

УДК 551.217.1(477.75)

DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-2-179-196

Геология, морфология и минералогия сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек на поверхности лав Тессельского палеовулкана (южный берег Крыма)

В. И. Лысенко¹, В. А. Котляров², Т. В. Михайличенко³

¹Филиал Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 299009, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7, e-mail: niagara_sev@mail.ru

²Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 456317, г. Миасс, e-mail: kotlyarov@mineralogy.ru

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

Поступила в редакцию 29.12.2022 г., принята к печати 03.02.2023 г.

Объект исследования. Сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки на поверхности лав Тессельского палеовулкана. **Материалом** исследования стали постройки, найденные при проведении детальных геологических работ. **Методы.** Петрографические шлифы изучены под микроскопом Olympus Bx5. Исследование карбонатов и сульфидов проводилось с помощью растрового электронного микроскопа PZMMA-202M. **Результаты.** Впервые выполнено описание контактов построек с лавами и вмещающими их алевритами и аржиллитами. Постройки имеют трубчатую и плоскую форму. По минеральному составу в них можно выделить три зоны: центральную, боковую и зону бактериального обрастания. В средней части центральной зоны находится флюидный канал, а в нем присутствуют включения кристаллов и сростков кварца, барита, накрита, галенита, халькопирита, пирротина, сфалерита, пирита, раковины крупной фауны, пепловый и туфовый материал. Сферолиты и микротрубчатые образования карбоната свидетельствуют об участии сообществ бактерий и архей в создании построек. Результаты исследования карбонатов и сульфидов подтвердили использование прокариотами глубинных флюидов. **Заключение.** Главная роль в образовании сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек принадлежит сообществу прокариот и поступлению флюидов из недр. Внешняя морфология, наличие минералогической зональности, флюидного канала, нефтепродуктов и оазисов жизни с крупной фауной указывают на то, что у них были условия образования, как у сульфидно-карбонатных курильщиков вулкана Пийпа. Некоторые различия в минеральном составе связаны с разными глубинами морского дна и флюидами их формирования.

Ключевые слова: палеофлюиды, лавы, археи, бактерии, сульфиды, карбонаты, Тессельский палеовулкан, сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0003 “Оперативная океанология”

Geology, morphology and mineralogy of sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures on the surface of Tessel paleovolcano lava (south coast of Crimea)

Vitaliy I. Lysenko¹, Vasilii A. Kotlyarov², Tamara V. Mihaylichenko³

¹Lomonosov Moscow State University, the branch in Sevastopol Russian, 7 Heroes of Sevastopol st., Sevastopol 299009, Russia, e-mail: niagara_sev@mail.ru

²South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology of the UB RAS, Miass 456317, Russia, e-mail: kotlyarov@mineralogy.ru

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

Received 29.12.2022, accepted 03.02.2023

Для цитирования: Лысенко В.И., Котляров В.А., Михайличенко Т.В. (2023) Геология, морфология и минералогия сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек на поверхности лав Тессельского палеовулкана (южный берег Крыма). *Литосфера*, 23(2), 179–196. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-2-179-196>

For citation: Lysenko V.I., Kotlyarov V.A., Mihaylichenko T.V. (2023) Geology, morphology and mineralogy of sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures on the surface of Tessel paleovolcano lava (south coast of Crimea). *Lithosphere (Russia)*, 23(2), 179–196. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-2-179-196>

© В.И. Лысенко, В.А. Котляров, Т.В. Михайличенко, 2023

Research subject. Sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures on the surface of Tessel paleovolcano lava. **Materials and methods.** The structures under study were found during detailed geological works. Petrographic thin sections were studied using an Olympus Bx5 microscope. Carbonate and sulfide samples were examined using an RZMMA-202M scanning electron microscope. **Results.** For the first time, the contacts of the studied structures with their enclosing siltstones and mudstones were described. The structures are of tubular and flat shapes. In terms of mineral composition, the structures exhibit three zones: central, lateral and that of bacterial overgrowth. The middle part of the central zone features a fluid channel with inclusions of quartz, barite, nakrite, galena, chalcopyrite, pyrrhotite, sphalerite, pyrite, shells of large fauna, ash and tuff material. Spherulites and microtubular carbonate formations testify to the participation of bacterial and archaean communities in the construction process. The study of carbonates and sulfides confirmed the use of deep fluids by prokaryotes. **Conclusion.** The main role in the formation of the sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures under study belonged to the community of prokaryotes and fluids from the depths. The external morphology of the studied structures along with the presence of mineralogical zonality, a fluid channel, oil products, and oases of life with a large fauna indicate the similarity of their formation conditions to those of sulfide-carbonate smokers of the Piip volcano. Some differences in the mineral composition are associated with different depths and fluids of their formation.

Keywords: paleofluids, lava, archaea, carbonate, bacteria, sulfides, Tessel Paleovolcano, sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial edifices

Funding information

The work was carried out within the framework of the state assignment on the topic No. 0555-2021-0003 “Operational Oceanology”

Acknowledgements

The authors are grateful to V.V. Maslennikov, Professor and Corresponding Member RAS, for his advice and assistance in the study of the breeds and the definition of the fauna.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ученые большое внимание уделяют исследованиям процессов гидротермальной деятельности в рифтовых зонах океанов и на поверхностях подводных вулканов (Corliss et al., 1979; Богданов и др., 2006). Особенно исследователей интересуют выходы флюидов, где встречаются сульфидные и карбонатные постройки. В их создании принимают участие сообщества архей и бактерий (Baross, Deming, 1983; Fouquet, Juniper, 1988). С помощью реакций хемосинтеза они перерабатывают метан, сероводород и другие флюиды в сульфаты, карбонаты, сульфиды и органическое вещество (Corliss et al., 1979; Verati et al., 1999). Довольно часто наблюдаются существенные различия в минеральном составе и внешней форме рядом расположенных построек. Эти различия связаны с различным составом флюидов и физико-географическими условиями формирования построек (Богданов и др., 2006).

На территории России разнообразные формы гипс-ангидритовых, барит-карбонатных и пирит-карбонатных гидротермальных построек в ассоциации с бактериальными матами обнаружены на поверхности андезидацитов подводного вулкана Пийпа в Беринговом море с помощью ГОА “Мир” (Богданова и др., 1989). Разнообразие форм и минералогии объясняется вариациями состава и температурного режима формирующих их мерцающих газогидротермальных флюидов (Torokhov, Taran, 1994).

Постройки на вулкане Пийпа, особенно карбонатные, являются интересными объектами для исследования. Они единственные аналоги “курильщиков” на территории России (Полоник, 2018). Их изучение (взятие проб) осложняют значительные глубины Берингового моря и высокая твердость материала. В настоящее время значительная часть информации о постройках получена путем оптических наблюдений с подводных аппаратов.

Палеопостройки различной формы и минерального состава были обнаружены на поверхности эффузивных пород Тессельского осадочно-вулканогенного комплекса андезитов верхнего триаса (Лысенко, 2019). С “холодным” диффузионным просачиванием углеводородных палеофлюидов связано формирование плоских форм бактериального карбонатного обрастания на банке брахиопод (Лысенко и др., 2022). “Жильные” кварц-сульфид-карбонатные и карбонат-кварц-сульфидные гидротермально-бактериальные образования встречаются на поверхности толщи, образованной переслаиванием лавобрекчий, кластолав и ксенолавобрекчий. С участием флюидов лав, имеющих, вероятно, высокую температуру, шло формирование сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек. Исследованию таких построек посвящена данная статья.

Цель статьи – показать особенности генезиса и палеогеографических условий образования изученных нами сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обнажения пород Тессельского палеовулкана находятся на южном склоне Главной гряды Крымских гор между мысом Сарыч и санаторием Тессели (44°23'34"–44°23'56" с.ш., 33°45'21"–33°47'02" в.д.). Выходы вулканических пород наблюдаются в интервале абсолютных отметок от 140 до 450 м (рис. 1). Детальное геологическое картирование выполнено на площади около 2 км². При исследовании выходов эффузивных пород особое внимание уделялось положению сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек и их контактов с вмещающей толщей. В ходе работ собрана богатая коллекция фрагментов построек. Этот материал использовался для изго-

товления полированных спилов, шлифов и аншлифов, которые изучались под микроскопом Olympus Bx5 с фотокамерой Olympus DP 12 в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН г. Миасс.

Исследование карбонатов и сульфидов построек выполнено с помощью растрового электронного микроскопа PZMMA-202M, снабженного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром LZ-5 и Si Li детектором с разрешением 140 эВ. При проведении количественного анализа применялось ускоряющее напряжение 20 или 30 кВ при токе зонда от 4 до 6 нА. При этом использовались стандарты чистых металлов (MICRO-ANALYSIS CONSULTANTWS LT, LTD, X-RAY MICROPROBE STANDARDS, REGISTERED STSNDARD NUMBER 1362) или синтетических (природных) минера-

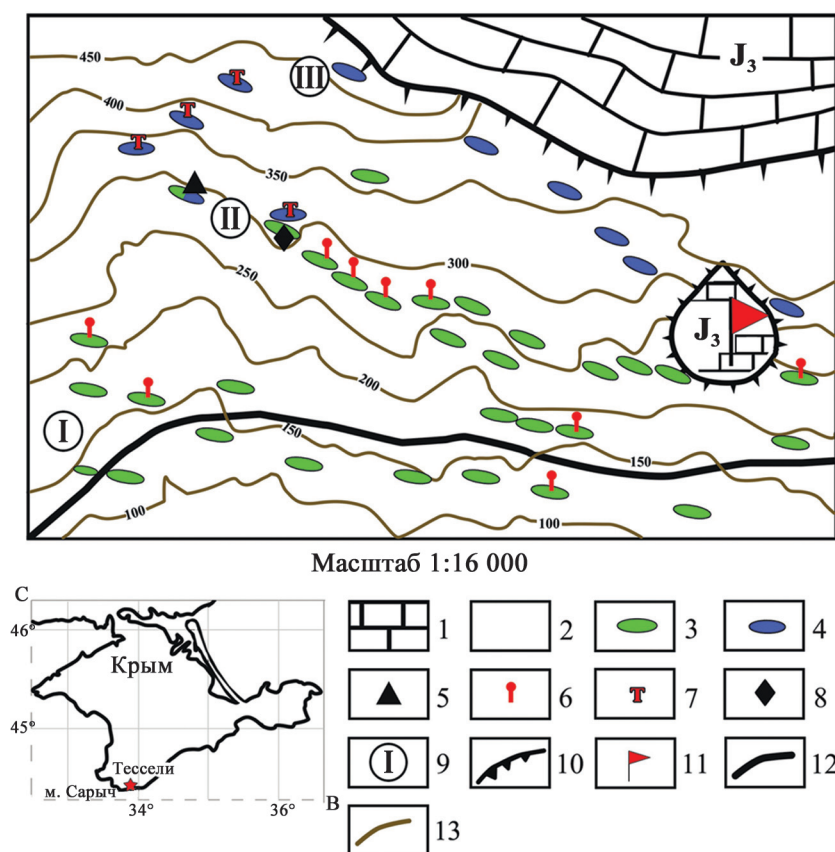


Рис. 1. Схема расположения выходов эффузивных пород Тессельского палеовулкана.

