

УДК 552.551.217(477.75)

DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-4-497-511

## Гидротермально-бактериальные постройки с фауной брахиопод на поверхности Тессельского палеовулкана (Южный берег Крыма)

В. И. Лысенко<sup>1</sup>, С. А. Садыков<sup>2</sup>, Т. В. Михайличенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Филиал Московского государственного университета, 299009, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7, e-mail: niagara\_sev@mail.ru

<sup>2</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 456317, г. Миасс, e-mail: sadykov@mineralogy.ru

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр “Морской гидрофизический институт РАН”, 299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2, e-mail: mhi.tamara@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.01.2022 г., принята к печати 24.04.2022 г.

**Объект исследования.** Впервые публикуемые результаты исследования гидротермально-бактериальных карбонатных построек и банок брахиопод на поверхности Тессельского палеовулкана. **Методы.** Изучение петрографических шлифов проводилось с помощью микроскопа Olympus BX 5 с фотокамерой Olympus DP 12. Геохимические анализы выполнялись методом ICP-MS. Изотопный состав углерода определялся масс-спектрометрическим методом на приборе Deltaplus Advantage. **Результаты.** Данные изучения геологии, геохимии и изотопного состава подтверждают существование симбиоза между брахиоподами и простейшими. Первичное образование органического вещества и карбоната происходило за счет переработки палеофлюидов бактериями и археями. Норийский возраст палеовулканизма установлен по находкам брахиопод *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys и аммонита *Megaphyllites insectus* (Mojsisovics). **Выводы.** По геологическим признакам образования на поверхности Тессельского палеовулкана относятся к карбонатам метанового просачивания (hydrocarbon seeps-carbonate) и их кратко можно называть метанолитами триаса.

**Ключевые слова:** археи, прокариоты, палеофлюиды, карбонатные гидротермально-бактериальные постройки, геохимия, изотопный состав, метан, метанолиты, карбонаты просачивания углеводородов

### Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0003 “Оперативная океанология” и в соответствии с планом по государственной бюджетной теме Института минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН “Минералого-геохимическая эволюция и металлогения гидротермальных, аутигенных и гипергенных рудообразующих систем” № АААА-А19-119061790049-3

## Hydrothermal-bacterial structures with a brachiopod fauna on the surface of Tessel paleovolcano (South coast of Crimea)

Vitalii I. Lysenko<sup>1</sup>, Sergei A. Sadykov<sup>2</sup>, Tamara V. Mikhailichenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Branch of M.V. Lomonosov Moscow State University, 7 Sevastopol's Heroes st., Sevastopol 299009, Russia, e-mail: niagara\_sev@mail.ru

<sup>2</sup>South Ural Federal Research Center for Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Miass 456317, Russia, e-mail: sadykov@mineralogy.ru

<sup>3</sup>Federal Research Center Marine Hydrophysical Institute of RAS, 2 Kapitanskaya st., 299011 Sevastopol, Russia, e-mail: mhi.tamara@yandex.ru

Received 20.01.2022, accepted 24.04.2022

**Research subject.** For the first time, the results of a study of hydrothermal-bacterial carbonate structures and a shell bank of brachiopods on the surface of the effusive sequence of the Late Triassic Tessel paleovolcano are presented. **Methods.** Petrographic thin sections were studied using an Olympus BX 5 microscope with an Olympus DP 12 camera. Geochemical in-

**Для цитирования:** Лысенко В.И., Садыков С.А., Михайличенко Т.В. (2022) Гидротермально-бактериальные постройки с фауной брахиопод на поверхности Тессельского палеовулкана (Южный берег Крыма). *Литосфера*, 22(4), 497–511. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-4-497-511>

**For citation:** Lysenko V.I., Sadykov S.A., Mikhailichenko T.V. (2022) Hydrothermal-bacterial structures with a brachiopod fauna on the surface of Tessel paleovolcano (south coast of Crimea). *Lithosphere (Russia)*, 22(4), 497–511. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-4-497-511>

© В.И. Лысенко, С.А. Садыков, Т.В. Михайличенко, 2022

vestigations were performed according to the conventional methodology by an inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). The isotopic composition of carbon was determined by isotope ratio mass spectrometry (IRMS) by a DeltaPlus Advantage instrument. The mass spectrometer was paired with an EA Flash1112 analyzer and a TC/EA convector. When measuring, the NBS-19, NBS-18, and IAEA-C-3 standards were used. **Results.** The data obtained on the geology, geochemistry, and isotopic composition of the studied materials confirm the existence of a symbiosis between brachiopods and protozoa. The primary formation of organic matter and carbonate of bacterial structures occurred due to the processing of paleofluids by the community of bacteria and archaea. These organisms created carbonate, sulfide and organic matter in a suboxide environment of hydrogen sulfide and methane. The biocenosis of the shell bank of brachiopods was characterized by a poor taxonomic composition and a high biological productivity. The formation of a shell bank of brachiopods with bacterial carbonate edifices took place during the period of volcanic activity and continued during breaks in eruptions. The results of geochemistry and the carbon isotopic composition of the carbonate of bacterial buildups confirm the deep nature of the paleofluids. The Norian age of paleovolcanism was determined from finds on the surface of the terrigenous-volcanic sequence of brachiopods *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys and ammonite *Megaphyllites insectus* (Mojsisovics). **Conclusions.** According to geological features, the material of the shell bank of brachiopods with bacterial carbonate structures on the surface of the Tessel paleovolcano belongs to the ancient hydrocarbon seeps-carbonate. Based on their genesis and formation material, these formations should be referred to as Triassic methanoliths. Signs of allocation of similar formations in other time intervals and regions are given. Emissions of fluids with hydrogen sulfide and methane by the Tessel paleovolcano in the Late Triassic may have been related to the causes of the “global extinction”.

**Keywords:** *archaea, prokaryotes, paleofluids, carbonate hydrothermal-bacterial edifices, geochemistry, isotopic composition, methane, methanoliths, hydrocarbon seeps-carbonates*

#### Funding information

The work was carried out within the framework of the state assignment on the topic No. 0555-2021-0003 “Operational Oceanology” and in accordance with the plan for the state budget topic of the Institute of Mineralogy of the South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the RAS “Mineralogical and geochemical evolution and metallogeny of hydrothermal, authigenic and supergene ore-forming systems” No. AAAA-A19-119061790049-3

#### Acknowledgements

The authors are grateful to V.V. Maslennikov, Professor and Corresponding Member RAS, V.V. Arkadiev, Professor and Dr. Sci (Geol.-Mineral.), and Yu.S. Repin, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) for their advice and assistance in the study of the breeds and the definition of the fauna.

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня большое внимание уделяется проблемам глобального потепления, связанным с увеличением парниковых газов в атмосфере. Значительную роль в этих процессах играет поступление метана и углекислого газа из недр (Judd et al., 2002). Оно связано с флюидами разгрузки действующих вулканов, рифтовых систем и холодных углеводородных просачиваний на дне морей и океанов (Aharon, 1994; Judd et al., 2002). К таким выходам углеводородов приурочены оазисы жизни, где микроорганизмы являются “санитарами” по защите атмосферы и гидросферы от этих газов (Arquit, 1990). За счет процессов хемосинтеза сообщества микроорганизмов перерабатывают метан, сероводород и другие флюиды в сульфаты, карбонаты, сульфиды и органическое вещество. Имеются минералогические и морфологические различия в постройках около горячих гидротермальных источников и холодных углеводородных просачиваний. Это связано с составом флюидов и их температурой (Campbell, 2006). Обычно рядом с сульфидными постройками “черных курильщиков” отмечаются поля бактериальных матов, изучению которых уделяется недостаточно внимания (Богданов и др., 2006). Их питание осуществляется за счет просачи-

вания остывших углеводородных флюидов. Поэтому вблизи центров действующих вулканов на морском дне совместно существуют постройки горячих источников и холодного углеводородного просачивания (Леин, 2004). Внешнее описание таких строений приводится при обследовании склонов вулкана Пийпа с помощью глубоководного обитаемого аппарата “Мир” (Богданов и др., 2006). В образовании построек из сульфидов и карбонатов участвуют сообщества архей и бактерий. После прекращения поступления флюидов “мертвые” сульфидные и карбонатные строения становятся памятниками этим процессам (Ames et al., 1993). Изучению таких образований в древних породах посвящено много научных работ, поскольку такие исследования имеют значительные преимущества перед осмотром современных аналогов на больших глубинах в океанах (Campbell, 2006).

Подобные разнообразные по минеральному составу и морфологии гидротермально-бактериальные образования были обнаружены В.И. Лысенко на поверхности Тессельского осадочно-вулканогенного комплекса андезитов верхнего триаса (Лысенко, 2019а, б). Морфология и минералогия бактериальных построек зависит от состава и температур палеофлюидов. Наиболее высокотемпературные сульфидно-карбонатные образования

трубчатой и лепешковидной форм были созданы сообщества прокариот и архей на поверхности лав. “Жильные” плоские кварц-сульфид-карбонатные и карбонат-кварц-сульфидные гидротермально-бактериальные образования встречаются на поверхности туфовой толщи (Лысенко, 2019). С “холодным” диффузионным просачиванием углеводородных флюидов связано формирование карбонатного бактериального обрастания и создание органического вещества для питания брахиопод и другой крупной фауны. Актуальность данной работы заключается в исследовании условий жизни вблизи флюидов углеводородного просачивания на поверхности палеовулкана.

