

УДК 551.552.122(477.7)

DOI: 10.24930/2500-302X-2025-25-3-451-470

Бактериальные постройки углеводородного просачивания с текстурой конус в конусе в породах таврической серии Горного Крыма (Южный берег Крыма)

В. И. Лысенко^{1,2}, С. А. Садыков³

¹Институт природно-технических систем, 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28, e-mail: niagara_sev@mail.ru

²Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 299009, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

³Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 456317, Челябинская обл., г. Миасс

Поступила в редакцию 19.09.2024 г., принята к печати 06.12.2024 г.

Приводятся результаты исследования палеогеографических условий образования построек с текстурами конус в конусе живыми организмами. *Методы.* Изучение морфологии с помощью приполировок и шлифов под микроскопом Olympus BX 5 с фотокамерой Olympus DP 12. Геохимические анализы выполнялись ICP ELAN 9000 (фирмы Perkin Elmer). Изотопный состав углерода определялся масс-спектрометрическим методом на приборе Deltaplus Advantage. *Результаты.* Образование построек происходило на твердом грунте. Оно имело несколько фаз роста. Древовидный скелет построек конус в конусе обладает модульным строением. Из его стенок отходят ламины микронной толщины. Они формируют рулоны конусов, сросшиеся между собой лепестки с рифленой поверхностью. Верхняя поверхность построек покрыта лепестками ламин и сферолитами кальцита. Их минеральный состав представлен шестоватым антраконитом с присутствием родохрозита, кварца и фрамбоидов пирита. Изотопный состав углерода карбонатных построек изменяется от –19.14 до –13.59‰, а ее биогенного материала – $\delta^{13}\text{C} = -36.64\text{‰}$. На связь образования карбоната с хемосинтезом архей и прокариот указывают изотопный состав углерода, изотопная разница $\delta^{13}\text{C}$ карбоната и биогенного вещества, присутствие сферолитов карбоната, фрамбоидов пирита, биомаркеров, легкой и тяжелой нефти. Высокие содержания в материале построек литофильных, халькофильных, редкоземельных элементов, а также изотопный состав серы (+11.28; +1.72‰), углерода (от –19.14 до –13.59‰) и кислорода (от –14.52 до –13.45‰) подтверждают использование живыми организмами глубинных вулканических флюидов. *Заключение.* Постройки с текстурами конус в конусе созданы простейшими организмами в симбиозе с прокариотами и археями, которые перерабатывали углеводородные вулканические флюиды в органическое вещество и карбонат. Присутствие рядом с постройками биоценоза крупной фауны и другие признаки позволяют относить образования конус в конусе к древним карбонатам углеводородного просачивания или метанолитам триаса. Постмагматические углеводородные флюиды, которыми питались микроорганизмы, имеют глубокий генезис.

Ключевые слова: археи, прокариоты, модульное строение, ламины, древовидный скелет, сферолиты, антраконит, изотопный состав, метан, карбонаты просачивания углеводородов

Источник финансирования

Работа поддержана государственной бюджетной темой в рамках Госзадания ИПТС, № госрегистрации 124020100120-9

Bacterial hydrocarbon seepage structures with a cone-in-cone texture in the rocks of the Taurian series of the Mountain Crimea (South Coast of Crimea)

Vitaly I. Lysenko^{1,2}, Sergey A. Sadykov³

¹Institute of Natural and Technical Systems, 28 Lenin st., Sevastopol 299011, Russia, e-mail: niagara_sev@mail.ru

²Branch of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 7 Heroes of Sevastopol st., Sevastopol 299009, Russia

³Institute of Mineralogy, South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Miass, Chelyabinsk region 456317, Russia

Для цитирования: Лысенко В.И., Садыков С.А. (2025) Особенности распределения изотопного состава углерода в карбонатах разреза сартынской свиты (нижний карбон, Воркутинское поднятие). *Литосфера*, **25**(3), 451–470. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-451-470>. EDN: EHJRZV

For citation: Lysenko V.I., Sadykov S.A. (2025) Bacterial hydrocarbon seepage structures with a cone-in-cone texture in the rocks of the Taurian series of the Mountain Crimea (South Coast of Crimea). *Lithosphere (Russia)*, **25**(3), 451–470. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-3-451-470>. EDN: EHJRZV