1 – мраморовидные известняки (J_3); 2 – алевролиты и аргиллиты таврической свиты (T_3-J_1); 3 – палеопотоки лав андезитов; 4 – эффузивная толща; 5 – банка брахиопод; 6 – сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки на поверхности лав; 7 – плоские гидротермально-бактериальные постройки; 8 – массив Рыжий; 9 – зоны выходов эффузивных пород (I – южная, II – центральная, III – северная); 10 – обрывы известняков Главной гряды; 11 – скала Парус; 12 – трасса Ялта–Севастополь; 13 – изолинии рельефа.

Fig. 1. Scheme of outcrops of effusive rocks of the Tessel paleovolcano.

1 – marble-like limestones (J_3); 2 – siltstones and mudstones of the Taurida Formation (T_3-J_1); 3 – paleoflows of andesitic lavas; 4 – effusive stratum; 5 – jar of brachiopods; 6 – sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures on the surface of lavas; 7 – flat hydrothermal-bacterial structures; 8 – Red massif; 9 – zones of outcrops of effusive rocks (I – southern, II – central, III – northern); 10 – limestone cliffs of the Main Ridge; 11 – Sail rock; 12 – highway Yalta-Sevastopol; 13 – isolines of the relief.

лов (ASTIMEX SCIENTIFIC LIMITED, MINM25-53, Mineral Mount Serial N0:01-044). Исследования на электронных микроскопах выполнялись в лабораториях ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН г. Миасса и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Для изучения распределения углеводов в карбонатах построек последние растворялись в азотной кислоте. Для исследования зональности пиритов поверхность аншлифов протравливалась в азотной кислоте в течение 3 мин. После сушки материал просматривался на микроскопе Olympus Bx5 с фотокамерой Olympus DP 12.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПАЛЕОПОТОКОВ ЛАВ

Выходы пород Тессельского осадочно-вулканогенного комплекса андезитов верхнего триаса – самые западные проявления вулканизма в южной зоне Крымских гор. Они встречаются на южном склоне Главной гряды Крымских гор в терригенной толще пород таврической серии (см. рис. 1). Обнажения эффузивных пород Тессельского палеовулкана представлены отдельными скальными выходами, которые приурочены к трем прерывистым зонам: южной, центральной и северной (см. рис. 1). Такое нахождение в их разрезах связано с несколькими стадиями деятельности палеовулкана. Между извержениями существовал некоторый перерыв (рис. 2). На первых этапах происходило в основном излияние лав, а на последнем – формирование толщи эффузивных пород за счет эксплозивных извержений в подводных условиях. Самая молодая эффузивная толща представлена породами кластолавовой, ксенолавокластической, гиалокластической, ксенотефроидной и гидротермальной фаций (Лысенко, 2019).

Сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки приурочены к поверхности лав андезитового состава в центральной и южной зонах (см. рис. 1). В южной зоне находки единичны, многочисленные постройки встречаются в средней части центральной зоны.

Выходы лав имеют пластообразную или куполообразную форму (рис. 3а). По морфологии они имеют некоторое сходство с силлами или субвулканическими телами в северной части Горного Крыма (Лебединский, 1962). В отличие от силлов палеопотоки лав формировались на дне океана Тетис одновременно с терригенной толщей пород таврической серии. На это указывают резкие и неровные субсогласные и несогласные контакты лав с вмещающей толщей алевролитов и аргиллитов. Между лавами и аргиллитами находится “рубашка” карбоната миллиметровой мощности, формирование которой происходило при остывании палеопотока (Лысенко, 2019). Вблизи контактов от-

сутствуют следы воздействия высоких температур на вмещающие породы и образования в них роговиков. В зоне соприкосновения пород таврической серии с лавами отмечаются микролинзы алевролитовых тефроидов. На поверхности лав в некоторых местах наблюдаются следы процессов десквамации и формирования гиалокластитов (Лысенко, 2019). Во фронтальных частях палеопотоков локализуются пепериты, глыбовые лавокластиты и имеется минералогическая дифференциация пород от риодацитов до андезитов (Лысенко, 2019).

СУЛЬФИДНО-КАРБОНАТНЫЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-БАКТЕРИАЛЬНЫЕ ПОСТРОЙКИ

Нахождение в геологическом разрезе и морфологические особенности

В центральной зоне сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки наблюдаются в аргиллитах с прослоями алевролитов, которые перекрывают палеопотоки лав (см. рис. 1). Обычно их находки встречаются в терригенной толще пород таврической серии, а на поверхности лав фрагменты построек смыты современными делювиальными процессами поверхностных водотоков. По внешнему виду выходы построек в алевролитах и аргиллитах напоминают “конкреции” (рис. 3б, в). В некоторых местах на 1 м² насчитывается до восьми точек с подобными образованиями (см. рис. 3б). Из-за неровной поверхности лав и смятия аргиллитов сложно проследить условия залегания построек (см. рис. 3в). В процессе горных работ установлено, что с глубиной они часто увеличивают размеры и срastaются в одно строение сложной морфологии (рис. 3г).

Постройки преимущественно росли перпендикулярно к поверхности лав и слоистости вмещающей толщи. Основные их разновидности имеют вид вертикальных или слабоизогнутых труб длиной до 80 см и диаметром до 20 см (рис. 4а). На боковой поверхности трубчатых тел имеются наросты “паразитических” конусов с отводом в боковое пространство. В таких местах диаметр цилиндрической постройки увеличивается, а затем уменьшается до первоначальных размеров. Утолщения часто имеют эллипсоидную форму с наличием на верхних плоскостях конусовидных микрократеров. При извлечении построек из вмещающих пород таврической серии они распадаются на отдельные блоки шаровидной, амфоровидной, эллипсоидной, конусовидной, а чаще цилиндрической формы. Верхние конусообразные формы построек имеют сходство с современными гидротермальными шпильями (рис. 4б), которые получили название “диффузоры” (Fouquet et al., 1993; Масленников, 1999). Встречаются фрагменты труб, на поверхнос-

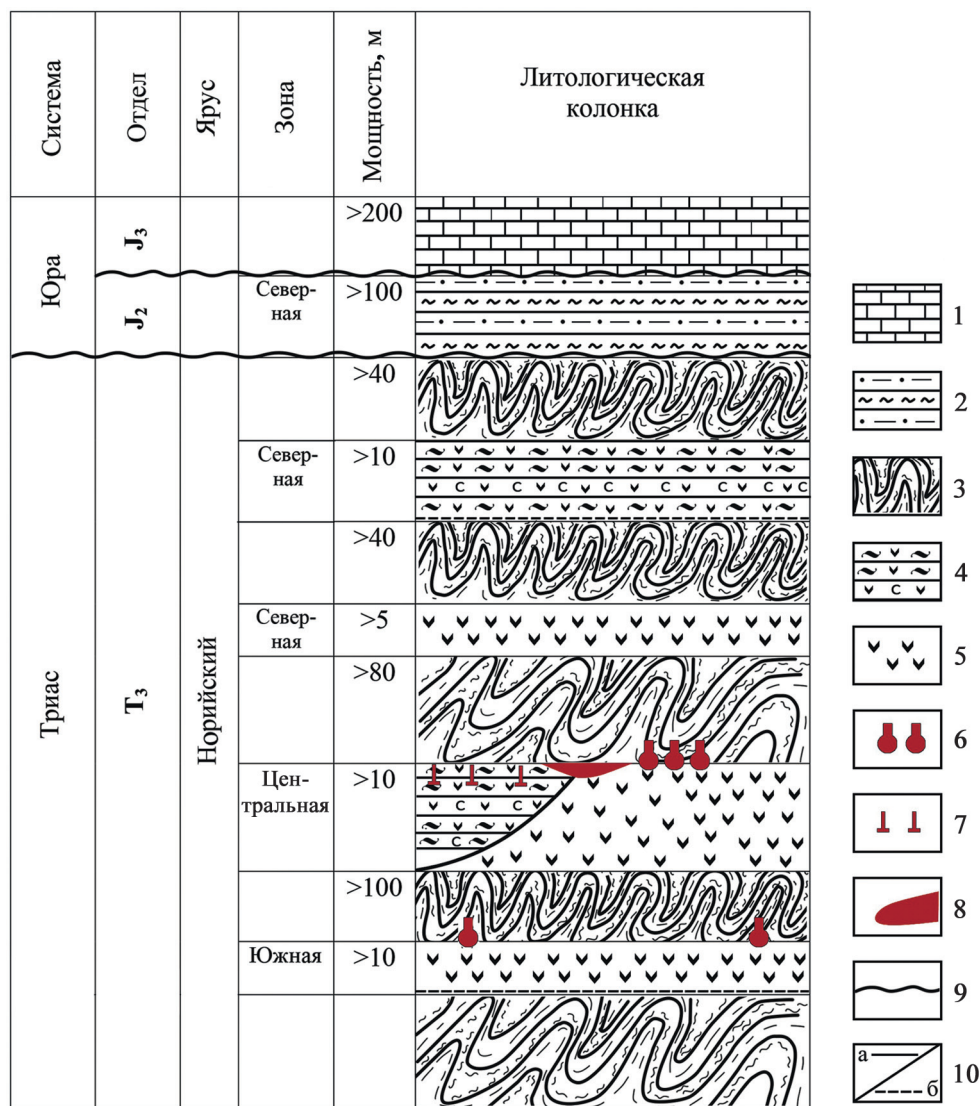


Рис. 2. Схематическая стратиграфическая колонка района Тессельского палеовулкана.

1 – мраморовидные известняки (J₃); 2 – глинистые алевролиты и аргиллиты (J₂); 3 – алевролиты и аргиллиты таврической свиты (T₃-J₁); 4 – эффузивная толща (T₃); 5 – лавы андезитов; 6 – сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки на поверхности лав; 7 – плоские гидротермально-бактериальные постройки; 8 – банка брахиопод *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys; 9 – породы залегают со стратиграфическим несогласием; 10 – резкие контакты между породами (а), контакты проследить не удалось (б).

Fig. 2. Schematic lithological – stratigraphic column of the Tessel paleovolcano area.

1 – marble-like limestones (J₃); 2 – clayey siltstones and mudstones (J₂); 3 – siltstones and mudstones of the Tauride Formation (T₃-J₁); 4 – effusive stratum (T₃); 5 – andesite lavas; 6 – sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures on the surface of lavas; 7 – flat hydrothermal-bacterial structures; 8 – jar of brachiopods *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys; 9 – rocks occur with stratigraphic unconformity; 10 – sharp contacts between rocks (a), contacts could not be traced (b).

ти которых наблюдаются открытые трещины, зеркала скольжения и залеченные кальцитом трещины разрыва и сдвига (рис. 4в). Зеркала скольжения обладают различной ориентировкой относительно длинной оси роста трубок. Развал построек на отдельные блоки и наличие в них разно ориентированных зон дробления свидетельствуют о постдиагенетических процессах смятия пород таврической

серии. Вмещающие алевролиты и аргиллиты имеют резкие контакты с постройками. На поверхности построек отмечаются отпечатки трубчатых червей, которые отсутствуют во вмещающих алевролитах (рис. 4г).