Целью данной статьи является определение генезиса и условий образования карбонатных гидротермально-бактериальных построек и ракушечной банки брахиопод на поверхности эффузивной толщи по результатам детального изучения их геологического строения, минералогии, геохимии и изотопного состава.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обнажения Тессельского осадочно-вулканогенного комплекса андезитов верхнего триаса являются самыми западными выходами эффузивных пород южной зоны Крымских гор. Они располагаются над пос. Тессели на южном склоне Главной гряды в интервале абсолютных отметок от 140 до 450 м. На площади около 2 км<sup>2</sup> было выполнено детальное геологическое картирование, результаты которых приведены в более ранних работах (Лысенко 2019а, б). При исследовании выходов эффузивных пород особое внимание уделялось пространственному положению палеопотоков лав, туфовой толще, их контактов с ракушечной банкой брахиопод и бактериальными обрастаниями. Во время выполнения работ геологического картирования был собран богатый материал по гидротермально-бактериальным палеопостройкам различной морфологии и разнообразной фауны. Он использовался для выполнения геохимических анализов. Из представительных образцов изготавливались полированные спилы, шлифы и аншлифы, которые изучались на микроскопе Olympus BX 5 с фотокамерой Olympus DP 12 в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс.

Геохимические анализы построек выполнялись по стандартной методике в лаборатории упомянутого выше Института минералогии на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP ELAN-9000 фирмы Perkin Elmer). Одна проба была отобрана из боковой части карбонатной постройки, а другая – из центральной зоны.

Для определения изотопного состава углерода в Институте минералогии использовался масс-спектрометрический метод измерения изотопных

отношений (IRMS) на приборе Deltaplus Advantage. Масс-спектрометр сопряжен с элементным анализатором EA Flash1112 и высокотемпературным конвектором TC/EA. Элементный анализатор и конвектор сопрягались с масс-спектрометром посредством ConFloIII. Проба предварительно взвешивалась. Ее масса составляла 100 мкг. Навеска упаковывалась в оловянный тигель, который помещался в автосамплер. Затем проба подавалась в элементный анализатор, где она сжигалась в потоке гелия с добавкой кислорода. Температура в процессе сжигания доходила до 1800°C. Полученная смесь газов разделялась в хроматографической колонке. Через интерфейс ConFloIII газ подавался в масс-спектрометр, где происходило измерение изотопных отношений. При измерении использовались стандарты NBS-19, NBS-18, IAEA-C-3. Ошибка измерения составляла меньше 0.15‰ VPDB. Было отобрано две пробы карбоната из разных участков бактериального обрастания и одна – из материала ракушек брахиопод. Кроме этого исследовался изотопный состав углеводородов из материала растворения в кислотах антраконита гидротермально-бактериальных построек и брахиопод. Для этой цели из центральных частей построек и банки брахиопод отбирались обломки антраконита и ракушки. Материал предварительно выдерживался в сушильном шкафу при температуре 200°C, а затем растворялся в соляной кислоте. После промывки в дистиллированной воде и просушки нерастворимый осадок использовался для анализов.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАКУШЕЧНОЙ БАНКИ БРАХИОПОД И ГИДРОТЕРМАЛЬНО-БАКТЕРИАЛЬНЫХ ПОСТРОЕК

Выходы магматических пород Тессельского осадочно-вулканогенного комплекса андезитов верхнего триаса являются самыми западными проявлениями вулканизма южной зоны Крымских гор. В полосе протяженностью около 3 км, приуроченной к южным склонам Главной гряды, было выявлено 35 выходов эффузивных пород. Они образовали три прерывистые субпараллельные зоны субширотного простирания: южную, центральную и северную (Лысенко, 2019а, б). Характерной особенностью эффузивного комплекса являются андезитовый состав и фациальное разнообразие вулканокластических пород. Они представлены лавами, кластолавами, лавобрекчиями, ксенотефрами, ксенотуфами и гиадокластами. Их образование связано с эксплозивными выбросами и лавовыми излияниями в подводной среде. Подобные породы описаны в других регионах (Hammond, 1990; Seliverstov et al., 1994). Детальная характеристика Тессельского вулканогенного комплекса андезитов верхнего триаса приводится

в более ранних работах одного из авторов статьи (Лысенко, 2019а, б).

Ракушечная банка брахиопод была обнаружена в западной части центральной зоны на восточном борту оврага Биюк-Дере. Здесь находится выход палеолав андезитов лав, перекрытых с двух сторон туфовой толщей. Ракушечная банка приурочена к западному контакту лавового палеопотока с толщей аквагенных ксенотуфов. На первичную высокую газонасыщенность туфового материала и лав указывают многочисленные обломки пемзы (витрокласты) и находки в них довольно крупных жезд и прожилков, выполненных кальцитом, халцедоном и антраконитом (Лысенко, 2019а, б). В 2 метрах от ракушечной банки брахиопод находится зона гидротермальной проработки пород, которая имеет почти вертикальные контакты и меридиональную ориентацию. В этой зоне породы окварцованы и пиритизированы. В них отмечаются многочисленные разноориентированные карбонат-кварцевые прожилки с пиритовой минерализацией. Пиритовая минерализация в гидротермальных породах имела полигенную природу и была представлена фрамбоидами в витрокластах, пленками вокруг некоторых литокластов, рудокластами, крупными кристаллами кубической формы в карбонат-кварцевых прожилках и многочисленными мелкими вкраплениями в основной массе.

Ракушечная банка брахиопод представляет собой холмообразную возвышенность площадью около 10 м<sup>2</sup>. Она является своеобразным свалом крупнообломочного материала слабо-окатанных андезитов и гидротермально измененных пород. Эти глыбы размером до 0.5 м цементированы ракушечным материалом брахиопод и карбонатом гидротермально-бактериальных построек. Крупнообломочный материал имеет резкие контакты с карбонатной цементной массой, которая содержит брахиоподы. Внешняя часть цемента на контакте с обломками представлена материалом бактериального обрастания. Некоторые ее части имеют сходство с полосчатыми “строматолитами”. Наружная поверхность бактериальных построек обладает бугристым строением (рис. 1а), и иногда на ней отмечаются скульптуры трубчатых червей, выполненных карбонатом (рис. 1б). Бактериальные карбонатные обрастания имеют расплывчатые внутренние границы с раковинами брахиопод, которые формируют основную часть банки (рис. 1в). В центральной части ракушечной банки часто встречаются подобные бактериальные строения, которые характеризуются линзовидной “жильной” формой. У них с двух сторон наблюдаются нерезкие контакты, которые являются своеобразной формой нарастания на поверхности ракушек брахиопод (см. рис. 1в). Такие постройки имеют мощность от 2 до 30 мм, протяженность – до 100 мм. Они характеризуются сферолитовыми, микрополосчатыми

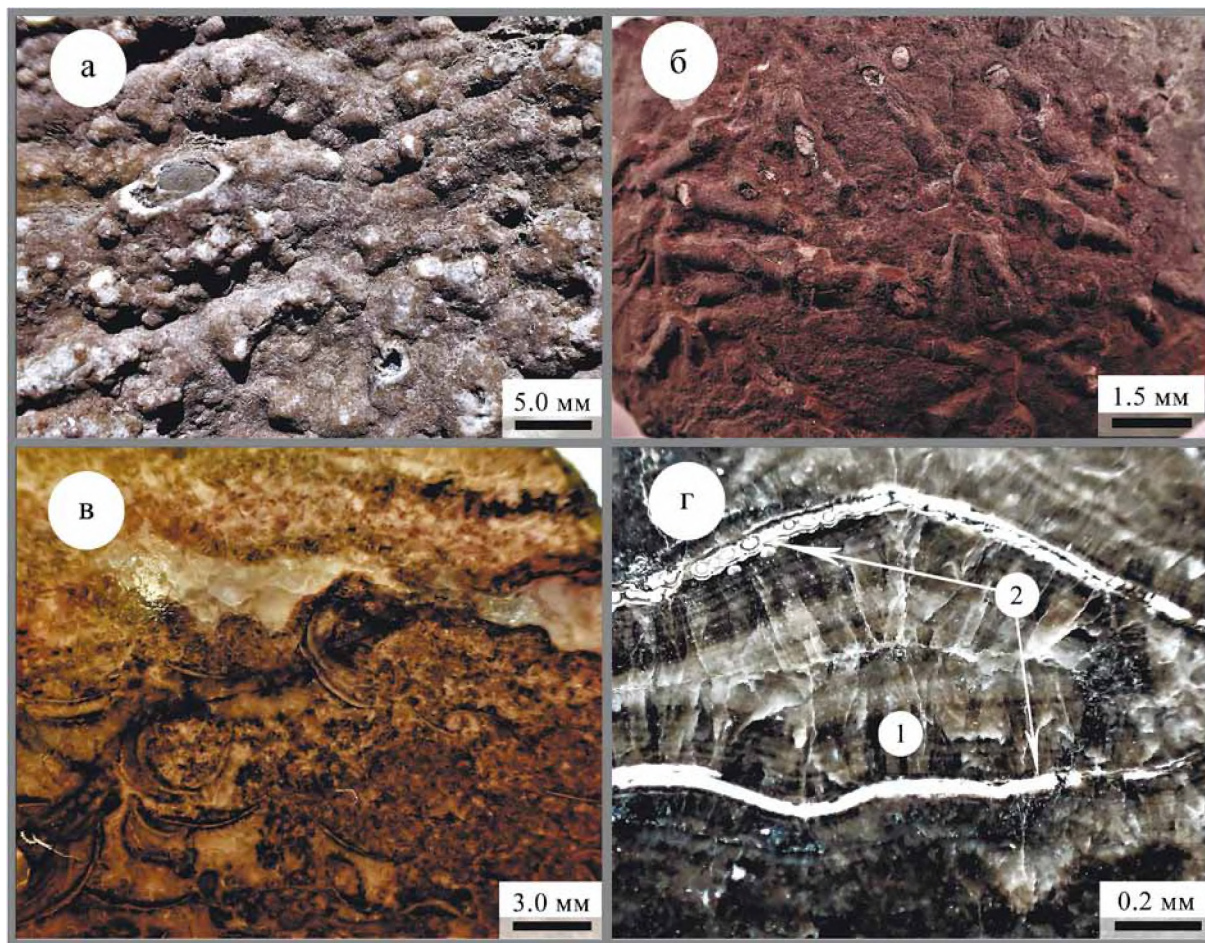
(рис. 1г, 2а) и почковидно-колломорфными текстурами, а в отдельных местах отмечаются фрагменты друзовых, гребенчатых (рис. 2б) и фрамбоидальных текстур. Колломорфная и полосчатая текстуры связаны с чередованием кальцита и антраконита, а иногда в них отмечаются отдельные прослои кварца и халцедона. В плоскости, перпендикулярной слоям, микрополоски антраконита и кальцита имеют пятнистый рисунок сферолитовых срастаний.

