контролируемые щелочные условия (Wei Li, 2011). Возможно, разнообразие форм выделения новообразования карбоната, наблюдаемое в эксперименте, можно объяснить эластичностью и пластичностью мембраны клетки. Можно предположить, что усложнение морфологии карбонатных новообразований связано со срастанием аморфных кальцитовых частиц. Данный процесс дополнительно может контролироваться коагуляцией коллоидных систем клетки и кристаллографическими законами образования арагонита, а также преобразования его в кальцит с изменением объёма.

Во многих научных работах исследователи приводят довольно высокие скорости образования карбонатного материала сообществами прокариот (Заварзин, 2002; Зайцева и др., 2007; Саввичев и др., 2011; Леонова и др., 2015). В нашем третьем опыте сплошная цементация обломочного материала произошла за девять месяцев. Если просуммировать время подачи газа при проведении наших экспериментов, то полная продувка без перерывов составит 40 часов, то есть около двух суток. Эту скорость нельзя назвать мгновенной цементацией. Но, такие высокие возможности образования карбонатного цемента подтверждаются процессами, происходящими в прибрежной морской зоне бухты Ласпи (Лысенко, Шик, 2013). Возможно, в будущем с помощью искусственной продувки метана в среде метанотрофных и метаногенных прокариот можно будет создавать искусственные защитные рифы вдоль пляжных зон из искусственных конгломератов и песчаников. Технология цементации сообществами прокариот галечников и глинисто-песочных толщ в прибрежных морских зонах и на реках поможет удешевить и обезопасить строительство мостов, пирсов и прокладку транспортных сетей.

Интересные данные получены автором по результатам изучения pH среды раствора и его температурного режима. Повышенная кислотность среды с pH от 5,857 до 6,859 приводит к растворению карбонатного материала гераклитов и повышению концентрации катионов Ca^{+2} в растворе. Этот материал используется для создания новообразований бактериального кальцита, защищённого от растворения коллоидной плёнкой клетки. Можно предположить, что довольно кислая среда связана с малыми размерами посуды, в которой производились опыты. Такие микро-условия возможно существуют вблизи наростов бактериальных матов и в центральных частях современных

карбонатных построек Чёрного моря. Поэтому исследователи приводят описания совместного нахождения карбонатов и сульфидов (Medvedev, Makarikhin, 2008; Лысенко, Цельмович, 2017), хотя их формирование происходило в средах с разным pH. Кислотность наших растворов создают и контролируют бактериальные сообщества, что хорошо видно на графиках изменения pH и температуры (рис. 21, 23). Предположительно, кислая среда в наших опытах связана с наличием анионов HCO_3^- и органических кислот (Aloisi et al., 2000; Леонова и др., 2015). Медленный, плавный процесс понижения pH после окончания прокачки связан с незначительным повышением температуры на 0,3–0,5°. В растворе в это время происходят биохимические реакции с выделением энергии. Если бактериям не давать подкормку метаном в течение нескольких суток, то кислотность постепенно увеличивается и достигает 5,763. Возможно, растворяя гераклиты, сообщества прокариот питаются углеводородным веществом, созданном ещё в миоцене (Лысенко, 2014).

Загадкой является начало процесса поступления метана в раствор. В течение одной-пяти минут продувки происходит резкое падение pH на 0,5–0,9 единиц. С чем связаны такие скачки? Такие резкие изменения больше похожи на химическую реакцию нейтрализации раствора метаном, чем на биологический процесс, который дальше имеет спокойный характер. Подобные изменения в опытах описывали китайские исследователи, но у них возрастание происходило с 7,1 до 7,8 в течение двух суток (Taldenkova et al., 2005). Возможно, эти различия связаны с разными условиями или масштабами проведения опытов.

Дополнительным доказательством основной роли прокариот в изменении pH раствора являются результаты опытов с заменой его на свежую морскую воду. С каждой прокачкой уменьшается pH раствора и увеличивается время поглощения метана, что можно объяснить ростом численности колоний сообществ микроорганизмов.