Реже встречаются сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки приплюснутой линзовидной формы (см. рис. 4г). Они сход-

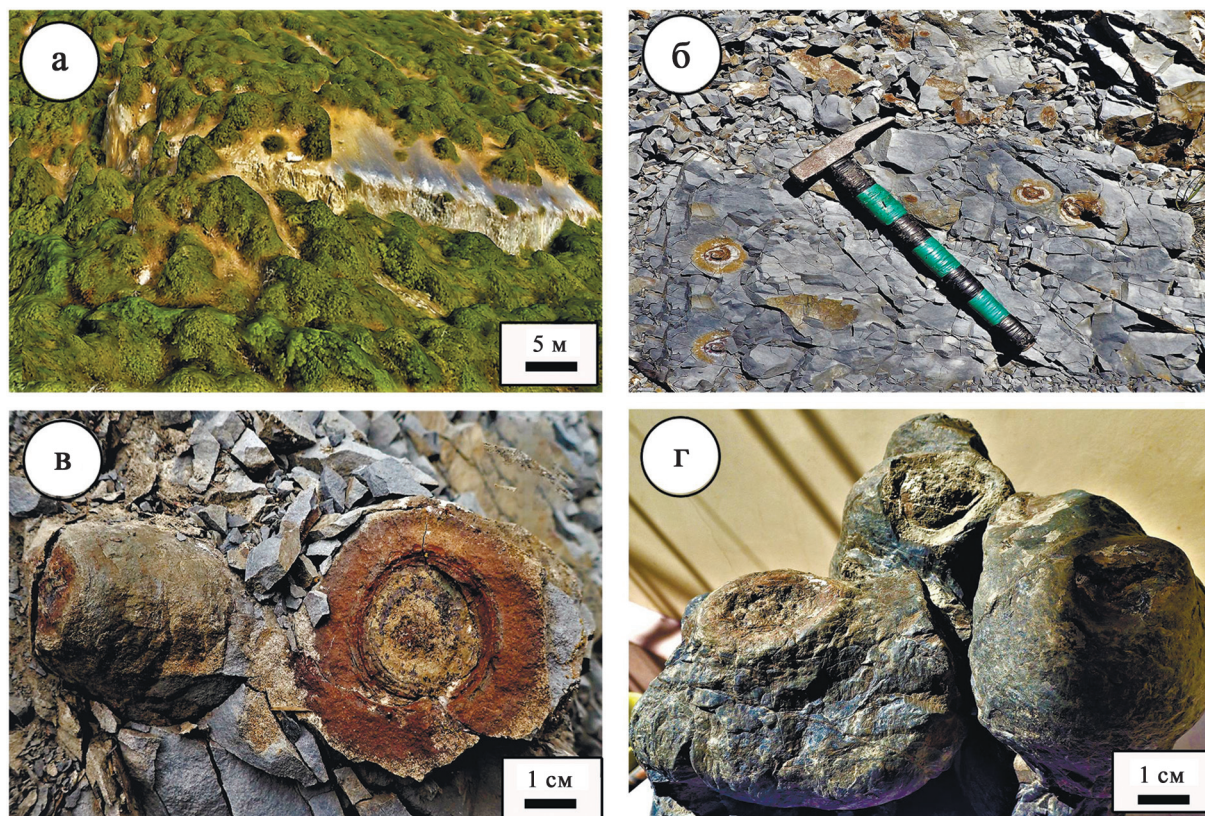


Рис. 3. Палеопотоки лав и гидротермально-бактериальные постройки.

а – выходы лав в центральной зоне; б – сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки в алевролитах; в – сростки трубчатых образований; г – сростки амфоровидных и шаровидных частей построек.

Fig. 3. Paleolava flow and hydrothermal-bacterial structures.

а – lava outcrops in the middle part of the central zone; б – outcrops of sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures in siltstones; в – aggregates of tubular formations; г – aggregates of amphora-shaped and spherical parts of buildings.

ны с горизонтальными карнизами на постройках черных курильщиков (Ames et al., 1993; Богданов и др., 2006). Плоские блинные формы занимают псевдостратиформное положение во вмещающей толще и резко граничат с ней. При раскопках установлено, что блиновидные формы имеют контакты с вертикальными постройками. На их боковых поверхностях находятся конусы с кратерообразными углублениями, центральная часть которых сложена сульфидами. Иногда на верхней поверхности плоских построек наблюдаются отпечатки трубчатых червей и присутствие лапилли андезитов.

В полировке штупа контакта сульфидно-карбонатной гидротермально-бактериальной постройки с лавами и алевролитами хорошо видно, что местом их зарождения было микропонижение на поверхности палеопотока лав (рис. 5а). Границей между ними и лавами является тонкая “межконтактовая прослойка”. Она представлена серовато-белым кальцитом мощностью 0.5–3.5 мм (Лысенко, 2019). Эта кальцитовая прослойка обво-

лакивает нижнюю часть постройки и отделяет ее от эффузивов и вмещающих аргиллитов и алевролитов. Нижняя часть постройки имеет воронкообразную форму с пережимами. В центре нее находится флюидный канал с сульфидной минерализацией (см. рис. 5а). Низ постройки вблизи контакта сложен сферолитами кальцита, которые имеют вид “петушиных перьев” (рис. 6б).

Минеральный состав

Кроме морфологического разнообразия построек наблюдаются некоторые различия в их минеральном составе, что подчеркивается окраской. Для них характерна концентрическая зональность, которая просматривается по всей их длине за счет цветовой гаммы карбонатов и сульфидов (рис. 5в, г, 6а). Условно можно выделить следующие зоны: центральную, боковую и зону бактериального обрастания. Они характеризуются непостоянной мощностью, чем отличаются от строе-

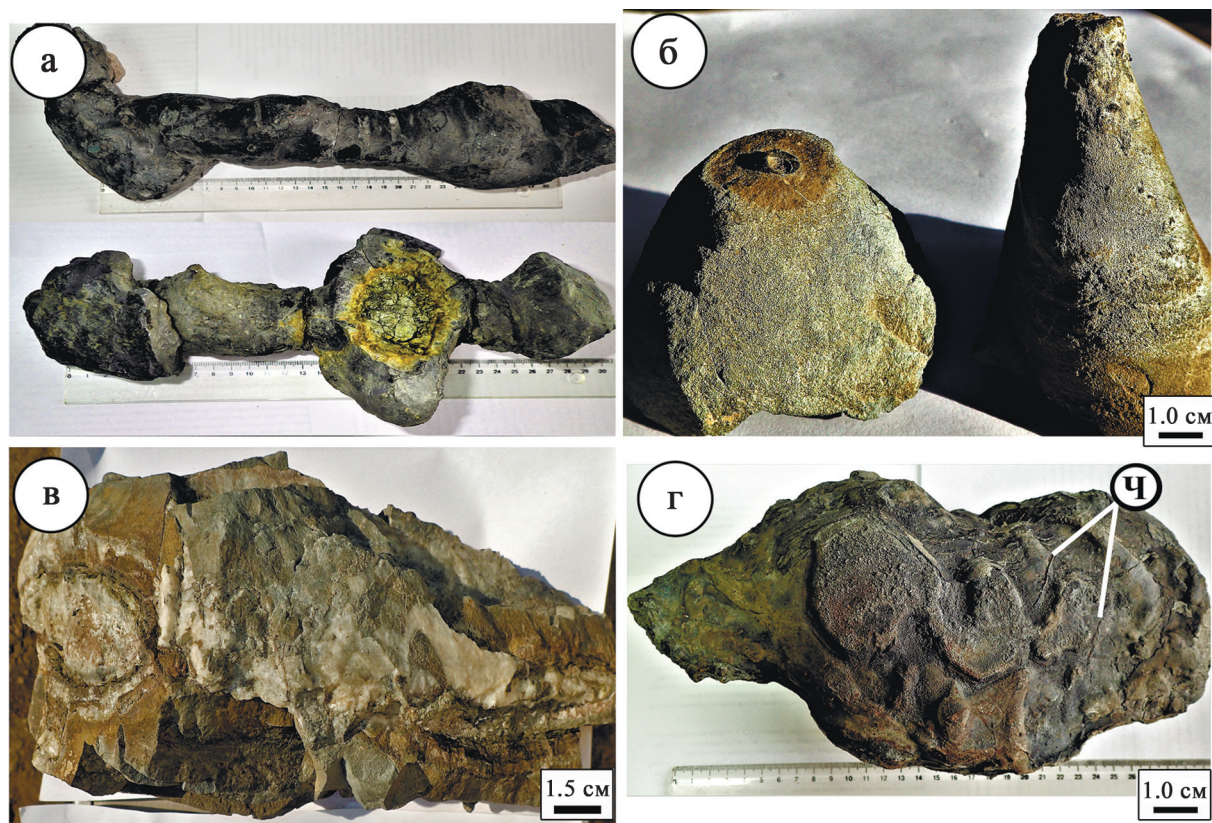


Рис. 4. Морфологические формы построек.

а – трубчатые образования с эллипсовидными утолщениями в местах с богатой сульфидной минерализацией; б – формы верхних частей построек; в – фрагменты трубы с зеркалами скольжения и залеченными кальцитом трещинами разрыва на ней; г – сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки приплюснутой линзовидной формы (горизонтальные карнизы) с отпечатками трубчатых червей (Ч).

Fig. 4. Morphological forms of hydrothermal-bacterial buildings.

а – parts of vertical tubular formations with elliptical thickenings in places with rich sulfide mineralization (central parts of buildings with fragments of the bacterial fouling zone); б – conical shapes of the upper parts of the buildings; в – fragments of a pipe with sliding mirrors and calcite-healed rupture cracks on it; г – sulfide-carbonate hydrothermal-bacterial structures of a flattened lenticular shape (horizontal cornices) with imprints of tubular worms (Ч).

ния концентрических конкреций и стяжений. Элементы зональности изменяются в местах перегибов, раздувов и при образовании на их поверхности кратерообразных наростов.

В средней части центральной зоны находится флюидный канал (см. рис. 5а–г, 6а). Он представлен полосой осветления с прерывистой сульфидной минерализацией. “Флюидная артерия” имеет мощность несколько миллиметров и неровное строение с перегибами. В верхней части она может быть пустотелой или осветленной областью с включениями кристаллов галенита, халькопирита, сфалерита и пирита (см. рис. 5в, г, 6б). Выходы флюидных каналов часто запечатаны сростками пирита (см. рис. 3б, 5в, 6а). Значительную часть осевой зоны занимают выделения антраконита, зеленоватых карбонатов и пирита. От канала иногда отходят микрозоны осветления, которые упираются на боковой по-

верхности в микрократеры. Пиритовая минерализация образует разрозненные обогащенные участки, а их раздувы имеют размеры до 50 мм (см. рис. 4а, 5в, 6а). Около участков, сложенных сульфидной минерализацией, наблюдается утолщение трубных тел (см. рис. 4а, 6а). В карбонатном материале центральной зоны встречаются вкрапленники кристаллов галенита, халькопирита, сфалерита, псевдоморфоз марказита по пирротину (см. рис. 6б), кварца (см. рис. 6в), барита и белого накрита (см. рис. 5в, 6г). Кристаллы кварца имеют короткопризматическую форму с пирамидальными верхушками. В нем отмечаются микровключения карбонатов и сульфидов (см. рис. 6в, 9г). Сростки кристаллов барита имеют удлиненную плоскую форму (см. рис. 9г). Пятна выделения накрита вытянуты вдоль флюидного канала и представлены разноориентированными микропластинками (см. рис. 6г).