Халцедон и кварц иногда встречаются в центральной части “жильных” бактериальных построек, где образуют друзовые полости линзовидной формы. Редкая сульфидная минерализация представлена фрамбоидами пирита, которые имеют равномерно глобулярную структуру (рис. 2в). Фрамбоиды пирита подчеркивают полосчатую текстуру построек, а некоторые из них наблюдаются в секущих трещинах. В карбонатном материале “жильных” построек в отдельных местах содержится пепловый материал вулканического стекла (рис. 2г).

Ракушечный материал брахиопод в цементной карбонатной массе составляет от 60 до 80%. В породе они создают плотные шаровидные скопления размером до 3.0 см, реже наблюдаются отдельные раковины (рис. 3а). Эти образования имеют текстуру репчатого лука. По краям находятся крупные раковины, которые обрастают более мелкие в центральной части. Таких лепестков раковин в некоторых образованиях бывает больше десяти. Размеры ракушек уменьшаются от 30.0 до 2.5 мм (рис. 3б). В некоторых шаровых скоплениях в центре находится несколько мелких зародышей. Раковины тонкостенные и довольно плотно прилегают друг к другу. Их поверхность покрыта коричневыми блестящими сросшимися пластинками, которые, предположительно, в прошлом имели хитиново-фосфатный состав (рис. 3в). На нижних поверхностях створок отмечаются черные пятна органического вещества. На 10 см<sup>2</sup> находится до 20 ракушек. Значительная их часть сильно сдавлена, что связано с тесным соседством. Возможно, в строении биогерма принимают участие несколько видов брахиопод, но из-за сдавленности и сплошной карбонатной цементации трудно определить их видовой состав. По данным исследований, выполненных кандидатом геол.-мин. наук Ю.С. Репиным, значительную часть брахиопод можно отнести к виду *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys (см. рис. 3в), возраст которых датируется норийским веком (Дагис и др., 1959). Такой временной интервал подтверждается находкой в толще аммонита *Megaphyllites insectus* (Mojsisovics), определение которого выполнил доктор геол.-мин. наук В.В. Аркадьев из СПб ГУ (Астахова, 1972).

В карбонатной цементной массе отсутствует перетертый детритовый материал брахиопод и другой фауны. В нем были обнаружены единичные га-





**Рис. 1.** Строение карбонатной гидротермально-бактериальной постройки.

а – бугристое строение внешней стенки; б – минерализованные скульптуры трубчатых червей на наружной поверхности; в – бактериальное обрастание ракушечного материала брахиопод; г – микрополосчатая (1) и сферолитовая (2) текстуры постройки. Все фотографии в статье выполнил В.И. Лысенко.

**Fig. 1.** Structure of a carbonate hydrothermal bacterial edifice.

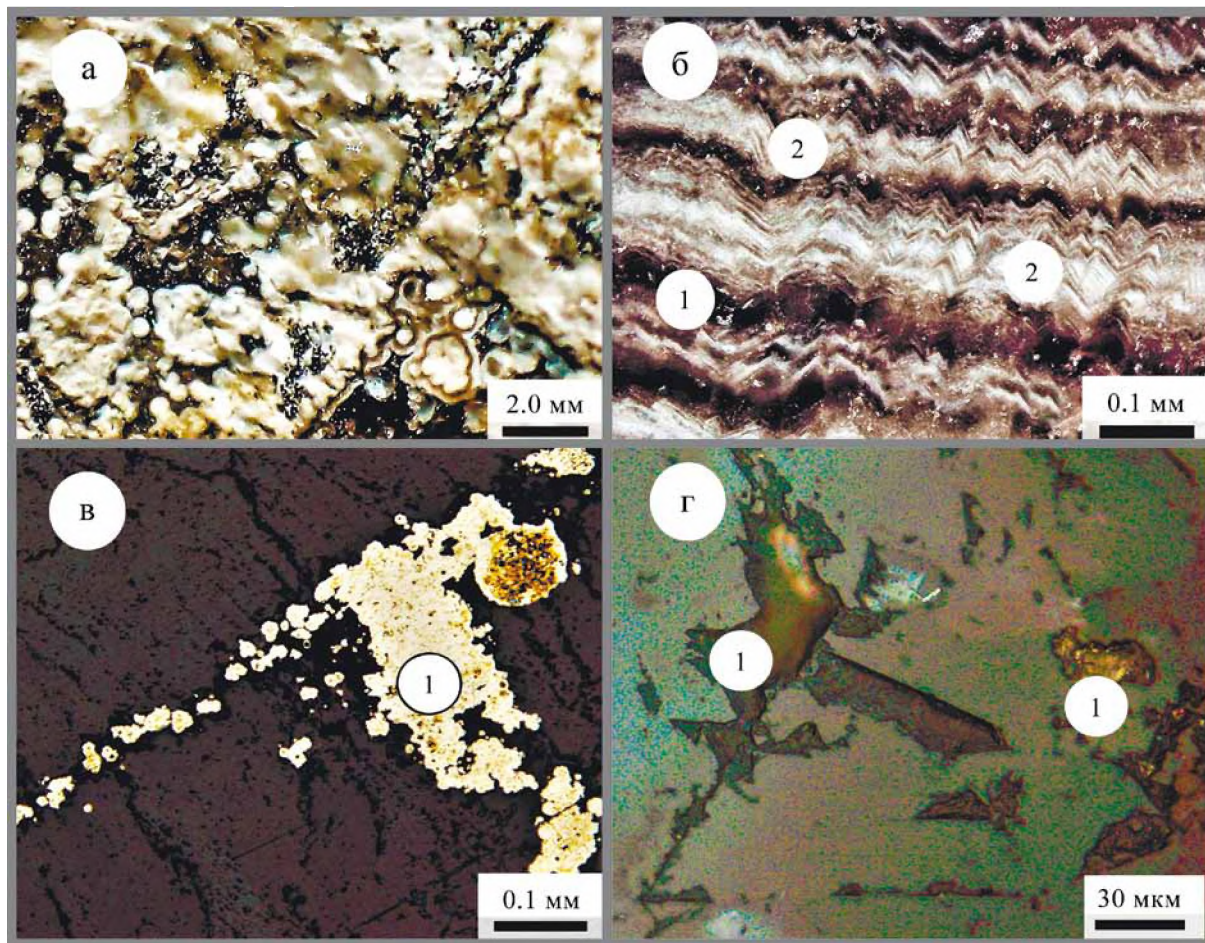
а – tuberosity structure of the outer wall; б – mineralized tubeworm sculptures on the outer surface; в – bacterial overgrowth of brachiopod shell material; г – microbanded (1) and spherulitic (2) textures of the structure. Photos in the article were made by V.I. Lysenko.

строподы, створки моллюска гребешка и губки с конусообразной формой стаканов. Моллюски имеют ушки, а слабовыпуклые раковины покрыты четкой concentрической волнистой скульптурой и обладают размерами до 1.3 см (рис. 3г). По размерам и внешней морфологии они имеют сходство с описанием гребешков *Bathypecten vulkani*, которые были обнаружены вблизи “черных курильщиков” на Восточно-Тихоокеанском поднятии в 1985 г. (Лобье, 1990).

При растворении в кислотах материала бактериальных построек и стяжений брахиопод на поверхности растворов наблюдалась маслянистая пленка с радужной побелалостью, а растворы приобретали черный или коричневый цвет. Через 2-3 часа на поверхности раствора оставалась тонкая радуж-

ная маслянистая пленка с запахом нефтепродуктов, а раствор становился прозрачным и бесцветным. Внизу на дне емкости находился нерастворимый осадок черного цвета, представленный высокомолекулярными смолами высокой плотности и сингенетическим рассеянным органическим веществом (биомаркеры). Подобные углеводороды содержатся в современных и древних “карбонатах просачивания” (Campbell, 2006). Легкие нефтепродукты и высокомолекулярные смолы в наших постройках являются продуктами глубинных гидротермальных флюидов (Слободский, 1981; Simoneit et al., 2004), а высокомолекулярное органическое вещество (биомаркеры) создано хемогенными микроорганизмами за счет переработки метана (Birgel, Peckmann, 2008).





**Рис. 2.** Внутреннее строение карбонатной гидротермально-бактериальной постройки.

а – сферолитовые образования карбоната в приполировке центральной части бактериальной постройки; б – гребенчатая текстура чередования антраконита (1) и кальцита (2); в – фрамбониды пирита (1) равномерно глобулярной структуры подчеркивают слоистость и отмечаются в секущих трещинах; г – пепловый материал вулканического стекла (1) в кальците постройки. Рис. 2б и 2г – в проходящем свете, а рис. 2в – в отраженном.