Received 19.09.2024, accepted 06.12.2024

Research subject. Paleogeographic conditions for the formation of structures with cone-to-cone textures by living organisms. **Methods.** The morphology of polished sections was studied using an Olympus BX 5 microscope equipped with an Olympus DP 12 camera. Geochemical analysis was performed using an ICP ELAN 9000 (Perkin Elmer). Carbon isotope composition was determined by mass spectrometry on a Deltaplus Advantage device. **Results.** The structures were formed on solid ground. They had several growth phases. The tree-like skeleton of the cone-to-cone structures has a modular structure. Micron-thick laminae extended from its walls. They formed rolls of cones, fused petals with a corrugated surface. The upper surface of the structures is covered with lamina petals and calcite spherulites. Their mineral composition is represented by columnar anthraconite with the presence of rhodochrosite, quartz, and pyrite framboids. The isotopic composition of carbon in carbonate structures varied from -19.14 to -13.59‰ , and that of its biogenic material $\delta^{13}\text{C} = -36.64\text{‰}$. The relationship between carbonate formation and chemosynthesis of archaea and prokaryotes is indicated by the results of carbon isotope composition, $\delta^{13}\text{C}$ isotope difference between carbonate and biogenic matter, presence of carbonate spherulites, pyrite framboids, biomarkers, light and heavy oil. High contents of lithophile, chalcophile, rare earth elements in the material of the structures, as well as the isotope composition of sulfur ($+11.28$; $+1.72\text{‰}$), carbon (from -19.14 to -13.59‰) and oxygen (from -14.52 to -13.45‰) confirm the use of deep volcanic fluids by living organisms. **Conclusions.** Structures with cone-to-cone textures were created by protozoa in symbiosis with prokaryotes and archaea, which processed hydrocarbon volcanic fluids into organic matter and carbonate. The presence of large fauna near the biocenosis structures and other features allow us to attribute the cone-to-cone formations to ancient hydrocarbon seepage carbonates or Triassic methane-liths. Postmagmatic hydrocarbon fluids, which have fed the microorganisms, have a deep genesis.

Keywords: archaea, prokaryotes, modular structure, laminae, tree-like skeleton, spherulites, anthraconite, isotopic composition, methane, hydrocarbon seeps carbonates

Funding information

The work was carried out within the framework of the State assignment of the Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Natural and Technical Systems, state registration no. 124020100120-9

ВВЕДЕНИЕ

Период изучения образований конус в конусе (CIC) насчитывает более трех веков (Taft, 1922; Maher et al., 2017). Подробная история их исследования описана в работе В.Г. Колокольцева (2002). В наше время исследователи придерживаются следующих гипотез генезиса их формирования за счет литостатического давления и растворения; участия газовых флюидов; процессов перекристаллизации; седиментации и диагенеза осадочных отложений; биологических процессов (Gilman, Metzger, 1967; Колокольцев, 2002; Тугарова, 2014). Несмотря на значительное количество теорий образования текстур CIC, процессы их формирования остаются загадкой для исследователей и сегодня.

Первые данные о породах с “фунтиковой текстурой” (con-in-con) в центральной части Горного Крыма приводятся в работах Н.В. Логвиненко

(1961) и М.В. Муратова (1959). Более детальное их описание дано в статье А.П. Ставского и А.В. Казанцева (1973). Образования CIC были найдены нами (В.И. Лысенко) на южном склоне Главной гряды Крымских гор у пос. Тессели. Результаты их исследования доказали, что подобные постройки созданы живыми организмами. Трактовать их как текстурные формы в породе методологически неверно. Правильнее образования CIC называть постройками сообществ микроорганизмов. Подобные образования часто встречаются в осадочных толщах разных временных интервалов. Изучение условий их формирования является актуальной задачей для реконструкции палеогеографических обстановок прошлого.

Целью работы выступает познание генезиса и условий образования тессельских построек с текстурами конус в конусе. В задачи входило изучение морфологии строений, геологических условий, геохимических обстановок их формирования.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе полевых обследований Тессельского палеовулкана были найдены породы, у которых на боковой поверхности отмечается рисунок СИС. Это была первая находка таких образований на южных склонах Главной гряды Крымских гор. При геологических исследованиях региона главное внимание уделялось изучению разрезов с этими породами и их контактов с вмещающей толщей. Была собрана богатая коллекция материала пород СИС. Из них изготовлены приполировки и шлифы. Образования СИС сложены в основном карбонатом, поэтому часть приполировок протравлены в кислоте. Это позволило лучше изучить строение построек. Исследования шлифов вертикальных и горизонтальных срезов проводились с помощью микроскопа Olympus BX 5 с фотокамерой Olympus DP 12 в ЮУ ФНЦ – Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс).

Геохимические анализы выполнялись по стандартной методике в лаборатории Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Пробы анализировались на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000 фирмы Perkin Elmer. Карбонат для пробы был отобран из верхней части построек. Для сравнения исследовался нерастворимый остаток карбоната в соляной кислоте. Для этой цели материал пород СИС растворялся в кислоте. После он промывался несколько раз в дистиллированной воде. После этого проба сушилась в муфельной печи.

Исследования материала на изотопный состав углерода, кислорода и серы производились в Институте минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Определения выполнялись масс-спектрометрическим методом 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 на весах. Она сжигалась в потоке гелия с добавкой кислорода. 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. На изотопный состав углерода были проанализированы восемь проб построек и по одной из карбонатной конкреции и кислотного остатка. Параллельно четыре пробы анализировались на изотопный состав кислорода. Для этого использовался стандарт NBS-19. Ошибка измерений прибора составила 0.39‰, VSMOW. Дополнительно проанализирована на изотопный анализ

сера из пирита лав и туффитов. При измерениях применялся стандарт NBS-123. Ошибка измерений при проведении замеров равна 0.1‰, CDT.