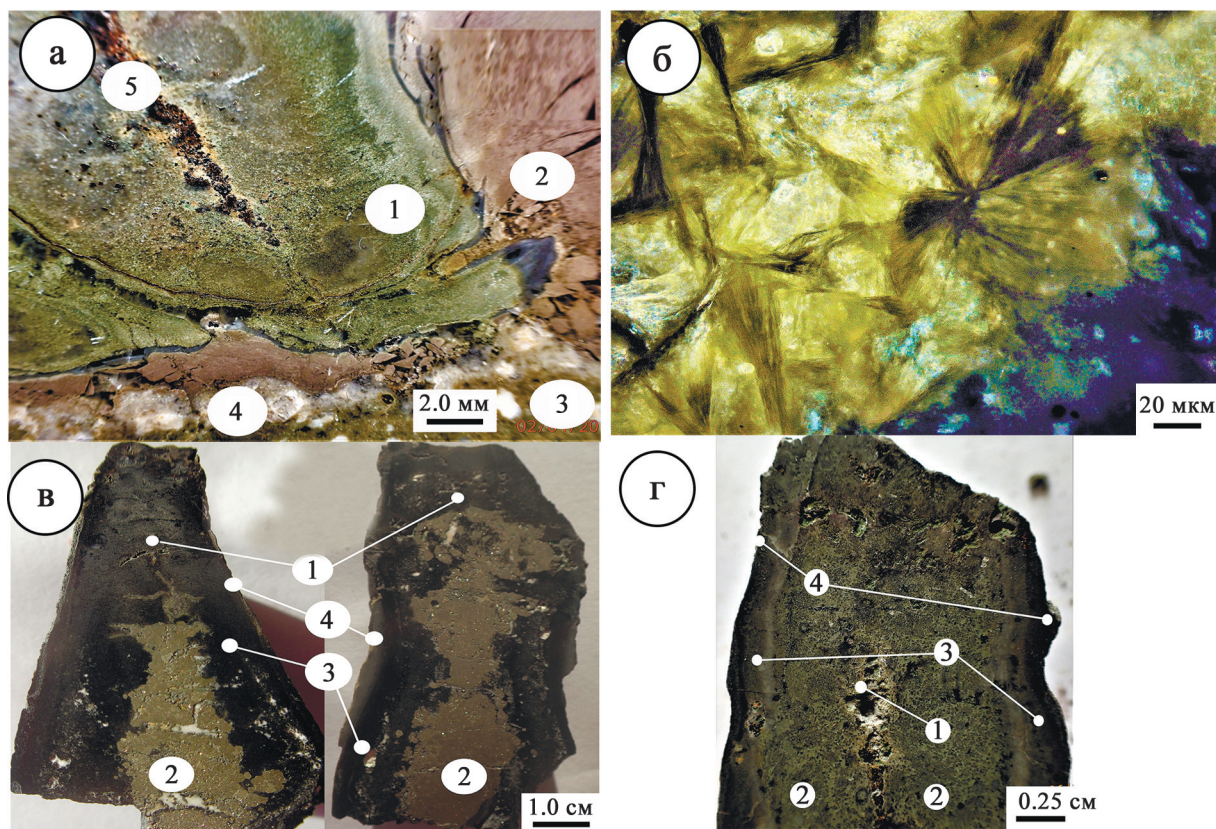


Рис. 5. Контакты построек с вмещающей толщей и их внутреннее строение.

а – полировка штуфа контактов сульфидно-карбонатной гидротермально-бактериальной постройки с лавами и алевролитами (1 – постройка, 2 – алевролиты, 3 – риодациты, 4 – “межконтактная прослойка”, 5 – флюидный канал); б – “петушиные перья” кальцита у контакта с лавами; в – зональность диффузоров с белыми пятнами накрит (1 – флюидный канал, 2 – центральная, 3 – боковая; 4 – зона бактериального обрастания); г – зональность постройки с пустотелым флюидным каналом (обозначения – см. фото “в”). Фото “б” – в проходящем свете.

Fig. 5. Contacts of buildings with the host strata and their internal structure.

а – polishing of the ore contacts of the sulfide-carbonate tubular structure with lavas and siltstones (1 – bacterial edifice, 2 – siltstones, 3 – rhyodacite, 4 – “intercontact interlayer”, 5 – fluid channel); б – “cock’s feathers” of calcite spherulite formations at contact with lavas; в – zoning of diffusers with white nakrit spots (1 – fluid channel, 2 – central, 3 – lateral, 4 – zone of bacterial fouling); г – zoning of the structure with a hollow fluid channel (explanations – see photo “в”). Photo “б” in transmitted light.

Около флюидного канала присутствуют сферолиты карбоната (рис. 7а). Их образование происходило раньше или совместно с формированием сульфидов. Подобные круглые пятнистые дырчатые формы карбоната обнаружены в сфалерите (рис. 7б) и псевдоморфозах марказита по пирротину (рис. 7в). Возможно, часть из них являются не сферолитами, а сростками трубчатых форм. Это подтверждают вытянутые эллипсовидные срезы некоторых микротрубчатых форм.

В центральной зоне встречаются микролинзы керита (антракосолита). На жизнедеятельность вблизи флюидных каналов указывают находки ракушек моллюсков, гастропод, трубчатых червей и фораминифер (рис. 7г). Они характеризуются плохой сохранностью, а карбонатный материал раковин в основном замещен пиритом. В центральной

зоне наблюдаются вулканокласты (рис. 8а) и пепел вулканического стекла (рис. 8б). Рогульки вулканического стекла в кристаллах карбоната подчеркивают зоны его роста.

Боковая зона построек сложена серовато-черным антраконитом, реже серовато-зеленым полупрозрачным кальцитом. Ее мощность в разных местах меняется от 2.0 до 20.0 мм (см. рис. 5в, 5г). Сульфидная минерализация представлена пиритом и сростками пластинчатых кристаллов псевдоморфоз марказита по пирротину. Граница боковой зоны с внешним слоем бактериального обрастания волнистая слабо заметная, а иногда довольно резкая (рис. 8г). На ее внешней поверхности имеются в некоторых местах примазки корочек керита (антракосолита) и аргиллитов.

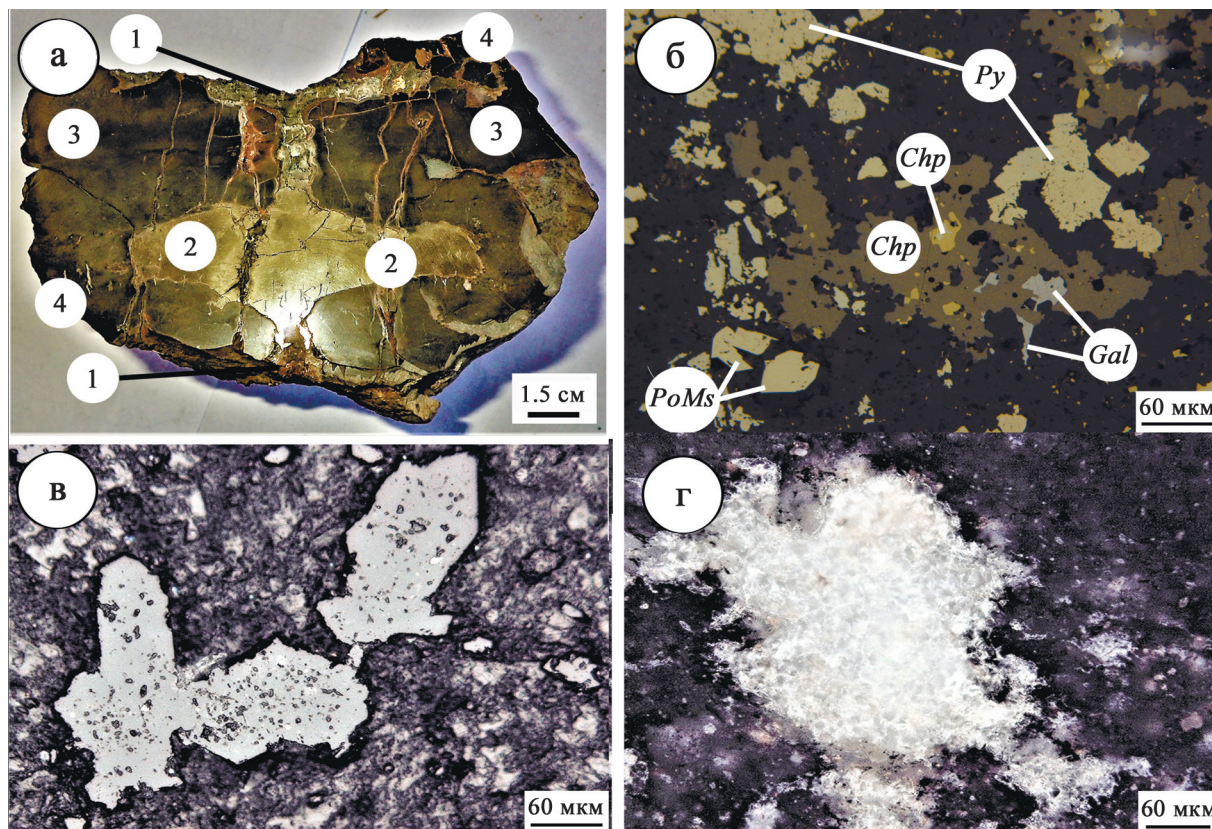


Рис. 6. Внутреннее строение построек.

а – зональность плоской формы со сплошной сульфидной минерализацией в центральной зоне (обозначения – см. рис. 5в); б – вкрапленники кристаллов галенита (*Gal*), халькопирита (*Chp*), сфалерита (*Sph*), пирита (*Py*) и псевдоморфоз марказита по пирротину (*PoMs*) в центральной зоне вблизи флюидного канала; в – кристаллы кварца; г – пластинчатые выделения накрита. Фото “б” – в отраженных электронах, “в” и “г” – в проходящем свете.

Fig. 6. Internal structure of buildings.

а – zoning of a flat building, the central zone is filled with continuous sulfide mineralization (explanations – see Fig. 5в); б – phenocrysts of galena (*Gal*), chalcopyrite (*Chp*), sphalerite (*Sph*), pyrite (*Py*) crystals, and pseudomorphs of marcasite over pyrrhotite (*PoMs*) in the central zone near the fluid channel; в – quartz crystals; г – lamellar nakrit discharge. Photo “б” – in reflected light, “в” and “г” – in transmitted light.

Зона бактериального обрастания в некоторых местах состоит из нескольких слоев, разделенных микропримазками глинистого материала. Ее общая мощность от 2.0 до 80.0 мм. Чехлы нитчатых бактерий имеют вид микротрубок с округлыми порами (рис. 8в), которые ориентированы перпендикулярно поверхности зоны обрастания. В перпендикулярных срезах трубчатые строения в виде серых и серовато-черных сферолитов составляют 40–70% общего объема зоны бактериального обрастания (см. рис. 8в, г). Бактериальный карбонатный материал трубчатых футляров является цементом алевролитов, которые представлены кварцем, хлоритом, смектитом и аморфным кремнеземом. Границы бактериального обрастания с боковой зоной и вмещающими породами довольно отчетливые, реже слегка расплывчатые (см. рис. 8г). На внешней поверхности бактериального обрастания отмеча-

ются слепки червей, выполненные карбонатом (см. рис. 4г, 5б).