**Fig. 2.** Internal structure of a carbonate hydrothermal bacterial edifice.

а – spherulitic formations of carbonate in the polishing of the central part of the bacterial structure; б – comb texture of alternation of anthraconite (1) and calcite (2); в – pyrite framboids (1) of a uniformly globular structure emphasize layering and are noted in secant cracks; г – ash material of volcanic glass (1) in the calcite of the building. Fig. 2б and 2г in transmitted light, and Fig. 2в – in reflected light.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА

В наше время результаты геохимических исследований часто являются критериями, подтверждающими условия формирования, генезиса гидротермально-бактериальных построек и природу флюидов их образования. Пробы карбонатного материала из боковой части бактериальной постройки (Л-908) и из центра (ЛВ-880Б) с минерализацией фрамбонального пирита характеризуются довольно низкими содержаниями большинства химических элементов (табл. 1) в сравнении

с кларком карбонатных пород (Интерпретация..., 2001, с. 27, 28). В результатах анализов отмечаются некоторые различия. В карбонате из боковой части (Л-908) концентрации выше кларка характерны для Li, Sb, As, Tl, Ge, Cu, Mo и Ce, а в материале с сульфидами (ЛВ-880Б) – для Li, As и Ge. По абсолютным значениям большинство содержаний геохимических элементов в пробе из центральной зоны превышают данные опробования боковой (см. табл. 1).

Анализы проб карбонатных построек характеризуются низкими концентрациями редкоземельных элементов (РЗЭ) (см. табл. 1, рис. 4, 5). Их сумма составляет от 1.8 до 3.21 г/т. Для расчета ано-





**Рис. 3.** Строение ракушечной банки брахиопод.

а – расположение тонкого ракушечного материала брахиопод в цементной массе палеобиогермы, б – шаровидные скопления ракушек брахиопод, в – брахиоподы *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys, г – раковины гребешков, имеющих сходство с *Bathypecten vulkani*.

**Fig. 3.** The structure of a brachiopod shell jar.

а – location of thin shell material of brachiopods in the cement mass of the paleobioherm, б – globular clusters of brachiopod shells, в – brachiopod *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys, г – scallop shells resembling *Bathypecten vulkani*.

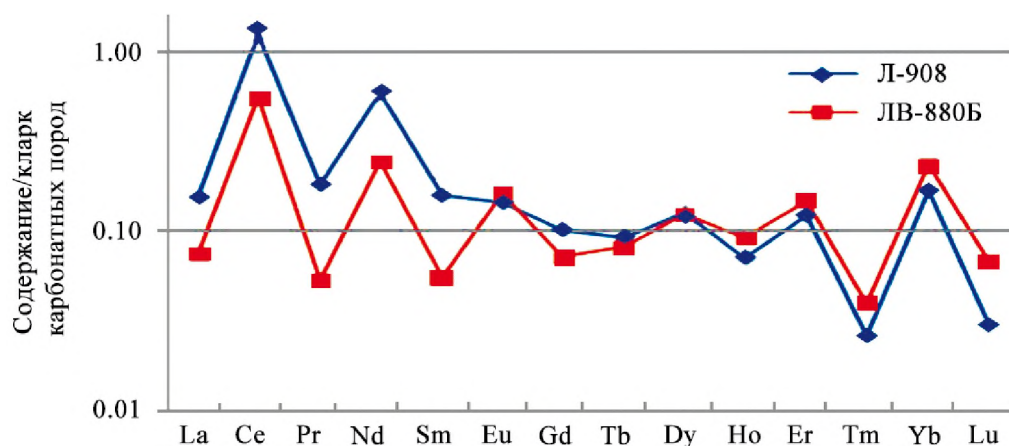
мальных содержаний европия и церия авторами использовались формулы:  $Eu^*_n = 2Eu_n / (Sm_n + Gd_n)$  и  $Ce^*_n = 2Ce_n / (La_n + Pr_n)$  (Интерпретация..., 2001; Shanks, 2001). Анализировались результаты вычислений с использованием нормализации по карбонатным породам и хондритам (Интерпретация..., 2001), в итоге наблюдались некоторые различия (см. рис. 4, 5). Содержания церия в анализах выше кларка карбонатных пород или приближается к этим значениям. Величины  $Ce^*_{n \text{ карб}}$ , нормализованные по карбонату, составляют 6.1 и 6.2. Более низкие их значения получены при нормализации по хондриту ( $Ce^*_{n \text{ хон}}$  1.04 и 0.95). Данные  $Eu^*_{n \text{ карб}}$  с нормализацией по карбонатным породам составляют 1.1 и 2.5, а по хондритам  $Eu^*_{n \text{ хон}}$  – 0.8 и 1.4 (см. рис. 4, 5).

Результаты геохимических исследований опираются на два анализа из разных зон постройки, что недостаточно для статистики обсчета результатов. Обычно для решения вопросов условий образования, генезиса, состава и природы флюидов необходимо иметь данные по анализам до десяти проб, что возможно будет выполнено в дальнейшем. Полученные результаты геохимических исследований не противоречат, а в значительной части подтверждают данные геологического строения и условия образования банки брахиопод с гидротермально-бактериальными постройками.

Наиболее убедительными аргументами связи формирования органического вещества и карбоната с процессами хемосинтеза прокариот являются данные анализов изотопного состава углерода, ко-

**Таблица 1.** Содержание литофильных, халькофильных и редкоземельных элементов из боковой части (Л-908) и центра (ЛВ-880Б) гидротермально-бактериальной постройки, г/т**Table 1.** Content of lithophile, chalcophile, and rare earth elements in hydrothermal-bacterial edifices, ppm

Элемент	Л-908	ЛВ-880Б	Кларк	Элемент	Л-908	ЛВ-880Б	Кларк	Элемент	Л-908	ЛВ-880Б	Кларк
Li	70.0	18.3	6.9	Cr	1.13	4.51	11.0	La	0.77	0.37	5.00
Rb	0.73	2.36	5.0	Mn	85.9	106	830.0	Ce	1.25	0.55	1.00
Sr	7.87	14.6	540.0	Sb	0.89	0.26	0.3	Pr	0.218	0.064	1.20
Cs	0.062	0.190	0.4	As	26.4	58.4	1.6	Nd	0.89	0.37	1.50
Ba	15.8	46.8	53.0	Pb	1.41	1.53	8.8	Sm	0.188	0.066	1.20
Sc	0.164	0.27	2.0	Bi	0.004	0.004	0.01	Eu	0.029	0.032	0.20
Y	0.24	0.42	20.0	Tl	0.142	0.008	0.1	Gd	0.100	0.071	0.99
Zr	1.28	2.81	20.0	Cd	0.074	0.046	0.4	Tb	0.016	0.014	0.17
Nb	0.12	0.53	0.3	Ge	0.42	0.18	0.1	Dy	0.093	0.091	0.73
Hf	0.034	0.092	0.4	Ga	0.52	0.95	2.6	Ho	0.016	0.021	0.23
W	0.008	0.008	0.5	Zn	14.1	16.0	22.0	Er	0.057	0.070	0.47
Th	0.014	0.024	1.8	Cu	13.9	4.66	12.0	Tm	0.006	0.009	0.23
U	0.036	0.33	2.3	Co	0.64	0.41	1.6	Yb	0.059	0.081	0.35
Ti	52.2	147	600.0	Mo	28.5	0.06	0.5	Lu	0.005	0.012	0.17
V	0.95	5.76	19.0	Ni	2.54	3.89	12.0				

**Рис. 4.** Распределение редкоземельных элементов в карбонатных гидротермально-бактериальных постройках. Нормализация по карбонатным породам (Интерпретация..., 2001).**Fig. 4.** Distribution of rare earth elements in carbonate hydrothermal-bacterial edifices. Normalization was carried out according to carbonate rocks (Interpretation..., 2001).

торые приведены в табл. 2. Более легким изотопным составом карбоната характеризуются полосчатые бактериальные постройки обрастания, а утяжеленным  $\delta^{13}\text{C}$  обладают ракушки брахиопод.

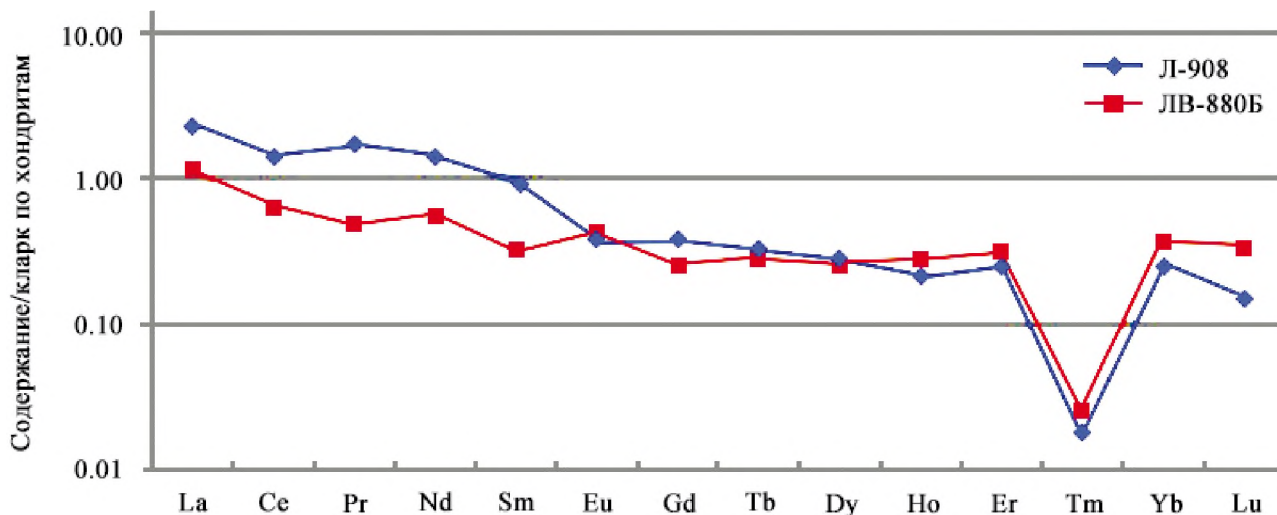
#### ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ РАКУШЕЧНОЙ БАНКИ БРАХИОПОД И ГИДРОТЕРМАЛЬНО- БАКТЕРИАЛЬНЫХ ПОСТРОЕК НА ПОВЕРХНОСТИ ЭФФУЗИВОВ

Вулканы выносят из недр химические элементы Zn, Cu, Mg, Ca, K, Fe, P, S, N, H и C, которые благоприятны для формирования живых клеток микро-

организмов (Мархинин, 1980). Поэтому во время активной вулканической деятельности и после извержений начинается бурная жизнь прокариот по переработке пеплового материала и летучих газовых компонентов. Особенно активно эти процессы протекают в водных толщах морей и океанов (Ames, 1993).