Наши результаты экспериментов подтвердили, что гераклиты, оксфордские метанолиты и современные аутигенные карбонатные постройки, созданные сообществом прокариот, относятся к группе пород под названием микробиолиты (Brooks et al., 1984; Кузнецов, 2015). Образование карбонатного и органического вещества происходит за счёт переработки метана. Имеется некоторое внешнее сходство форм выделения карбоната с подобными строениями цианобактерий и сине-зелёных водорослей (Журавлева, 1964; Тимофеев, 1982; Саввичев и др., 2011). Правда, за короткий промежуток вышеописанного эксперимента_ бактериальные сообщества, сформированные в ёмкостях с обломками гераклитов, не создали карбонатных строений с микро полосчатыми и колломорфными текстурами, которые характерны для образований цианобактерий (Журавлева, 1964; Анисимов и др., 2012). Карбонатные постройки сообществ метанотрофных и метаногенных прокариот формируются на морском дне в зонах дегазации углеводородов, а создание строений цианобактерий происходит в хорошо освещённых зонах (Анисимов и др., 2012). Имеются значительные различия по образованию органики и карбоната за счет энергии Солнца и внутренней энергии Земли. Цианобактерии производят себе подобных в условиях непригодных для жизнедеятельности других организмов, а метанотрофные и метаногенные прокариоты создают вокруг зон дегазации оазисы жизни (Лысенко, 2014).

Выводы

Эксперимент доказал возможность создания разнообразных форм новообразований карбоната сообществом прокариот за счёт переработки метана. Имеется внешнее сходство полученных в ходе опытов образцов карбоната с морфологией метанолитов оксфорда, гераклитов и современных аутигенных построек морей и океанов, что подтверждает их родственные связи. Все они относятся к группе

пород под названием микробиолиты. Высокие скорости образования карбоната в серии экспериментов ставят под сомнение тысячелетние величины возраста современных карбонатных построек на дне морей и океанов, которые были получены некоторыми авторами по изотопному составу углерода (Хорн, 1972; Леин и др., 1975).

В наших опытах бактериальные плёнки обрастания имеют определенное сходство с описаниями подобных образований на поверхности современных карбонатных построек, поднятых с больших глубин Чёрного моря. Это дает право предположить, что за длительное геологическое время сообщество бактерий и архей по переработке метана не претерпели значительных эволюционных изменений. Внешняя морфология некоторых форм новообразований карбоната в наших опытах имеет некоторое сходство с материалом, создающим цианобактерии. Этот факт можно объяснить тем, что их создатели принадлежат к одному царству прокариот (Розанов, 2003). Следует отметить, что цианобактерии и сообщество метанотрофных бактерий и архей используют разные источники вещества и энергии для образования органики и карбоната. Образованные ими карбонатные строения созданы в разных палеогеографических условиях.

При современных исследованиях дна морей и океана методами сейсморазведки выделяют многочисленные зоны повышенной трещиноватости с выходами флюидов углеводородов. Обследование части из них показало, что обычно рядом с покмарками находятся бактериальные маты и аутигенные карбонатные постройки (Suess et al., 1985; Mazzini et al., 2004; Леин, 2005; Лысенко, Цельмович, 2017). Как известно, благодаря деятельности метанотрофных архей по переработке углеводородов в карбонат и органическое вещество, значительно уменьшается поступление метана в атмосферу и гидросферу. Подобные процессы их защиты происходили в прошлом, о чём свидетельствуют находки подобных карбонатных образований гераклитов и оксфордских метанолитов в отложениях мезозоя и кайнозоя.

У автора были очень ограниченные технические возможности в организации и проведении опытов. Было бы целесообразно продолжить их на более высоком лабораторно-аналитическом уровне, используя уникальный исходный материал из неогеновых метанолитов, какими являются гераклиты. Дальнейшие работы должны быть направлены на изучение образования карбонатного вещества в анаэробных и аэробных условиях при изменении показателей температуры, давления, солёности и объёмов экспериментальной посуды. Необходимо выяснить, с какими химическими и органическими образованиями связана кислая среда раствора. Применение современных методов меченых изотопов, позволит установить этапы образования карбонатов и их связь с созданием органического вещества.