Карбонатная и сульфидная минерализация

Самыми распространенными минералами в центральных и боковых зонах построек являются пирит, серо-зеленые карбонаты и черно-коричневый антраконит. Темная окраска антраконита связана с наличием в нем битумов. При его растворении в кислоте на поверхности раствора образуется радужная пленка легкой нефти, а на дне емкости наблюдаются отложения тяжелых углеводородов черного цвета.

Результаты анализов карбонатов и сульфидов, выполненных с помощью рентгеновского энергодисперсного спектрометра на растровом электронном микроскопе, приведены в табл. 1 и 2.

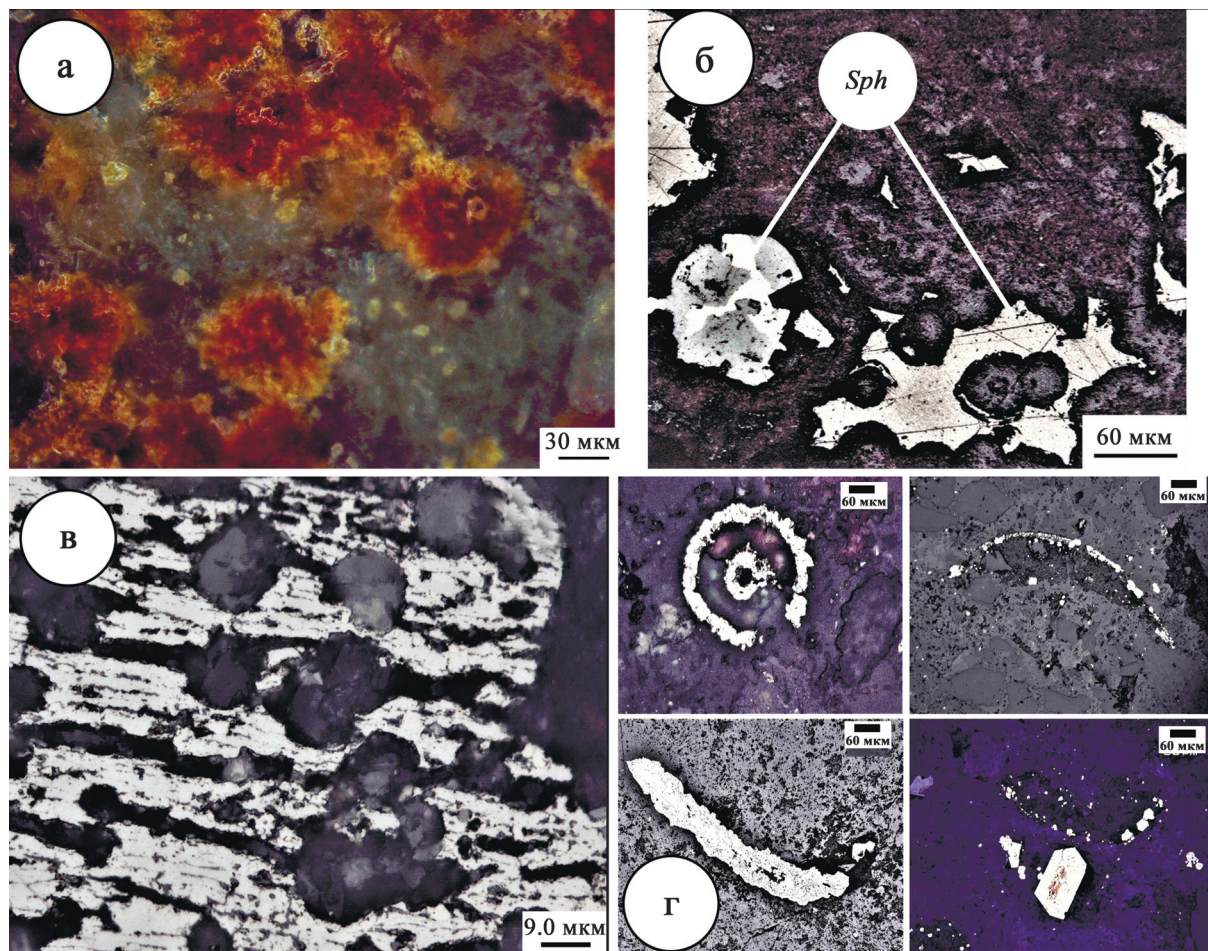


Рис. 7. Фауна и следы бактериальной деятельности в центральной зоне.

а – сферолиты карбоната; б – сферолиты карбоната в сфалерите (*Sph*); в – сферолиты карбоната в псевдоморфозах марказита по пирротину; г – отпечатки двустворчатых моллюсков, гастропод и трубчатых червей. Фото “а” – в проходящем свете, “б”–“г” в отраженном свете.

Fig. 7. Traces of bacterial activity in the central zone.

а – carbonate spherulites; б – spherulites of carbonate in sphalerite (*Sph*); в – carbonate spherulites in pseudomorphs of marcasite over pyrrhotite; г – imprints of bivalve molluscs, gastropods and tubular worms. Photo “а” – in transmitted light, “б”–“г” – in reflected light.

Значительная часть карбонатов в центральных и боковых зонах представлена кальцитом, который характеризуется повышенными концентрациями Mn, Fe и Sr (см. табл. 1). Его приведенная формула имеет вид: $\text{Ca}_{0.884}(\text{Mn}_{0.097}\text{Fe}_{0.018}\text{Sr}_{0.001})\text{CO}_3$.

Вблизи флюидного канала встречаются кристаллы анкерита со следующим составом: $\text{Ca}_{1.086}(\text{Fe}_{0.519}\text{Mg}_{0.335}\text{Mn}_{0.060})(\text{CO}_3)_2$. Они характеризуются высокими содержаниями Mn и Fe (см. табл. 1).

Находку церуссита $[\text{Pb}_{0.886}\text{Cu}_{0.114}(\text{CO}_3)]$ можно было бы объяснить выветриванием галенита, но в образце отсутствуют следы окисления других сульфидов. Высокие содержания меди свидетельствуют о возможном его гидротермальном генезисе (см. табл. 1).

В сульфидно-карбонатных трубчатых постройках выделения пирита представлены в виде отдельных кристаллов или их сростков, имеющих кубический и пентагондодекаэдрический габитус (см. рис. 6б, 9а). При травлении кислотой просматривается зональность пирита. Опробование разных зон не выявило различий в них по составу элементов. Возможно, это разные агрегатные состояния блоков кристаллической решетки. На полигенную природу образования отдельных кристаллов пирита указывают непостоянные концентрации в них Ni, Co, As и Se (см. табл. 2). Повышенные содержания селена характерны для пирита вблизи флюидного канала. Крупные скопления кристаллов пирита (см. рис. 5в, 6а) в центральной зоне повторяются

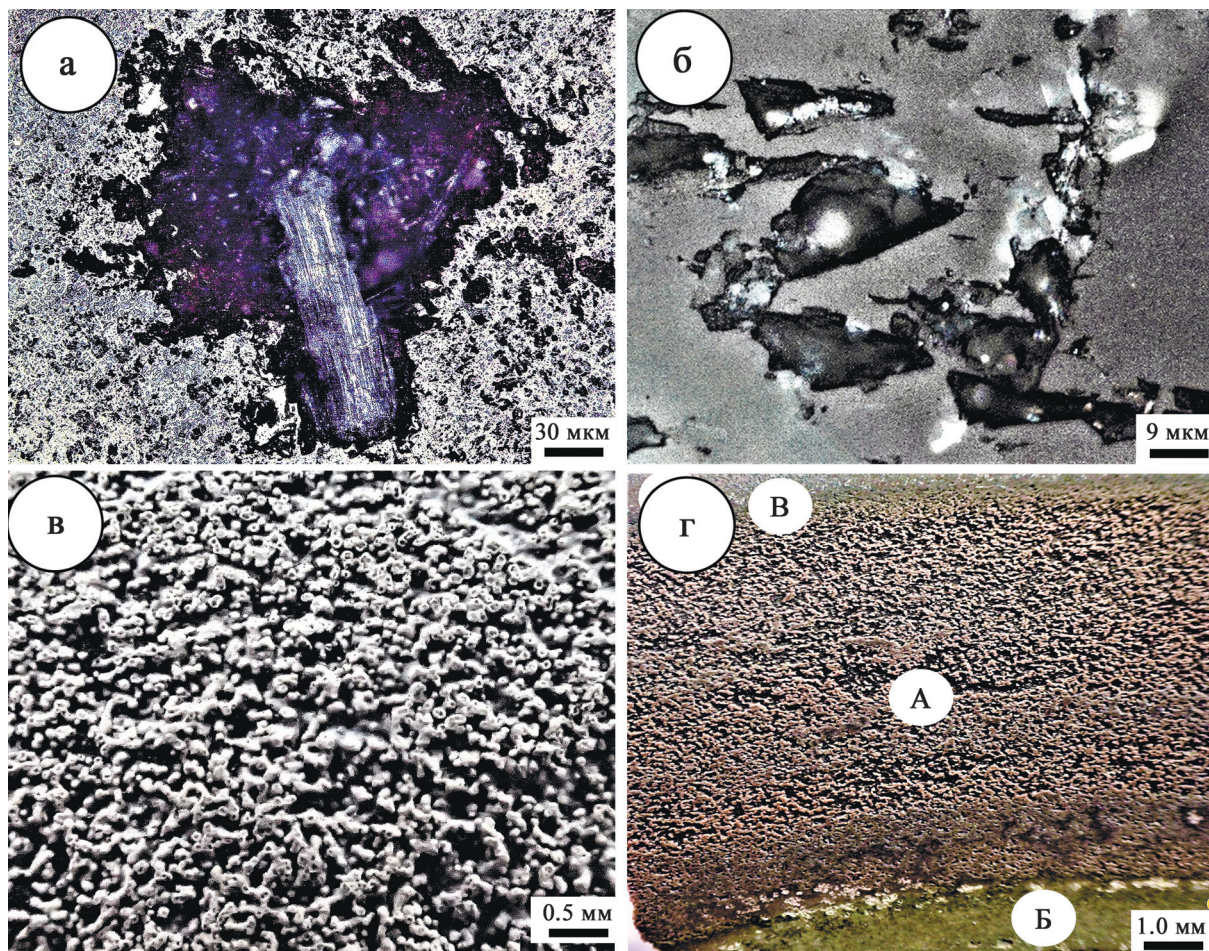


Рис. 8. Пепловый материал и зона бактериального обрастания.

а – туфовый материал; б – пепловый материал вулканического стекла в карбонате постройки; в – переплетение чехлов микротрубок нитчатых бактерий; г – границы зоны бактериального обрастания (А) с боковой (Б) и алевролитами (В). Фото “а” и “б” – в проходящем свете.

Fig. 8. Ash material and a zone of bacterial fouling.