Доказательством глубоководных условий формирования лав и туфов Тессельского палеовулкана является литологический состав вмещающих пород таврической серии, представленных аргиллитами и глинистыми алевролитами. Глубоководность дополнительно подтверждается низкими концентрациями транзитных элементов Ti, V, Cr и Mn (см.





**Рис. 5.** Распределение редкоземельных элементов в карбонатных гидротермально-бактериальных постройках. Нормализация по хондритам (Интерпретация..., 2001).

**Fig. 5.** Distribution of rare earth chemical elements in carbonate hydrothermal-bacterial edifices. Normalization by chondrites (Interpretation..., 2001).

**Таблица 2.** Изотопный состав углерода из карбонатных гидротермально-бактериальных построек и брахиопод

**Table 2.** Carbon isotope composition from carbonate hydrothermal-bacterial edifices and brachiopods

Номер пробы	Краткая характеристика проб	Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ , VPDB
ЛВ-879	Центральная часть плоских карбонатных гидротермально-бактериальных построек	-20.63
ЛВ-881	Боковая часть плоских карбонатных гидротермально-бактериальных построек	-21.08
ЛВ-880	Кислотный остаток растворения плоских карбонатных построек (органическое вещество)	-37.23
ЛВ-882	Брахиоподы из карбонатной постройки	-13.85
ЛВ-883	Кислотный остаток растворения брахиопод (органическое вещество)	-29.72

табл. 1) и соотношением  $\text{Ti}/\text{Zr} = 41$  и  $52$  (Юдович, Кетрис, 2011; Мизенс и др., 2014). Поэтому жизнь вблизи выходов флюидов Тессельского палеовулкана протекала в афотической зоне за счет процессов хемосинтеза прокариот (Sibuet, Olu, 1998).

У нас нет данных о газовом составе палеофлюидов дегазации триасового вулканизма. Можно предположить, что он мало отличается от современных результатов изучения сопутствующих газов при извержении андезитов на вулканах Безымянном, Пийпа и др. На этих вулканах в период усиления вулканической активности в состав газов входили сероводород, метан, водород, азот, закись углерода, сернистый газ, хлор, фтор, углекислый газ и другие газы (Борисов, Никитина, 1962; Мархинин, 1980; Леин и др., 1989; Seliverstov et al., 1994). Наиболее близкие данные к реконструированным палеофлюидам имели анализы изучения вулкана Пийпа. В них преобладали

$\text{CH}_4$  – 80–98%,  $\text{N}_2$  – до 17% и  $\text{H}_2\text{S}$ , а в подчиненном количестве отмечались  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ , и  $\text{C}_3\text{H}_8$  (Seliverstov et al., 1994).

Данные наших геологических исследований позволяют сделать предположение, что магма Тессельского палеовулкана имела высокий процент содержания газов. На это указывают многократные гидроэксплозивные выбросы ксенотуфового материала, наличие сильнопористых литокластов (гиалокластов) пемзы, различных форм гидротермально-бактериальных построек и крупных миндалин в лавах и туфах (Кориневский, 2014; Лысенко, 2019а, б). Дополнительно это подтверждает соотношение  $\text{Sr}/\text{Ba} = 0.31$  и  $0.49$ . Эти данные указывают на распреснение гидротермальных растворов, в ореолах которого происходило формирование карбонатных строений (Катченков, 1959). По предположению исследователей, образование таких флюидов связано с “субкритической фазовой

сепарацией” при подъеме глубинных растворов к поверхности (Seliverstov et al., 1994; Масленников, 1999; Богданов и др., 2006). Обычно при этом происходила потеря тяжелой фракции халькофильных элементов и обогащение их газовым составом (Богданов и др., 2006). На активность гидротермальных растворов вблизи ракушечной банки указывают зоны гидротермальных измененных пород, описанных нами выше. Предположительно, значительная часть газового состава палеофлюидов была представлена метаном и сероводородом. Доказательством этого служит широко развитая антраконитовая минерализация и значительное присутствие пирита в бактериальных постройках, лавах андезитов и туфах (Лысенко, 2019а, б). Выше приводились данные растворения карбонатов в кислоте. Они подтвердили наличие в палеофлюидах углеводородов легкой и тяжелой нефти (Слободский, 1981). По отношению V/Ni отмечаются различия их состава в разных частях постройки. В центральной зоне соотношение равно 1.48 и идет накопление легких продуктов нефти, а в боковых частях – 0.37 и аккумуляция тяжелых (Валяев, 1997). На подобное наличие нефти указывают при характеристике современных и древних карбонатов просачивания вблизи выходов углеводородных флюидов (Campbell et al., 2006).

Несмотря на слабую минерализацию палеофлюидов, они имеют глубинную природу образования. Это подтверждается высокими содержаниями значительной части халькофильных элементов в карбонатном материале построек (см. табл. 1). Для них характерен следующий ряд содержаний:  $As > Mo > Zn > Cu > Ni > Pb > Ga > Sb > Co$  (см. табл. 1). Аномальные содержания Zn, Cu, As, Mo, Ga и Sb (см. табл. 1), соотношения Ti/Zr (41, 52), Ni/Co (3.9, 8.4) (Юдович, Кетрис, 2011), Y/Ho (14.7, 20.1) (Bau, 1996; Frimmel, 2009) и Ce/La (1.48, 1.61) (Himmeler et al., 2010), а также высокие значения  $Eu^*_n$  (1.1, 2.5) и  $Ce^*_n$  (6.1, 6.2) свидетельствуют о глубинности флюидов (Bau, 1996; Feng et al., 2009; Himmeler et al., 2010; Юдович, Кетрис, 2011). Ряд концентраций халькофильных элементов, низкие концентрации Ni и Co (Ames et al., 1993; Bau, 1996) и соотношение Cu/Zn (0.2, 0.8) указывают на их связь с андезитовым вулканизмом (Butterfield, Massoth, 1994; Масленников, 1999). Дополнительно о природе связи с вулканическими флюидами свидетельствует ряд содержаний щелочных металлов  $Li > Rb > Cs$  (см. табл. 1) (Богданов и др., 2006).

Кроме того, подтверждением глубинности флюидов является изотопный состав углерода в карбонатах бактериальных построек ( $-20.6$  и  $-21.1\%$ ) (см. табл. 2) (Horita, Berndt, 1999; Богданов и др., 2006).

Результаты наших исследований структурных форм карбоната свидетельствуют о том, что ведущую роль в образовании карбоната и первичного

органического вещества биогермы выполняют сообщества бактерий и архей. Убедительным фактом образования органического вещества и карбоната хемосинтезом из метана служат результаты анализов  $\delta^{13}C$ . В них имеются различия в изотопном составе углерода. В центральной части постройки  $\delta^{13}C = -20.6\%$ , а в боковой зоне  $\delta^{13}C = -21.1\%$  (см. табл. 2). Органическое вещество бактериальных карбонатных построек характеризуется более легким составом:  $\delta^{13}C = -37.2\%$ . Изотопная разница органического вещества и карбонатного материала построек составляет  $-16.1\%$ . Подобная изотопная разность углерода в карбонатах и органическом веществе существовала еще 3.5–3.4 млрд лет назад и считается признаком образования органики живыми организмами (Юдович, Кетрис, 2011). Для построения карбоната построек метанотрофные и метаногенные микроорганизмы использовали тяжелый углевод, а для синтеза органического вещества – более легкий (Horita, Berndt, 1999; Amend Shock, 2001). Результаты анализов  $\delta^{13}C$  подтверждают существование симбиоза прокариот с брахиоподами триаса (см. табл. 2). Подобное питание свойственно для жизни крупной фауны, находящейся рядом с современными и древними гидротермальными системами просачивания метана (Baross, Deming, 1983; Лобье, 1990; Campbell et al., 2006). Изучению подобных современных и древних образований бактериальных построек посвящено значительное количество научных работ (Alperin et al., 1988; Леин, 2004; Богданов и др., 2006; Campbell et al., 2006). В этих источниках у разных авторов отмечается разнообразие в названиях этого материала: “карбонаты просачивания углеводородов”, “метановые морские карбонаты”, “аутигенные карбонаты”, “арагонитовые тротуары”, “аутигенные карбонатные конкреции”, “карбонатные новообразования”, “литофикаты”, “аутигенные карбонатные постройки” и гераклиты. В англоязычных литературных источниках чаще всего используется название “карбонаты просачивания”, а в русской – “аутигенные карбонатные постройки (образования)” (Campbell, Bottijer, 1993; Aharon, 1994; Леин, 2004; Campbell et al., 2006). Главными признаками создания карбонатных построек верхнего триаса прокариотами являлись сферолитовые и микроколломорфные структуры в них, а также фрамбоиды пирита. Подобные сферолитовые образования описываются многими исследователями в карбонатах просачивания углеводородов под разными терминами: “почки”, “сферулы”, “шарики”, “эллипсоидные стяжения”, “клубеньки”, “комковатые образования”, “микритовые узелки” и “ботриоиды” (Beauchamp, Savard, 1992; Aharon, 1994; Леин, 2004; Campbell et al., 2006; Cavalazzi et al., 2012; Amano et al., 2013). Наличие в них биомаркеров (углеродистого вещества) однозначно указывает на связь с процессами бактериального хемо-

синтеза (Conti et al., 2010). Дополнительно это подтверждают фрамбоидальные выделения пирита в постройках, образования которого большинство исследователей связывают с жизнедеятельностью прокариот (Cavalazzi et al., 2012). На связь с живыми организмами указывают отношения Zn/Cu (1.02 и 3.43) (Демина, Галкин, 2013).