Дальнейшие опытные работы по изучению образованию карбонатного вещества сообществами прокариот за счёт переработки метана позволит разработать методику цементации рыхлых осадков в морях, океанах и реках. Биогенная цементация в будущем позволит создавать искусственные рифы вдоль пляжных зон и упростить строительство на иловых отложениях.

Список литературы

1. Анисимов А.Ю., Анисимова С.А., Титоренко Т.Н. Палеонтология докембрия. Фитолиты (строматолиты и микрофитолиты). – Иркутск: Иркутский университет, 2012. – 118с.
2. Базаров И.П. Термодинамика. – М.: Высшая школа, 1991. – 376 с.
3. Вернадский В.И. Биосфера. – М.: Наука, 1967. – 376 с.
4. Вологдин А.Г. Геологическая деятельность микроорганизмов // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1947. – № 3. – С. 19–36.
5. Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии. – М.: ГЕОС, 2001. – 500 с.
6. Герасименко Л.М., Гончарова И.В., Жегалло Е.А., Заварзин Г.А., Зайцева Л.В., Орлеанский В.К., Розанов А.Ю., Ушатинская Г.Т. Процесс минерализации

- (фосфатизации) нитчатых цианобактерий // Литология и полезн. ископаемые. – 1996. – № 2. – С. 208–214.
7. Геворкьян В.Х., Бураков В.И., Исагулова Ю.К. Газовыделяющие постройки на дне северо-западной части Черного моря // Докл. АН УССР. – 1991. – №4. – С. 80–85.
 8. Жмур С.И., Горленко В.М., Герасименко Л.М. Сравнительная морфология современных и древних земных бактериальных организмов и микрофоссилий из углеродистых метеоритов // Микробиология. – 1999. – Т. 68. – № 6. – С. 838–844.
 9. Журавлева З.А. Онколиты и катаграфии рифей и нижнего кембрия Сибири и их стратиграфическое значение. – М.: Наука, 1964. – 75 с.
 10. Заварзин Г.А. Микробный геохимический цикл кальция // Микробиология. – 2002. – Т. 71. – № 1. – С. 5–22.
 11. Зайцева Л.В., Орлеанский В.К., Алексеев А.О., Ушатинская Г.Т., Герасименко Л.М. Трансформация карбонатных минералов в цианобактериальном мате при лабораторном модулировании // Микробиология. – 2007. – Т.76. – № 3. – С. 390–404.
 12. Земская Т.И., Шубенкова О.В., Максименко С.Ю. и др. Структура желеобразных матов в районе приповерхностного залегания газогидратов структуры Санкт-Петербург (Средний Байкал) // Геология морей и океанов: Материалы 19 Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – 2011. – Т.2. – С. 42–43.
 13. Иванов М.В., Поликарпов Г.Г., Лейн А.Ю. и др. Биохимия цикла углерода в районе метановых выделений Черного моря // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 320, №5. – С. 1235–1240.
 14. Исаченко Б.Л. О биогенном образовании карбоната кальция // Микробиология. – 1948. – Т. 17. – С. 118–125.
 15. Крылов А.А., Хлыстов О.М., Земская Т.И., Минами Х. и др. Формирование аутигенных карбонатов в грязевых вулканах озера Байкал // Геохимия. – 2008. – № 10. – С. 1051–1062.
 16. Кузнецов В.Г. Литология микробиолитов // Вестник РАН. – 2015. – Т. 85. – № 12. – С. 1092–1102.
 17. Леин А.Ю., Логвиненко Н.В. Сулержинский Л.Д. и др. Об источнике углерода и возрасте диагенетических карбонатных конкреций Калифорнийского залива // Литология и полезные ископаемые. – 1975. – №1. – С. 23–35.
 18. Леин А.Ю. Потоки метана из холодных метановых сипов Черного и Норвежского морей: количественные оценки // Геохимия. – 2005. – №4. – С. 138–159.
 19. Леонова Л.В., Кузьмина Л.Ю., Рябова А.С., Симакова Ю.С., Главатских С.П., Червяцова О.Я. Современные конкреции: Минералогические исследования и экспериментальный подход. Эксперименты по осаждению карбонатов с помощью бактериальных сообществ. Част 2. // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. – 2015. – № 10 (250). – С. 45–51.
 20. Лукин А.Е., Лысенко В.И., Лысенко Н.И., Наумко И.В. О происхождении гераклитов // Геолог Украины. – 2006. – №3. – С. 23–39.
 21. Лысенко В.И., Шик Н.В. Современные процессы образования карбонатов, связанных с углеводородной дегазацией в бухте Ласпи (Южный берег Крыма) // Пространство и Время. – 2013. – № 2 (12). – С. 151–158.
 22. Лысенко В.И. Перспективы поиска месторождений нефти и газа в Юго-западном Крыму по результатам изучения палеодегазации неогена и геологии региона // Пространство и Время. – 2014. – №2(16). – С. 234–243.
 23. Лысенко В.И., Цельмович В.А. Результаты изучения минералогии материала бактериальных карбонатных палеопостроек миоцена из зон глубинной палеодегазации (Юго-западный Крым) [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. – 2017. – Т. 14. – Вып. 1:

- Крымоведение: пространство и время Крыма. – Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov_e-ast14-1.2017.11.
24. Саввичев А.С., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф. и др. Микробные процессы циклов углерода и серы в Карском море // Океанология. – 2011. – Т. 50. – № 6. – С. 942–957.
25. Розанов А.Ю. Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы // Палеонтол. журн. – 2003. – № 6. – С. 41–49.
26. Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. Бактериальная палеонтология // Вестн. РАН. 1997. – Т.67. – № 3. – С. 35–39.
27. Тимофеев Б.В. Микрофитофоссилии раннего докембрия. – Л.: Наука. 1982. – 128 с.
28. Хорн. Р. Морская химия (структура воды и химия гидросферы). – М.: Мир, 1972. – 400 с.
29. Шнюков Е. Ф., Соболевский Ю.В., Кутный В.А. Необычные карбонатные постройки – вероятное следствие дегазации недр // Литология и полезные ископаемые Мирового океана. – 1995. – № 5. – С. 451–461.
30. Шнюков Е. Ф., Кутный В.А., Маслаков Н.А. Шнюкова Е. Е. К минералогии карбонатных образований газовых источников Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2006. – № 2. – С. 69–81.
31. Aharon P. Microbial processes and products fueled by Hydrocarbons at submarine seeps // Microbial sediments. Riding R.E. and Awramic S.M. (Eds). – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. – P. 270–281.
32. Allwood A.C., Walter M.R., Kamber B.S., Marshall C.P., Burch I.W. Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia // Nature. – 2006. – V. 441. – P. 714–717.
33. Aloisi G., Pierre C., Rouchy J.-M. et al. Methane related authigenic carbonates of eastern Mediteranian Sea mud volcanoes and their possible relation to gas hydrate destabilization // Earth and Planet. Science Letters. – 2000. – V. 184. – P. 321–328.
34. Brooks J.M., Kennicutt M.C., Fry R.R., McDonald T.J. Thermogenic Gas Hydrates in the golf of Mexico // Science. – 1984. – V. 225. – P. 409–411.
35. Burne R.V., Moore L.S. Mikrobiolites: Organosedimentary Deposits of Bentic Microbial Communities // Palaios. – 1987. – № 3. – pp. 241–254.
36. Fuex A.N. The use of stable carbon isotopes in hydrocarbon exploration // J. Geochim. Explor. – 1977. – V. 7. – P. 155–198.
37. Hathaway J.C., Degens E.I. Methane derived marine carbonate of pleistocene age // Science. – 1968. – V. 165. – P. 690–692.
38. Kodina L.A., Tokarev V.G., Vlasova L.N., Pribylova T.N. Carbonate minerals ikaite and glendonite and carbonate nodules in Holocene Kara Sea sediments: geological and isotopic evidence // Rep. Pol. Mar. Res. – 2001. – V. 393. – P. 189–196.
39. Mazzini A., Ivanov M.R., Pamell J. et all. Methane-related authigenic carbonates from the Black Sea // Mar. Geol. – 2004. – V. 212. – P. 153–181.
40. Matsumoto R. Vuggy Carbonate Crust Formed by Hydrocarbon Seepage on the Continental Shelf of Baffin Island Noreast Canada // Geochem.J. – 1990. – V.24. – P. 143–158.
41. Medvedev P.V., Makarikhin V.V. Early Precambrian stromatolite assemblages of the Baltic Shield // Geobiology of Stromatolites. Intern. Kalkowsky-Symposium Gottingen, October 4-11, 2008. Abstract Volume. – Gottingen: Universitatsverlag Gottingen. 2008. – P. 99–100.
42. Novikova S.A., Shnyukov Y.F, Sokol E.V., Kozmenko O.A., Semenova D.V., Kutny V.A. A methane-derived carbonate build-up at a cold seep on the Crimean slope, north-western Black Sea. Marine Geology. – 2015. – № 363. – pp. 160–173.
43. Schubert C.J., Nürnberg D., Scheele N. et al. ¹³C isotope depletion in ikaite crystals: evidence for methane release from the Siberian shelves? // Geo-Marine Letters. – 1997. – V. 17. – P. 169–174.