а – fragments of tuff material; б – ash material of volcanic glass in the carbonate of the building; в – interlacing of filamentous bacteria sheaths in the form of microtubes; г – boundaries of the bacterial overgrowth zone (A) with the lateral zone (B) and host rocks (B). Photos “а” and “б” – in transmitted light.

через некоторый промежуток. В пирите отмечают включения кварца, кальцита, сфалерита и рутила (см. рис. 9а). Микросростки рутила в нем характеризуются повышенными концентрациями Fe (0.88–1.06%), Sc (0.06–0.31%), Zr (0.14–0.93%), Nb (0.15–0.26%) и W (0.13–0.42%).

Кристаллы сфалерита образуют крупные выделения в центральных и боковых зонах, его мелкие выделения также встречаются в крупных кристаллах пирита (см. рис. 6б, 9а, б). Под микроскопом видно, что его поверхность покрыта тонкой эмульсионной пленкой халькопирита (халькопиритовая болезнь). В анализах сфалерита отмечают повышенные содержания Fe, Cu, Cd и Mn (см. табл. 2). Его элементный состав можно предста-

вить следующими формулами: $\text{Zn}_{0.596}\text{Fe}_{0.210}\text{Cu}_{0.204}\text{S}$, $\text{Zn}_{0.810}\text{Fe}_{0.115}\text{Cu}_{0.073}\text{Cd}_{0.001}\text{S}$, $\text{Zn}_{0.673}\text{Fe}_{0.229}\text{Cu}_{0.101}\text{Mn}_{0.002}\text{Cd}_{0.001}\text{S}$ и $\text{Zn}_{0.630}\text{Fe}_{0.216}\text{Cu}_{0.147}\text{Mn}_{0.002}\text{S}$.

Галенит и халькопирит встречаются в виде мелких кристаллов совместно со сфалеритом, реже с пиритом (см. рис. 6б, 9б). Значительная часть этих минералов находится в центральной зоне вблизи флюидного канала и редко в боковой зоне. Результаты анализов не отличаются от теоретических расчетов содержаний этих элементов в минералах (см. табл. 2).

Отдельные кристаллы псевдоморфоз марказита по пирротину и их сростки довольно часто встречаются в боковых, а реже – в центральных зонах сульфидно-карбонатных построек (см. рис. 6б, 7в, 9в).

Таблица 1. Содержание окислов химических элементов в карбонатах, %**Table 1.** Content of oxides of chemical elements in carbonates, %

Минерал	№ пробы	CO ₂	CuO	PbO	CaO	MnO	MgO	FeO	SrO	Сумма
Кальцит	124с	43.10	—	—	48.44	6.72	—	1.25	0.13	99.63
	125L	43.70	—	—	51.69	3.57	—	1.17	0.12	100.25
	124m	43.50	—	—	52.63	2.85	—	0.65	—	99.62
Анкерит	124n	43.20	—	—	29.79	2.07	6.61	18.25	—	99.93
	124j	43.30	—	—	30.09	2.30	6.52	17.82	—	100.03
Церуссит	124b	17.60	3.60	78.88	—	—	—	—	—	100.09

Таблица 2. Содержание химических элементов в сульфидах, %**Table 2.** Content of chemical elements in sulfides, %

Минерал	№ пробы	S	Fe	Pb	Cu	Zn	Ni	As	Se	Cd	Co	Сумма
Пирит	124d	53.15	45.10	—	—	—	1.55	—	—	—	—	99.80
	124e	54.43	43.70	—	—	—	2.84	—	—	—	—	99.96
	125a	53.43	46.36	—	—	—	—	—	—	—	—	99.78
	125i	52.82	45.60	—	—	—	1.06	—	—	—	—	99.48
	125k	52.64	45.19	—	—	—	1.17	—	—	—	0.01	99.01
	L2-02	52.84	46.41	—	—	—	—	0.26	—	—	0.20	99.51
	L2-03	51.90	46.08	—	—	—	—	1.40	—	—	0.15	99.53
	L2-14	52.06	46.28	—	—	—	—	0.29	0.22	—	—	98.85
Сфалерит	124h	32.85	10.34	—	11.09	45.24	—	—	0.12	0.15	—	99.52
	125g	33.41	12.21	—	13.50	40.57	—	—	—	—	—	99.69
	L2-05	33.31	13.30	—	6.59	45.69	—	—	—	0.13	—	99.02
	L2-06	33.11	12.48	—	9.63	42.69	—	—	0.17	—	—	99.04
	L2-08	33.32	10.60	—	11.62	43.42	—	—	0.18	0.11	—	99.07
Халькопирит	124i	34.71	31.06	—	34.21	—	0.12	—	—	—	—	99.99
	124L	34.92	30.48	—	34.38	—	0.18	—	0.14	—	—	99.72
Галенит	124a	12.40	—	86.94	—	—	—	—	—	—	—	99.34
	124g	13.21	—	86.22	—	—	—	—	—	—	—	99.43
	125h	12.03	—	87.79	—	—	—	—	—	—	—	99.82

Обычно они имеют удлиненную призматическую форму размером до 10 мм. Иногда эти псевдоморфозы имеют сростки с пепловым материалом вулканического стекла.

ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СУЛЬФИДНО-КАРБОНАТНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-БАКТЕРИАЛЬНЫХ ПОСТРОЕК

Образование тессельских сульфидно-карбонатных построек происходило во время извержения и остывания лав палеопотока. Выше были приведены признаки лавовой природы магматических тел Тессельского палеовулкана (Лысенко, 2019). О подводном характере его извержения свидетельствуют зоны пеперитов, многочисленные следы десквамации на поверхности лав и нахождение их в толще аргиллитов и алевролитов (см. рис. 2). Главными доказательствами образования лав в подводных условиях являются находки различных гидротермально-бактериальных построек

и банки брахиопод. В терригенно-эффузивной толще обнаружены брахиоподы *Worobiella* ex gr. *caucasica* Dagys и аммонит *Megaphyllites insectus* (Mojsisovics) (Лысенко, 2019; Лысенко и др., 2022). Эти находки позволяют считать, что активная деятельность Тессельского палеовулкана происходила в норийский век позднего триаса, который характеризуется усилением вулканической активности во многих регионах Земли (Blackburn et al., 2013; Лысенко, 2019).

Петрографический состав лав и туфов, а также широкое распространение в отложениях Тессельского палеовулкана пемзового материала андезитов позволили сравнить его с подобным островодужным вулканом Пийпа (Seliverstov et al., 1994; Лысенко, 2019). У нас отсутствуют данные о составе флюидов Тессельского палеовулкана. Можно предположить, что они мало отличаются от составов флюидов современного вулкана Пийпа. В его газах доминировали CH₄ (80–98%), N (до 17%) и H₂S, а также присутствовали CO₂, O₂, H₂, C₂H₆, и C₃H₈ (Полоник, 2018). Подобный состав палеофлюидов Тес-

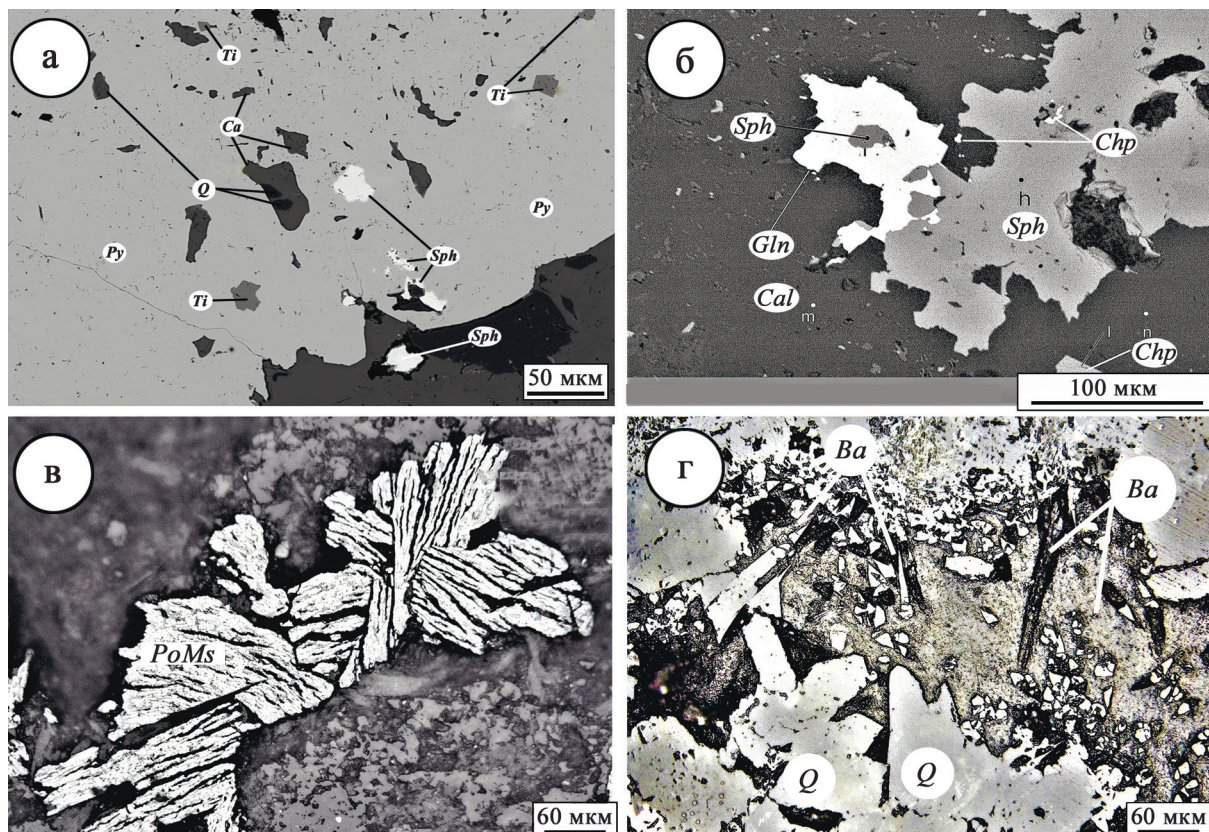


Рис. 9. Минерализация в центральной зоне.

а – включения в пирите кварца (*Q*), кальцита (*Ca*), сфалерита (*Sph*) и рутила (*Ti*); б – галенит (*Gal*), халькопирит (*Chp*) и сфалерит (*Sph*); в – сростки кристаллов псевдоморфов марказита по пирротину (*PoMs*); г – барит (*Ba*) и кварц (*Q*). Фото “а” и “б” – в отраженных электронах, “в” – в отраженном свете, “г” – в проходящем свете.

Fig. 9. Mineralization in the central zone.

а – inclusions in pyrite of quartz (*Q*), calcite (*Ca*), sphalerite (*Sph*) and rutile (*Ti*); б – galena (*Gal*), chalcopyrite (*Chp*), and sphalerite (*Sph*) in the central zone; в – intergrowths of crystals of pseudomorphs of marcasite over pyrrhotite; г – barite (*Ba*) and quartz (*Q*) in the central zone. Photos “а” and “б” – in reflected light, “г” – in transmitted light.

сельского палеовулкана подтверждается минералогией построек различной морфологии, наличием в андезитах многочисленных миндалинов и прожилков с антраконином и пиритом (Лысенко, 2019; Лысенко и др., 2022). На непостоянство газового состава и объемов выбросов палеофлюидов указывает распределение сульфидов и карбонатов в постройках (см. рис. 4б, 5в, 6а) (Baker et al., 1989). Во флюидах кроме газа присутствовали глубинные гидротермальные растворы. Поступление палеофлюидов имело периодический и пульсирующий характер.