Приведенные ранее данные низких содержаний Sr, Ti, Mn, Cr, U, Th и V (см. табл. 1), а также отсутствие мелкообломочного терригенного материала подтверждают высокие скорости роста карбонатных гидротермально-бактериальных построек в спокойной глубоководной обстановке (Юдович, Кетрис, 2011). Их формирование происходило почти сразу после активной вулканической деятельности и продолжалось в перерывы извержений за счет действия гидротерм. На это указывают находки пеплового материала в карбонате построек и аномального содержания лития (см. табл. 1). Создание карбоната, сульфидов и органического вещества сообществом архей и прокариот осуществлялось в субоксидной среде сероводорода и метана. На это указывают наличие органического вещества и данные соотношений в наших анализах U/Th (2.5 и 14.9), Mo/Mn (0.001 и 0.031) (Юдович, Кетрис, 2011) и  $Se^*_n$  (по карбонату – 6.1 и 6.2, по хондрикам – 1.04 и 0.95) (Feng et al., 2009; Himmeler et al., 2010). Подобная среда, бедная кислородом, описывается исследователями при характеристике образования современных и древних карбонатов просачивания (Campbell, 2006; Conti et al., 2010).

Выше отмечалось, что имеется сходство в строении карбонатного материала изученных построек с образованиями цианобактерий. У них одинаковые особенности строения на микроуровне, которые представлены сростками сферолитовых образований, колломорфной и полосчатой текстурами. Дополнительным сходством является присутствие органического вещества (Крылов, 1975). Это сходство можно объяснить принадлежностью сообществ метанотрофных простейших и цианобактерий к одному надцарству прокариот. Различия между ними заключаются в разных способах получения карбоната и органического вещества для продолжения жизни. Основные сообщества цианобактерий создают постройки и органическое вещество за счет энергии солнца и переработки углекислого газа (Крылов, 1975). Сообщества метаногенных и метанотрофных бактерий и архей вырабатывают продукты питания и карбонатное вещество из углеводородных флюидов просачивания фумарол. Рядом с ними всегда находятся оазисы жизни с другой крупной фауной (Aharon, 1994; Campbell, 2006). Их формирование происходило в афотической зоне и контролировалось поступлением флюидов из недр. Триасовые полосчатые карбонатные постройки имеют сходство с описанием подобных современных строматолитовых корок, найденных

на глубине 4850 м около диффузионного просачивания метана (Greinert et al., 2002).

Образование ракушечной банки брахиопод осложнялось выбросом крупных глыб из жерла палеовулкана. Раковины *Worobiella ex gr. caucasica* Dagus и бактериальные карбонатные постройки являлись скрепляющей цементной массой крупнообломочного материала. Жизнь брахиопод зависела от органических углеводов, созданных бактериальным хемосинтезом из флюидов. Главным подтверждением этого является изотопный состав углерода в органическом веществе:  $\delta^{13}C = -29.7\text{‰}$  и карбонате ракушек:  $\delta^{13}C = -13.8\text{‰}$  (см. табл. 2) Этот изотопный состав менее облегчен, чем в бактериальных постройках. Предположительно, это связано с использованием брахиоподами для строительства своих раковин углерода из окружающей воды палеоокеана и за счет разложения мягких тканей органики ракушек. Изотопная разница углерода из карбонатов и органического вещества составляет  $-15.9\text{‰}$  и почти не отличается от ниже приведенных данных по бактериальным постройкам. Это является подтверждением существования симбиоза между сообществом прокариот и брахиопод (Alperin et al., 1988; Юдович, Кетрис, 2011).

На прижизненное нахождение брахиопод в ориктоценозе указывают следующие факторы: равномерное распределение органического вещества, отсутствие детритового материала и сортировки ракушки фауны, хорошая сохранность створок брахиопод и наличие разно ориентируемых плоских бактериальных построек (Бугрова, 2006). Срастание спинных и брюшных раковин в своеобразные луковичи происходило при высоких скоростях формирования ракушечной банки. Для них характерны тонкие стенки раковин, которые покрыты черным углеродистым веществом биогенного происхождения (Бугрова, 2006). Имеется несколько причин незначительных габаритов брахиопод. На это влияют повышенные температуры флюидов просачивания, которые создают условия для ранней половой зрелости (Бугрова, 2006). Рост брахиопод происходил в ореолах сероводорода и метана при пониженном содержании кислорода. Частично их размеры контролировались раковинами родителей. Быстрый рост рядом карбонатных бактериальных построек часто был связан с кольматацией каналов просачивания метана. Прекращение поступления флюидов в некоторые пространства ракушечных образований приводило к приостановке процессов хемосинтеза прокариот и смерти брахиопод из-за отсутствия питания. Временной интервал образования банки брахиопод был небольшим и зависел от поступления флюидов из фумарол. Для биоценоза ракушечной банки брахиопод как для современных, так и древних карбонатов просачивания характерны бедный таксономический состав и высокая биологическая продуктивность. Кроме брахиопод, в



ней присутствуют гастроподы, моллюски, фораминиферы и губки. Подобные бокалы губок встречаются около бактериальных матов на склоне вулкана Пийпа (Seliverstov et al., 1994).

Главными условиями образования ракушечной банки брахиопод на поверхности Тессельского палеовулкана являются поступления углеводородных флюидов из недр и присутствие сообществ архей и бактерий по переработке метана в органическое углеводородное вещество и карбонат. Органика, созданная процессами хемосинтеза, служила пищей для брахиопод и другой крупной фауны. Исследуемые карбонатные постройки в палеобиогерме являются полными аналогами современных и древних карбонатов просачивания углеводородов (Seliverstov et al., 1994; Campbell, 2006). Им посвящено значительное количество работ. Имеются результаты исследований древних карбонатов просачивания углеводородов на всех континентах во временных интервалах от юры до наших дней (Campbell, 2006). С каждым годом увеличивается количество таких находок. При описании некоторых древних карбонатов просачивания углеводородов исследователи отмечали присутствие рядом в геологических разрезах эффузивных пород. Высказывалось предположение о существовании взаимосвязи между ними (Tong, Chen, 2012). Такая связь установлена авторами по результатам исследования гидротермально-бактериальных построек и ракушечной банки брахиопод. Выше отмечалось многообразие названий карбонатных образований, которые связаны с поступлением метана и сообществ микроорганизмов по его переработке. По этим двум главным признакам такие карбонатные образования правильнее называть метанолитами с учетом их возраста образования. Поэтому наши гидротермально-бактериальные карбонатные постройки можно именовать метанолитами триаса.

Впервые признаки выделения древних карбонатов просачивания углеводородов были приведены в работе К.А. Кэмпбелл и Д.Дж. Боттиер (Campbell, Bottijer, 1993). Наши исследования метанолитов триаса позволяют дополнить критерии выделения подобных образований в геологических разрезах. Главную роль в поступлении углеводородов из недр играет тектоника региона, которая контролирует объемы, температурный режим и состав флюидов. Вторым ведущим фактором является деятельность сообщества бактерий и архей по переработке углеводородов. При проведении поисковых работ для идентификации метанолитов (карбонатов просачивания) в древних породах необходимо учитывать их следующие признаки: приуроченность находок к зонам региональных разломов и вулканическим структурам; наличие в микроструктурах сферолитовых и микротрубчатых образований; присутствие биомаркеров; многочисленные

фаунистические остатки; пропитка материала углеводородами нефти и присутствие в них газоводных включений углеводородных палеофлюидов; наличие сульфидов; повышенное содержание фосфора, литофильных, халькофильных и редкоземельных элементов; облегченный изотопный состав карбонатов; изотопное фракционирование углерода из карбоната и органического вещества. Сообщества прокариот и архей для своей жизнедеятельности используют метан любого генезиса. Поэтому в каждом конкретном случае изучения пород с метанолитами требуется проведение полного комплекса геологического картирования, минералогических, геохимических и изотопных исследований, которые позволяют познать палеогеографические условия их образования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые приводятся результаты исследования геологического, геохимического и изотопного состава гидротермально-бактериальных карбонатных построек и ракушечной банки брахиопод на поверхности эффузивной толщи Тессельского палеовулкана позднего триаса в Горном Крыму. Полученные результаты подтвердили, что главными факторами их образования являлись поступления метана и наличие сообществ метанотрофных бактерий и архей. Отмечаются высокие скорости роста бактериальных строений и ракушек брахиопод в период вулканической деятельности. Жизненные процессы сообществ прокариот и брахиопод происходили в среде метана и сероводорода. В биогерме наблюдается бедный видовой состав и высокая продуктивность создания органического вещества. Главными условиями образования тессельских бактериальных образований являлись поступления метана и переработка его сообществом прокариот и архей, поэтому их кратко можно называть метанолитами триаса. По результатам исследования в работе приведены признаки их выделения в других временных геологических разрезах.

По датировкам брахиопод *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys и аммонита *Megaphyllites insectus* (Mojsisovics) активная деятельность Тессельского палеовулкана датируется норийским веком позднего триаса. С этим временным периодом на Земле связывают период вулканической активизации и “великое вымирание” фауны в морской среде и на суше (Blackburn et al., 2013).