44. Sibuet M., Olu K. Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold seep communities at active and passive margins // *Deep-Sea Research*. – 1998. – V. 45. – P. 517–567.
45. Suess E., Carson B., Ritger S.D. et al. Biological communities at vent sites along the subduction zone off Oregon // *Bulletin of the biological Society of Washington*. – 1985. – V. 6. – P. 475–484.
46. Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A. et al. Postglacial to Holocene history of the Laptev Sea shelf as reflected in molluscan, ostracodal, and foraminiferal faunes // *Global and Planetary Change*. – 2005. – № 4. – P. 223–251.
47. Tianfu X., Kegi B., Hailong T., Yuging C. Laboratory experiment and numerical simulation on authigenic mineral formation induced by seabed methane seeps // *Marine and Petroleum Geol.* – 2017. – Vol. 88. – P. 950–960.
48. Von Rad U., Rosch H., Berner H. et al. Authigenic carbonates derived from oxidized methane vented from the Makran accretionary prism of Pakistan // *Mar. Geol.* – 1996. – V. 136. – P. 55–77.
49. Wei Li, Li-Ping Liu, Peng-Peng Zhou, Long Cao, Long-Jiang Yu, and ShiYun Jiang. Calcite precipitation induced by bacteria and bacterially produced carbonic anhydrase. *Research Articles Current Science*. – 2011. – V. 100. – № 4. – pp. 502–508.

AN EXPERIMENT ON THE REVIVAL OF COMMUNITIES OF ARCHAEA AND MIOCENE BACTERIA FROM HERACLITES

Lysenko V.I.

Sevastopol Branch of Lomonosov Moscow State University, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: niagara_sev@mail.ru

The article presents the results of experimental work on the revitalization of prokaryotic communities from Miocene carbonate formations called heraclites. Experiments have shown that the formation of organic and carbonate substances occurs due to the processing of methane by the community of bacteria and archaea. Changes in temperature and pH during methane pumping indicate biochemical processes in solution. The formation of bacterial carbonate material occurs in the acidic medium of the solution with a pH from 5.750 to 6.674. Bacterial film protects carbonate neoplasms from dissolution. The variety of forms of bacterial carbonate, which have an external similarity with the morphology of modern carbonate structures of the seas and oceans, heraclites and Oxford methanolites, is surprising. The high growth rates of bacterial carbonate in experiments, cast doubt on the millennial age of modern carbonate structures at the bottom of the seas and oceans. The color form and zonality of the Miocene bacterial overgrowing is similar in appearance to the modern one in the Black Sea, which confirms the hypothesis of their minor evolutionary changes. It is advisable to continue at a higher analytical level experimental work on the study of microbial communities from Miocene heraclites.

Keywords: bacteria; archaea; methanotrophic and methanogenic prokaryotes; chemosynthesis; bacterial mats; carbonate buildings; experiment; methane; carbonate neoplasms; Miocene; Heraclitus.

Поступила в редакцию 17.09.2019 г.