При извержении лав с их поверхности происходила диффузия сероводорода, метана и других газов (Torokhov, Taran, 1994; Малышев, 2015). Они насыщали иловую толщу, которая формировалась на палеопотоке лав. Газы и пепел служили пищей археям и бактериям (Мархинин, 1980). В результате процессов хемогенного синтеза сообщества прокариот перерабатывали газ в органическое веще-

ство и карбонат. Происходила мгновенная карбонатная цементация иловой толщи. После образования на поверхности лав крепкой карбонатной корки жизнедеятельность прокариот продолжалась у зон трещиноватости, где шло поступление палеофлюидов. Эти узкие линейные зоны в карбонизированных алевролитах и аргиллитах приурочены к краевым валлообразным поднятиям на поверхности лав палеопотока. Предположительно, образование у них сквозных трещин усиливалось за счет изменения объема лавы при остывании и при воздействии тектонических процессов.

В современной научной литературе не совсем ясен вопрос образования трубчатых строений бесцветных мерцающих курильщиков, к которым можно отнести тессельские сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки. Некоторые исследователи считают, что они формировались за счет переработки вмещающих осадочных

толщ гидротермальными растворами, поступавшими из недр (Baker et al., 1989; Ames et al., 1993; Богданов и др., 2006). В то же время при визуальном осмотре из ГОА подводного вулкана Пийпа было установлено, что рост трубчатых образований происходил в открытом пространстве на поверхности магматических пород вблизи кратера вулкана (Богданова и др., 1989). Подобные процессы характерны и для формирования тессельских построек. Как отмечалось выше, вблизи контактов с лавой они сложены сферолитами карбоната, которые представлены сростками кальцита перьевидной формы (см. рис. 5б). Образование таких форм было поэтапным. Вначале в свободном пространстве процессами бактериального хемосинтеза формировались сферолиты арагонита. Позднее, при замещении арагонита кальцитом, происходило увеличение объема и развитие сферолитов с изогнутыми перьевидными формами. Из-за значительного поступления углеводородных флюидов по зонам трещиноватости сообщества микроорганизмов успевали создавать фундамент постройки на поверхности лав до отложения терригенной толщи алевролитов (см. рис. 5а). Доказательством данных условий являются находки наростов трубчатых червей на их наружных и внутренних стенках построек (см. рис. 4г, 7г). При этом рядом, во вмещающей толще, отсутствуют отпечатки и следы ползания этой фауны. Присутствие лапилли андезитов, туфового материала (см. рис. 8а) и пепла вулканического стекла (см. рис. 8б) в центральных и боковых зонах построек является дополнительным подтверждением их роста в открытом пространстве. Формирование построек происходило в период активной вулканической деятельности. Сферолитовые и микротрубчатые образования карбоната в центральной и бактериальной зонах позволяли существовать одновременно процессам флюидных потоков и диффузии CH_4 и H_2S .

Образование сульфидно-карбонатных гидротермально-карбонатных построек на поверхности лав занимало короткий промежуток времени, как и образование подобных “черных курильщиков”. На высокие скорости роста указывает примесь пепла вулканического стекла, которая маркирует зоны роста кальцита и анкерита (Embley et al., 1988). Рост и размеры построек обусловлены объемом и составом палеофлюидных потоков и жизнедеятельностью прокариот (Fouquet, Juniper, 1988; Karl, 1995). По предположению одного из авторов, образование и рост в них центральной, боковой и зоны бактериального обрастания происходили почти одновременно. Сообщества архей и бактерий создавали и контролировали процессы формирования карбонатов и сульфидов. На это указывают их сферолитовые и микротрубчатые образования в центральной зоне (см. рис. 8а–в) и присутствие керита (Fouquet, Juniper, 1988; Verati et al., 1999; Мас-

ленников и др., 2016). Дополнительно об этом свидетельствуют высокие содержания стронция в карбонате (см. табл. 1) (Юдович, Кетрис, 2011). Материал для создания карбонатов и сульфидов поступал из недр с флюидным потоком, что подтверждается повышенными концентрациями в минералах Ni, Co, As, Se и Te (см. табл. 1, 2) (Масленников и др., 2016). Этот же спектр элементов характерен для сульфидов построек вулкана Пийпа и впадин Гуаймас (Butterfield, Massoth, 1994; Doe, 1994; Torokhov, Taran, 1994). Пирит в центральной зоне представлен, как отмечалось выше, в виде сростков кристаллов с включениями кварца, кальцита, сфалерита и рутила (см. рис. 9а). Повышенные содержания Zr, Nb и W в рутиле подтверждают связь палеофлюидов с более кислым вулканизмом, чем извержения базальтов (Юдович, Кетрис, 2011). Дополнительно на участие гидротермальных процессов в образовании построек указывают находки в осевой зоне сульфидов, кварца, барита и накрита (рис. 4б–г; 7б, г) (Alt, 1988). Содержание селена в сульфидах свидетельствует о средних температурах флюидов лав (Auclair et al., 1987; Масленников и др., 2016).

Как уже отмечалось, образование сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек на поверхности лав начиналось с создания зоны бактериального обрастания. В дальнейшем она была своеобразным строительным каркасом и защитной оболочкой трубчатых построек. Зона создана переплетением чехлов микротрубок с округлыми отверстиями. Ориентировка микротрубок указывает на радикальный рост с поверхности боковой зоны постройки. По внешней форме такие обрастания не отличаются от подобных трубчатых бактериальных обрастаний на трубах современных и древних “черных курильщиков” (Fouquet, Juniper, 1988; Масленников, 1999). Различие заключается в том, что в триасе для построения трубчатых чехлов прокариоты активно использовали хлорит, аморфный кремнезем и переработанный бактериями пепловый материал. Нитевидные переплетения на внешней зоне “черных курильщиков” имеют в большинстве случаев сульфидный состав (Fouquet, Juniper, 1988). Различный минеральный состав бактериальных чехлов у тессельских и “черных курильщиков” связан с составом флюидов, его температурным режимом и глубинами формирования построек.

Наличие в зоне бактериального обрастания микропримазок аргиллитов указывает на периоды импульсного поступления и временное прекращение диффузионного просачивания углеводородных флюидов (Baker et al., 1989). Объем углеводородов возрастал в момент временной колюматации прокариотами флюидного канала и увеличения поступления метана. В нижней части внешняя поверхность постройки часто продолжала свой рост в тер-

ригенной иловой толще, что связано с продолжением поступления диффузионного метана. Рост зоны бактериального обрастания и построек заканчивался с прекращением поступления флюидов. Возможно, кроме диффузных углеродов частично использовался метан, созданный метаногенами. Об этом свидетельствуют наблюдаемые иногда нечеткие границы построек с терригенными породами.

Литологический состав вмещающих толщ таврической серии, наличие многочисленного пемзового материала с везикулярной текстурой и большое количество миндалин в породах лавы позволяют предполагать, что формирование эффузивной толщи происходило на значительных глубинах (Лысенко, 2019). Возможно, они были меньше глубин формирования “черных курильщиков”, но больше интервала 380–410 м – поверхности дна вулкана Пийпа с сульфидно-карбонатными постройками (Богданова и др., 1989). Невысокие содержания рудных компонентов во флюидах Тессельского палеовулкана исследователи объясняют фазовой сепарацией из-за малого давления водного столба (Torokhov, Taran, 1994; Богданов и др., 2006). Присутствие в сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных постройках галенита, халькопирита, сфалерита и пирротина свидетельствует о том, что глубины их формирования были вблизи зоны сепарации. Значительное резкое увеличение сульфидной минерализации в некоторых частях построек связано с изменением состава палеофлюидов, которые контролировались тектоникой.

Анализ глубин показал, что жизнь на поверхности лав палеопотока происходила в афотической зоне. О бурной жизнедеятельности построек свидетельствуют находки в них и на поверхности двусторчатых моллюсков, гастропод, трубчатых червей и фораминифер. Оазисы жизни с крупной фауной существовали за счет симбиоза с прокариотами. Сообщества метанотрофных, метаногенных, сульфатредуцирующих, нитратредуцирующих архей и бактерий создавали из углеводородных флюидов карбонат и органическое вещество, которое использовалось для питания обитателями оазиса (Arquit, 1990; Cook, Stakes, 1995; Масленников и др., 2016). Подобные участки с высокой биологической продуктивностью существуют вблизи современных гидротермальных источников на постройках “черных курильщиков” (Corliss et al., 1979; Arquit, 1990; Karl, 1995). Следы органических остатков позднего триаса отсутствуют во вмещающих породах таврической серии, что, возможно, связано с высокими скоростями формирования осадочной толщи ниже критической зоны карбонатного накопления.

Гидротермальные поля с современными “черными и серыми курильщиками” встречаются в различных геологических структурах на ультрамор-

фитах в рифтовых зонах Среднего Атлантического хребта, дацитах и андезитах кальдер вулканов и на осадочно-риолитовом основании в задуговых окраинно-континентальных рифтах (Binns, Scott, 1993; Fouquet et al., 1993; Doe, 1994; Богданов и др., 2006). В пределах одного гидротермального поля трубчатые постройки имеют разнообразную морфологию, различный минеральный состав и геохимию элементов примесей, что связано с вариацией конкретных физико-химических условий их образования и составом флюидов (Богданов и др., 2006). Несмотря на минералогическое разнообразие состава труб современных и древних “черных курильщиков”, их можно объединить в единую сульфидную группу. Главными минералами у них являются галенит, марказит, сфалерит, халькопирит и пирит, а в незначительном количестве в сульфидных трубках присутствуют арагонит, ангидрит, барит, кварц и опал (Ames et al., 1993; Богданов и др., 2006). По минеральному составу тессельские сульфидно-карбонатные постройки похожи на некоторые образования на вулкане Пийпа и гидротермальных полях впадины Гуаймас (Богданова и др., 1989; Torokhov, Taran, 1994). Они несколько отличаются от трубчатых образований типичных “черных курильщиков”. В то же время у тессельских построек и труб “черных курильщиков” имеются сходные детали в морфологическом внешнем и внутреннем строении. Общими критериями для всех построек являются внешняя форма, наличие горизонтальной и вертикальной минералогической зональности, центрального флюидного канала и конусов с кратерообразными углублениями на поверхности строений (Arquit, 1990; Cook, Stakes, 1995). Дополнительные общие признаки для них – пропитка материалов строений нефтепродуктами и наличие рядом оазисов жизни с крупной фауной (Arquit, 1990; Cook, Stakes, 1995; Konn et al., 2009). Кроме минералогии главным отличием тессельских сульфидно-карбонатных построек от “черных и серых курильщиков” является наличие карбонатной зоны бактериального обрастания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что образование сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных построек происходило на поверхности Тессельского палеовулкана над выходами палеофлюидов. Главная роль в их формировании принадлежит сообществу прокариот и поступлениям флюидов из недр. Бактерии и археи создавали постройки и контролировали в них кислые и щелочные условия среды для образования сульфатов, сульфидов и карбонатов.