## Благодарности

Авторы благодарят за консультации и оказанную помощь в изучении пород члена-корр. РАН В.В. Масленникова, за определение фауны – профессора докт. геол.-мин. наук В.В. Аркадьева и канд. геол.-мин. наук Ю.С. Репина.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахова Т.В. (1972) Палеонтологическая характеристика триасовых отложений Крыма. *Палеонтол. сб.*, **2**(9), 57-63.
- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г. (2006) Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 528 с.
- Борисов О.Г., Никитина И.Б. (1962) Состояние фумарол вулканов Шивелуч и Безымянного в 1960 г. *Бюлл. вулканол. станций*, **33**, 3-19.
- Бугрова И.Ю. (2006) Морские организмы индикаторы условий осадконакопления в древних бассейнах. СПб.: СПб ГУ, 104 с.
- Валяев Б.М. (1997) Углеродородная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений. *Геология нефти и газа*, **9**, 1-6.
- Дагис А.С., Дагис А.А., Казаков А.М., Курушин Н.И. (1959) Граница нижнего и среднего триаса на севере Средней Сибири. Л.: Гостоптехиздат, 360 с.
- Демина Л.Л., Галкин С.В. (2013) Биохимия микроэлементов в глубоководных гидротермальных экосистемах. М.: ГЕОС, 255 с.
- Интерпретация геохимических данных. (2001) (Ред. Е.В. Складов). Т. I. М.: Интермет Инжиниринг, 288 с.
- Катченков С.М. (1959) Малые химические элементы в осадочных породах и нефтях. Л.: Гостоптехиздат, 271 с.
- Кориневский В.Г. (2014) Эффузивы Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 216 с.
- Крылов И.Н. (1975) Строматолиты рифея и фанерозоя СССР. М.: Наука, 243 с.
- Леин А.Ю. (2004) Аутигенное карбонатообразование в океане. *Литология и полез. ископаемые*, **1**, 3-35.
- Леин А.Ю., Гальченко В.Ф., Покровский Б.Г., Шабаява И.Ю., Черткова Л.В., Миллер Ю.М. (1989) Морские карбонатные конкреции как результат процессов микробного окисления газогидратного метана в Охотском море. *Геохимия*, **10**, 1326-1406.
- Лобье Л. (1990) Оазисы на дне океана. М.: Гидрометеоиздат, 156 с.
- Лысенко В.И. (2019а) Характеристика вулканической толщи верхнего триаса в Юго-западной части Горного Крыма. *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология (Симферополь)*, **5**(71), 230-253.
- Лысенко В.И. (2019б) Лавовые палеопотоки триасового вулканизма в Юго-западной части Горного Крыма. *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология (Симферополь)*, **5**(71), 304-325.
- Мархинин Е.К. (1980) Вулканы и жизнь. М.: Мысль, 196 с.
- Масленников В.В. (1999) Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчедановых палеогидротермальных полей. Миасс: ИМин УрО РАН, 348 с.
- Мизенс Г.А., Степанова Т.И., Кучева Н.А., Сапурин С.А. (2014) Геохимические особенности известняков и условия осадконакопления на изолированной карбонатной платформе в позднем девоне и начале карбона на восточной окраине Урала. *Литосфера*, (6), 53-76.
- Слободский Р.М. (1981) Элементоорганические соединения в магматогенных и рудообразующих процессах. *Тр. Института геологии и геофизики*. Вып. 486. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 134 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Aharon P. (1994) Geology and biology of modern and ancient submarine Hydrocarbon seeps and vents: an introduction. *Geo-Marine Lett.*, **14**(2), 69-73.
- Alperin M.J., Reeburgh W.S., Whiticar M.J. (1988) Carbon and hydrogen isotope fractionation resulting from anaerobic methane oxidation. *Global Biogeochem. Cycles*, **2**(3), 279-288.
- Amano K., Jenkins R.G., Sako Y., Ohara M., Kiel S.A. (2013) Paleogene deep-sea methane-seep community from Honshu, Japan. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, **387**, 126-133.
- Amend J.P., Shock E.L. (2001) Energetics of overall metabolic reactions of thermophilic and hyperthermophilic Archaea and Bacteria. *FEMS Microbiol. Rev.*, **25**, 175-243.
- Ames D.E., Franklin J.M., Hannington M.D. (1993) Mineralogy and geochemistry of active and inactive chimneys and massive sulfide. Middle Valley, northern Juan De Fuca Ridge: An evolving hydrothermal system. *Can. Mineral.*, **31**, 997-1024.
- Arquit A.M. (1990) Geological and hydrothermal controls on the distribution of megafauna in the Ashes vent field. Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, **95**(8), 12947-12960.
- Baross J.A., Deming J.W. (1983) Growth of "black smoker" bacteria at temperatures of at least 250°C. *Nature*, **303**, 423-426.
- Bau M. (1996) Controls of the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf and lanthanide tetrad effect. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **123**, 323-333.
- Beauchamp B., Savard M. (1992) Cretaceous chemosynthetic carbonate mounds in the Canadian Arctic. *Palaios*, (7), 434-450.
- Birgel D., Peckmann J. (2008) Aerobic methanotrophy at ancient marine methane seeps: A synthesis. *Org. Geochem.*, **39**, 1659-1667.
- Blackburn T.J., Olsen P.E., Bowring S.A., Lean M.N., Kent D.V., Puffer J., Hone G., Rasbury E.T., Touhami M. (2013) Zircon U-Pb geochronology links the end-Triassic extinction with the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, **340**, 941-945.
- Butterfield D.A., Massoth G.J. (1994) Geochemistry of north Cleft segment vent fluids: Temporal changes in chlorinity and their possible relation to recent volcanism. *J. Geophys. Res.*, **99**, 4951-4968.
- Campbell K.A. (2006) Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **232**, 362-407.
- Campbell K.A., Bottjer D.J. (1993) Fossil cold seeps. *Nat. Geogr. Res. Explor.*, (9), 326-343.
- Cavalazzi B., Barbieri R., Cady S.L., George A.D., Genaro S., Westall F., Lui A., Canteri R., Rossi A.P., Ori G.G., Taj-Eddine K. (2012) Iron-framboids in the hydrocarbon-related Middle Devonian Hollard Mound of the Anti-Atlas mountain range in Morocco: Evidence of potential microbial biosignatures. *Sediment. Geol.*, **263**, 183-193.
- Conti S., Fontana D., Mecozzi S., Panieri G., Pini G.A. (2010) Late Miocene seep-carbonates and fluid migra-

## REFERENCES

- tion on top of the Montepetra intrabasinal high (Northern Apennines, Italy): Relations with synsedimentary folding. *Sediment. Geol.*, **231**, 41-54.
- Corliss J., Dymond J., Gordon L.I., Edmond J.M., von Herzen R.P., Ballard R.D., Green K., Williams D., Bainbridge A., Crane K., van Andel T.H. (1979) Submarine Thermal Springs on the Galápagos Rift. *Sci. Magazine*, **203**(4385), 1073-1083.
- Dubilier N., Bergin C., Lott C. (2008) Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis. *Nat. Rev. Microbiol.*, **6**, 725-740.
- Feng D., Chen D.F., Peckmann J. (2009) Rare earth elements in seep carbonates as tracers of variable redox conditions at ancient hydrocarbon seeps. *Terra Nova*, **21**, 49-56.
- Fouquet Y., Juniper S.K. (1988) Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites. *Can. Mineral.*, **26**, 859-870.
- Frimmel H.E. (2009) Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator. *Chem. Geol.*, **258**, 338-353.
- Greiner J., Bohrmann G., Elvert M. (2002) Stromatolitic fabric of authigenic carbonate crust: results of anaerobic methane oxidation at cold seeps in 4.850 m water depth. *Int. J. Earth Sci.*, **91**, 698-711.
- Hammond S.R. (1990) Relationships between lava types, seafloor morphology, and the occurrence of hydrothermal venting in the ASHES Vent Field of Axial Volcano. *J. Geophysic. Res.*, **95**(B8), 12875-12893.
- Himmler T., Bach W., Bohrmann G., Peckmann J. (2010) Rare earth elements in authigenic methane-seep carbonates as tracers for fluid composition during early diagenesis. *Chem. Geol.*, **277**, 126-136.
- Horita J., Berndt M.E. (1999) Abiogenic Methane Formation and Isotopic Fractionation Under Hydrothermal Conditions. *Science*, **285**, 1055-1057.
- Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., García G.S., Jukes V. (2002) The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change. *Geofluids*, **(2)**, 109-126.
- Seliverstov N.I., Torokhov P.V., Egorov Yu.O., Dubrovsky V.N., Taran Yu.A., Kokarev S.G. (1994) Active seeps and carbonates from the Kamchatsky Gulf (East Kamchatka). *Bull. Geol. Soc. Denmark*, **41**, 50-54.
- Shanks III W.C. (2001) Stable isotopes in sea or hydrothermal systems: vent fluids, hydrothermal deposits, hydrothermal alteration, and microbial processes. *Stable Isotope Geochem. Rev. Mineral.*, **43**, 469-517.
- Sibuet M., Olu K. (1998) Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold seep communities at active and passive margins. *Deep-Sea Res.*, **45**, 517-567.
- Simoneit B.R.T., Lein A.Yu., Peresypkin V.I., Osipov G.A. (2004) Composition and origin of hydrothermal petroleum and associated lipids in the sulfide deposits of the Rainbow Field (Mid-Atlantic Ridge at 36° N). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**(10), 2275-2294.
- Tong H.P., Chen D.F. (2012) First discovery and characterizations of late Cretaceous seep carbonates from Xigaze in Tibet, China. *Article Geol. November*, **57**(33), 4363-4372.
- Torokhov P.V., Taran Y.A. (1994) Hydrothermal fields of the Piip submarine volcano, Komandorsky Back-Arc Basin: Chemistry and origin of vent mineralization and bubbling gas. *B. Geol. Soc. Denmark*, **41**, 55-64.
- Aharon P. (1994) Geology and biology of modern and ancient submarine Hydrocarbon seeps and vents: an introduction. *Geo-Marine Lett.*, **14**(2), 69-73.
- Alperin M.J., Reeburgh W.S., Whiticar M.J. (1988) Carbon and hydrogen isotope fractionation resulting from anaerobic methane oxidation. *Global Biogeochem. Cycles.*, **2**(3), 279-288.
- Amano K., Jenkins R.G., Sako Y., Ohara M., Kiel S.A. (2013) Paleogene deep-sea methane-seep community from Honshu, Japan. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, **387**, 126-133.
- Amend J.P., Shock E.L. (2001) Energetics of overall metabolic reactions of thermophilic and hyperthermophilic Archaea and Bacteria. *FEMS Microbiol. Rev.*, **25**, 175-243.
- Ames D.E., Franklin J.M., Hannington M.D. (1993) Mineralogy and geochemistry of active and inactive chimneys and massive sulfide, Middle Valley, northern Juan De Fuca Ridge: An evolving hydrothermal system. *Can. Mineral.*, **31**, 997-1024.
- Arquit A.M. (1990) Geological and hydrothermal controls on the distribution of megafauna in the Ashes vent field, Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, **95**(8), 12947-12960.
- Astakhova T.V. (1972) Paleontological characteristics of the Triassic deposits of the Crimea. *Paleontol. Collect.*, **2**(9), 57-63. (In Russ.)
- Baross J.A., Deming J.W. (1983) Deming, Growth of "black smoker" bacteria at temperatures of at least 250°C. *Nature*, **303**, 423-426.
- Bau M. (1996) Controls of the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf and lanthanide tetrad effect. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **123**, 323-333.
- Beauchamp B., Savard M. (1992) Cretaceous chemosynthetic carbonate mounds in the Canadian Arctic. *Palaios.*, **7**, 434-450.
- Birgel D., Peckmann J. (2008) Aerobic methanotrophy at ancient marine methane seeps: A synthesis. *Org. Geochem.*, **39**, 1659-1667.
- Blackburn T.J., Olsen P.E., Bowrig S.A., Lean M.N., Kent D.V., Puffer J., Hone G., Rasbury E.T., Touhami M. (2013) Zircon U-Pb geochronology links the end-Triassic extinction with the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, **340**, 941-945.
- Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. (2006) Hydrothermal ore genesis of the ocean floor. Moscow, Nauka Publ., 528 p. (In Russ.)
- Borisov O.G., Nikitina I.B. (1962) State of fumaroles of Shiveluch and Bezmyanny volcanoes in 1960. *Bull. Volcanol. Stations*, **33**, 3-19. (In Russ.)
- Bugrova I.Yu., Bugrova E.M. (2015) Paleocene and Lower Eocene sections in the southern part of the Crimean Peninsula. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **23**(6), 607-619. (In Russ.)
- Butterfield D.A., Massoth G.J. (1994) Geochemistry of north Cleft segment vent fluids: Temporal changes in chlorinity and their possible relation to recent volcanism. *J. Geophys. Res.*, **99**, 4951-4968.
- Campbell K.A. (2006) Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **232**, 362-407.
- Campbell K.A., Bottjer D.J. (1993) Fossil cold seeps. *Nat. Geogr. Res. Explor.*, **9**, 326-343.