Внешняя морфология, наличие минералогической зональности, флюидного канала, нефтепродуктов, оазисов жизни с крупной фауной позволяют

сравнить сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки палеовулкана Тессели с современными и древними трубчатыми образованиями “черных и серых курильщиков”. Главными различиями между ними являются минералогический состав и зона бактериального обрастания. По минералогии и внешней морфологии тессельские постройки имеют значительное сходство с подобными современными трубчатыми строениями на южной вершине вулкана Пийпа и гидротермальных полей впадины Гуаймас.

В будущем, при более детальных исследованиях, подобные сульфидно-карбонатные гидротермально-бактериальные постройки будут обнаружены на выходах лавовых полей андезитов в других горных областях. Их находки позволят более полно выполнить реконструкцию палеогеографических условий формирования вулканизма в тех регионах.

Присутствие в сульфидно-карбонатных гидротермально-бактериальных постройках галенита, халькопирита, сфалерита и пирротина и значительные гидротермальные изменения вмещающих терригенно-эффузивных пород позволяют сделать предположение о наличии в юго-западной части Горного Крыма месторождений с полисульфидной минерализацией.

Благодарности

Авторы благодарны профессору и члену-корреспонденту РАН В.В. Масленникову за консультации и оказанную помощь в изучении пород и рецензентам за полезные замечания и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевиц А.М., Гурвич Е.Г. (2006) Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 526 с.
- Богданова О.Ю., Горшков А.И., Баранов Б.В. и др. (1989) Гидротермальные образования подводного вулкана Пийпа (Командорская котловина). *Вулканонология и сейсмология*, (3), 49-62.
- Лебединский В.И. (1962) Пластовые интрузии в таврической серии и их роль в геологической истории Горного Крыма. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (4), 32-39.
- Лысенко В.И. (2019) Лавовые палеопотоки триасового вулканизма в Юго-Западной части Горного Крыма. *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*, 5(3), 306-325.
- Лысенко В.И., Садыков С.А., Михайличенко Т.В. (2022) Гидротермально-бактериальные постройки с фауной брахиопод на поверхности Тессельского палеовулкана. *Литосфера*, 22(4), 497-511.
- Малышев А.И. (2015) Газовый фактор в эндогенных процессах. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 324 с.
- Мархинин Е.К. (1980) Вулканы и жизнь. М.: Мысль, 196 с.
- Масленников В.В. (1999) Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей. Миасс: ИМин УрО РАН, 348 с.
- Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Целуйко А.С. (2016) Гидротермальные биоморфозы колчеданных месторождений: микротекстуры, микроэлементы и критерии обнаружения. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 388 с.
- Полоник Н.С. (2018) Изучение газонасыщенного гидротермального флюида подводного вулкана Пийпа. *Вулканизм и связанные с ним процессы*. Мат-лы XXI регион. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 197-199.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Alt I.C. (2008) Hydrothermal oxide and nontronite deposits on seamounts in the Eastern Pacific. *Mar. Geol.*, 256, 18-29.
- 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.
- Auclair G., Fouquet Y., Bohn M. (1987) Distribution of selenium in high-temperature hydrothermal sulfide deposits at 13°N, East Pacific Rise. *Can. Mineral.*, 25577-25588.
- Baker E.T., Lavelle J.W., Feely R.A., Massoth G.J., Walker S.L., Lupton J.E. (1989) Episodic venting of hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, 94(B7), 9237-9250.
- Baross J.A., Deming J.W. (1983) Growth of “black smoker” bacteria at temperatures of at least 250°C. *Nature*, 303, 423-426.
- Binns R.A., Scott S.D. (1993) Actively forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea. *Econ. Geol.*, 88(8), 2226-2236.
- Blackburn T.J., Olsen P.E., Bowring S.A. et al. (2013) Zircon U-Pb geochronology links the end – Triassic extinction with the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, 340, 941-945. <https://doi.org/10.1126/science.1234204>
- 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.
- Cook T., Stakes D. (1995) Biogeological mineralization in deep-sea hydrothermal deposits. *Science*, 267, 1975-1979.
- Corliss J., Dymond J., Gordon L.I., Edmond J.M. et al. (1979) Submarine Thermal Springs on the Galápagos Rift. *Sci. Magaz.*, 203(4385), 1073-1083. <https://doi.org/10.1126/science.203.4385.1073>
- Doe B.R. (1994) Zinc, copper, and lead in mid-ocean ridge basalts and the source rock control on Zn/Pb in ocean-ridge hydrothermal deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 2215-2223.
- Embley R.W., Johansson J.R., Perfit M.R. et al. (1988) Submersible investigation of an extinct hydrothermal sys-

- tem on the Galapagos Ridge: sulfide, mounds, stockwork zone, and differentiated lavas. *Can. Mineral.*, **26**, 517-539.
- Fouquet Y., Juniper S.K. (1988) Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites. *Can. Mineral.*, **26**, 859-870.
- Fouquet Y., Von Stackelberg U., Charlou J.-L. et al. (1993) Metallogenesis in back-arc environments: the Lau Basin example. *Econ. Geol.*, **88**, 2154-2181.
- Karl D.M. (1995) Ecology of free-living, hydrothermal vent microbial communities. *The microbiology deep-sea hydrothermal vents*. N. Y.: CRC Press, 35-124.
- Konn C., Charlou J.L., Donval J.P. et al. (2009) Hydrocarbons and oxidized organic compounds in hydrothermal fluids from Rainbow and Lost City ultramafic-hosted vents. *Chem. Geol.*, **258**, 299-314. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.034>
- Seliverstov N.I., Torokhov P.V., Egorov Yu.O. et al. (1994) Active seeps and carbonates from the Kamchatsky Gulf (East Kamchatka). *Bull. Geol. Soc. Denmark*, **41**, 50-54.
- 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. *Bull. Geol. Soc. Denmark*, **41**, 55-64.
- Verati C., De Donato P., Prieur D., Lancelot J. (1999) Evidence of bacterial activity from micrometerscale layer analyses of black-smoker sulfide structures (Pito Seamount Site, Easter microplate). *Chem. Geol.*, **158**(3-4), 257-269. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00054-6)
- Alt I.C. (2008) Hydrothermal oxide and nontronite deposits on seamounts in the Eastern Pacific. *Mar. Geol.*, **256**, 18-29.
- 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.
- Auclair G., Fouquet Y., Bohn M. (1987) Distribution of selenium in high-temperature hydrothermal sulfide deposits at 13°N, East Pacific Rise. *Can. Mineral.*, **25**, 2577-2588.
- Baker E.T., Lavelle J.W., Feely R.A., Massoth G.J., Walker S.L., Lupton J.E. (1989) Episodic venting of hydrothermal fluids from the Juan de Fuca Ridge. *J. Geophys. Res.*, **94**(B7), 9237-9250.
- Baross J.A., Deming J.W. (1983) Growth of "black smoker" bacteria at temperatures of at least 250°C. *Nature*, **303**, 423-426.
- Binns R.A., Scott S.D. (1993) Actively forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea. *Econ. Geol.*, **88**(8), 2226-2236.
- Blackburn T.J., Olsen P.E., Bowring S.A. et al. (2013) Zircon U-Pb geochronology links the end – Triassic extinction with the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, **340**, 941-945. <https://doi.org/10.1126/science.1234204>
- Bogdanov Yu.A., Lisitsyn A.P., Sagalevich A.M., Gurvich E.G. (2006) Hydrothermal ore genesis of the ocean floor. Moscow, Nauka Publ., 526 p. (In Russ.)
- Bogdanova O.Y., Gorshkov A.I., Baranov B.V. et al. (1989) Hydrothermal formations of the underwater Piip volcano (Komandorskaya basin). *Vulkanologiya i Seismologiya*, **(3)**, 49-62. (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.
- Cook T., Stakes D. (1995) Biogeological mineralization in deep-sea hydrothermal deposits. *Science*, **267**, 1975-1979.
- Corliss J., Dymond J., Gordon L.I., Edmond J.M. et al. (1979) Submarine Thermal Springs on the Galápagos Rift. *Sci. Magaz.*, **203**(4385), 1073-1083. <https://doi.org/10.1126/science.203.4385.1073>
- Doe B.R. (1994) Zinc, copper, and lead in mid-ocean ridge basalts and the source rock control on Zn/Pb in ocean-ridge hydrothermal deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 2215-2223.
- Embley R.W., Johansson J.R., Perfit M.R. et al. (1988) Submersible investigation of an extinct hydrothermal system on the Galapagos Ridge: sulfide, mounds, stockwork zone, and differentiated lavas. *Can. Mineral.*, **26**, 517-539.
- Fouquet Y., Juniper S.K. (1988) Filamentous iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites. *Can. Mineral.*, **26**, 859-870.
- Fouquet Y., Von Stackelberg U., Charlou J.-L. et al. (1993) Metallogenesis in back-arc environments: the Lau Basin example. *Econ. Geol.*, **88**, 2154-2181.
- Karl D.M. (1995) Ecology of free-living, hydrothermal vent microbial communities. *The microbiology deep-sea hydrothermal vents*. N. Y., CRC Press, 35-124.
- Konn C., Charlou J.L., Donval J.P. et al. (2009) Hydrocarbons and oxidized organic compounds in hydrothermal fluids from Rainbow and Lost City ultramafic-hosted vents. *Chem. Geol.*, **258**, 299-314. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.034>
- Lebedinskii V.I. (1962) Stratum intrusions in the Taurian series and their role in the geological history of the Crimean Mountains. *Izv. AN SSSR. Ser. Geol.*, **(4)**, 32-39. (In Russ.)
- Lysenko V.I. (2019) Lava paleoflows of Triassic volcanism in the Southwestern part of the Crimean Mountains. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology*, **5**(3), 306-325. (In Russ.)
- 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.)
- Malyshev A.I. (2015) Gas factor in endogenous processes. Ekaterinburg, RIO UB RAS Publ., 324 p. (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 paleohydrothermal fields. Miass, IMin UB RAS, 348 p. (In Russ.)
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Maslennikova S.P., Tseluiko A.S. (2016) Hydrothermal biomorphoses of sulfide deposits: microtextures, trace elements and detec-

- tion criteria. Ekaterinburg, RIO UrO RAN Publ., 388 p. (In Russ.)
- Polonik N.S. (2018) Study of the gas-saturated hydrothermal fluid of the underwater volcano Piipa. *Volcanism and related processes*. Proceedings of the XXI regional scientific conference dedicated to the Day of the Volcanologist. Petropavlovsk-Kamchatsky, IVIS DVO RAN, 197-199. (In Russ.)
- Seliverstov N.I., Torokhov P.V., Egorov Yu.O. et al. (1994) Active seeps and carbonates from the Kamchatsky Gulf (East Kamchatka). *Bull. Geol. Soc. Denmark*, **41**, 50-54.
- 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. *Bull. Geol. Soc. Denmark*, **41**, 55-64.
- Verati C., De Donato P., Prieur D., Lancelot J. (1999) Evidence of bacterial activity from micrometerscale layer analyses of black-smoker sulfide structures (Pito Seamount Site, Easter microplate). *Chem. Geol.*, **158**(3-4), 257-269. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00054-6)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2011) Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry). Syktyvkar, Geoprint Publ., 742 p. (In Russ.)