- Cavalazzi B., Barbieri R., Cady S.L., George A.D., Gennaro S., Westall F., Lui A., Canteri R., Rossi A.P., Ori G.G., Taj-Eddine K. (2012) Iron-framboids in the hydrocarbon-related Middle Devonian Hollard Mound of the Anti-Atlas mountain range in Morocco: Evidence of potential microbial biosignatures. *Sediment. Geol.*, **263**, 183-193.
- Conti S., Fontana D., Mecozzi S., Panieri G., Pini G.A. (2010) Late Miocene seep-carbonates and fluid migration on top of the Montepetra intrabasinal high (Northern Apennines, Italy): Relations with synsedimentary folding. *Sediment. Geol.*, **231**, 41-54.
- Corliss J., Dymond J., Gordon L.I., Edmond J.M., von Herzen R.P., Ballard R.D., Green K., Williams D., Bainbridge A., Crane K., van Andel T.H. (1979) Submarine Thermal Springs on the Galápagos Rift. *Sci. Magazine*, **203**(4385), 1073-1083.
- Dagis A.S., Dagis A.A., Kazakov A.M., Kurushin N.I. (1959) The boundary of the Lower and Middle Triassic in the north of Central Siberia. Leningrad, *Gostoptekhizdat.*, 360 p. (In Russ.)
- Demina L.L., Galkin S.V. (2013) Biochemistry of trace elements in deep-sea hydrothermal ecosystems. Moscow, GEOS, 255 p. (In Russ.)
- Dubilier N., Bergin C., Lott C. (2008) Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis. *Nat. Rev. Microbiol.*, **6**, 725-740.
- Feng D., Chen D.F., Peckmann J. (2009) Rare earth elements in seep carbonates as tracers of variable redox conditions at ancient hydrocarbon seeps. *Terra Nova*, **21**, 49-56.
- Fouquet Y., Juniper S.K. (1988) Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites. *Can. Mineral.*, **26**, 859-870.
- Frimmel H.E. (2009) Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeo environmental indicator. *Chem. Geol.*, **258**, 338-353.
- Greiner J., Bohrmann G., Elvert M. (2002) Stromatolitic fabric of authigenic carbonate crust: results of anaerobic methane oxidation at cold seeps in 4,850 m water depth. *Int. J. Earth Sci.*, **91**, 698-711.
- Hammond S.R. (1990) Relationships between lava types, seafloor morphology, and the occurrence of hydrothermal venting in the ASHES Vent Field of Axial Volcano. *J. Geophys. Res.*, **95**(B8), 12875-12893.
- Himmeler T., Bach W., Bohrmann G., Peckmann J. (2010) Rare earth elements in authigenic methane-seep carbonates as tracers for fluid composition during early diagenesis. *Chem. Geol.*, **277**, 126-136.
- Horita J., Berndt M.E. (1999) Abiogenic Methane Formation and Isotopic Fractionation Under Hydrothermal Conditions. *Science*, **285**, 1055-1057.
- Judd A.G., Hovland M., Dimitrov L.I., García G.S., Jukes V. (2002) The geological methane budget at Continental Margins and its influence on climate change. *Geofluids*, **(2)**, 109-126.
- Katchenkov S.M. (1959) Small Chemical Elements in Sedimentary Rocks and Oils. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 271 p. (In Russ.)
- Korinevskii V.G. (2014) Effusives of the Urals. Ekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 216 p. (In Russ.)
- Krylov I.N. (1975) Riphean and Phanerozoic stromatolites of the USSR. Moscow, Nauka Publ., 243 p. (In Russ.)
- Lein A.Yu. (2004) Authigenic carbonate formation in the ocean. *Litol. Polezn. Iskop.*, **(1)**, 3-35. (In Russ.)
- Lein A.Yu., Galchenko V.F., Pokrovsky B.G., Shabacova I.Yu. (1989) Marine carbonate nodules as a result of microbial oxidation of gas hydrate methane in the Sea of Okhotsk. *Geochemistry*, **10**, 1326-1406. (In Russ.)
- Lobier L. (1990) Oases at the bottom of the ocean. Moscow, Gidrometeoizdat, 156 p. (In Russ.)
- Lysenko V.I. (2019a) Characteristics of the Upper Triassic volcanic strata in the Southwestern part of the Crimean Mountains. *Scientific notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology (Simferopol)*, **5**(71), 230-253. (In Russ.)
- Lysenko V.I. (2019b) Lava paleoflows of Triassic volcanism in the southwestern part of the Crimean Mountains. *Scientific notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology (Simferopol)*, **5**(71), 304-325. (In Russ.)
- Markhinin E.K. (1980) Volcanoes and life. Moscow, Mysl' Publ., 196 p. (In Russ.)
- Maslennikov V.V. (1999) Sedimentogenesis, halmyrolysis and ecology of pyrite-bearing paleo hydrothermal fields. Miass, IMin UrO RAN, 348 p. (In Russ.)
- Mizens G.A., Stepanova T.I., Kucheva N.A., Sapurin S.A. (2014) Geochemical features of limestones and conditions of sedimentation on an isolated carbonate platform in the late Devonian and early Carboniferous on the eastern margin of the Urals. *Lithosphere (Russia)*, **(6)**, 53-76. (In Russ.)
- Seliverstov N.I., Torokhov P.V., Egorov Yu.O., Dubrovsky V.N., Taran Yu.A., Kokarev S.G. (1994) Active seeps and carbonates from the Kamchatsky Gulf (East Kamchatka). *Bull. Geol. Soc. Denmark.*, **41**, 50-54.
- Shanks III W.C. (2001) Stable isotopes in seafloor hydrothermal systems: vent fluids, hydrothermal deposits, hydrothermal alteration, and microbial processes. *Stable Isotope Geochem. Rev. Mineral.*, **43**, 469-517.
- Sibuet M., Olu K. (1998) Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold seep communities at active and passive margins. *Deep-Sea Res.*, **45**, 517-567.
- Simoneit B.R.T., Lein A.Yu., Peresypkin V.I., Osipov G.A. (2004) Composition and origin of hydrothermal petroleum and associated lipids in the sulfide deposits of the Rainbow Field (Mid-Atlantic Ridge at 36° N). *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**(10), 2275-2294.
- Slobodsky R.M. (1981) Organoelement compounds in magmatogenic and ore-forming processes. *Proc. Institute of Geology and Geophysics. Iss. 486*. Novosibirsk, Nauka Publ. Sib. otd., 134 p. (In Russ.)
- Tong H.P., Chen D.F. (2012) First discovery and characterizations of Late Cretaceous seep carbonates from Xigaze in Tibet, China. *Article Geol. November*, **57**(33), 4363-4372.
- Torokhov P.V., Taran Y.A. (1994) Hydrothermal fields of the Piip submarine volcano, Komandorsky Back-Arc Basin: Chemistry and origin of vent mineralization and bubbling gas. *B. Geol. Soc. Denmark.*, **41**, 55-64.
- Valyaev B.M. (1997) Hydrocarbon degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields. *Geologiya Nefti i Gaza*, **9**, 1-6. (In Russ.)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2011) Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry). Syktyvkar, Geoprint Publ., 742 p. (In Russ.)