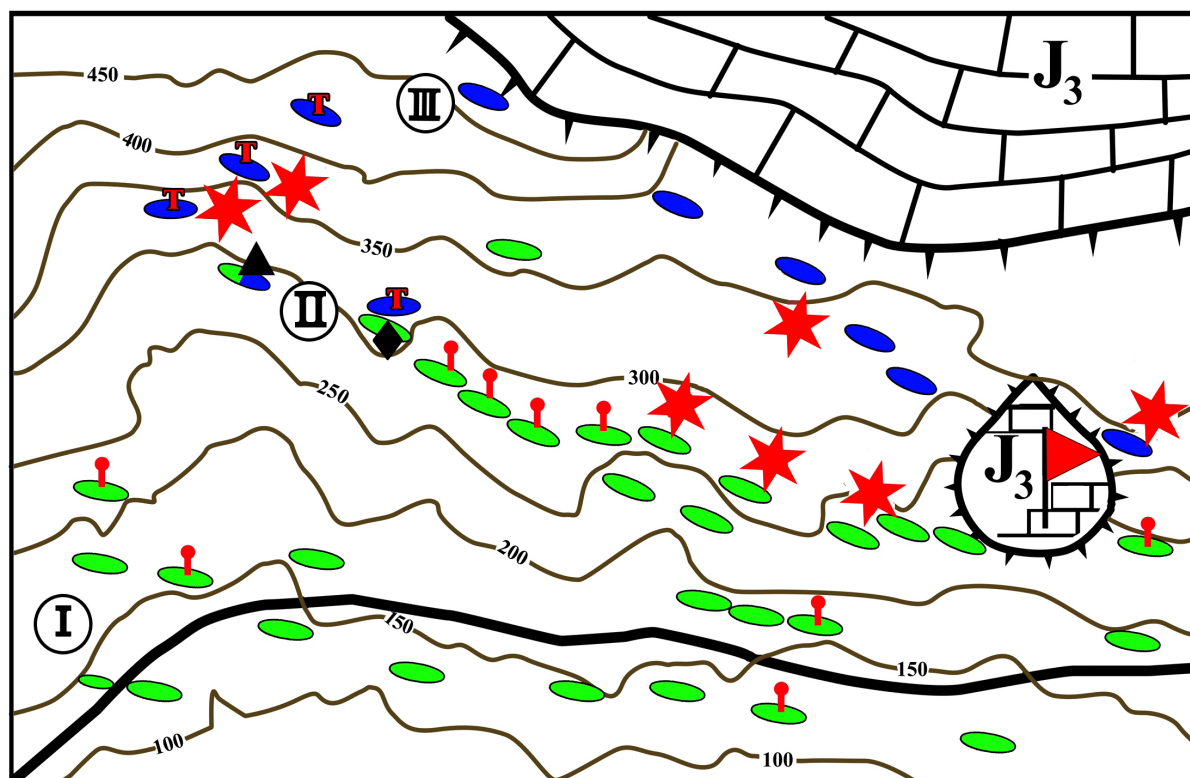
ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТ НАХОДОК ПОСТРОЕК С ТЕКСТУРОЙ КОНУС В КОНУСЕ

При проведении детальных геологических исследований Тессельского палеовулкана были найдены породы с текстурой СИС. Они обнаружены на южном склоне массива Челеби-Яурн-Бели над санаторием “Тессели” (44°40'02"–44°39'75" с. ш.; 33°77'23"–33°75'51" в. д.). Поверхность склона сложена алевролитами и аргиллитами таврической серии, в которых присутствуют скальные выступы эффузивных пород андезитов (рис. 1). Их разрозненные выходы на откосе склона образуют три прерывистые субпараллельные зоны субширотного простирания: южную, центральную и северную. Они связаны с несколькими активными этапами вулканической деятельности (Лысенко, 2019а).

В центральной и северной зонах насчитывается более 20 обнажений эффузивных пород. Они представлены лавами, кластолавами, ксенотуфами, гелокластами и туффитами (см. рис. 1). Породы эффузивных толщ формировались в подводных условиях в период активной вулканической деятельности. Значительная их часть является материалом аквагенных выбросов (Лысенко, 2019а). На близость нахождения центра извержения Тессельского палеовулкана указывают следующие признаки: большое количество зон гидротермальной проработки пород и жил с пиритовой и антраконитовой минерализацией; присутствие толщ агломератовых ксенотуфов; наличие плоских и трубчатых бактериальных построек (Лысенко, 2019а; Лысенко и др., 2022).

Между периодами активной вулканической деятельности происходили выбросы незначительного количества пеплового материала псаммитовой и алевритовой размерности. Они представлены алевритовыми и песчанистыми туфами, которые имеют сантиметровые мощности в терригенных породах таврической серии. Большинство построек с текстурой СИС обычно находятся рядом. В них встречаются опечатки моллюсков, гастропод и следы ползания червей. Карбонатный материал их раковин замещен пиритом (рис. 2а). Кроме этого, в туфах отмечаются глобулы фрамбоидального пирита и линзочки со сростками эвгедральных кристаллов пирита (см. рис. 2а, в).

Образования пород СИС имеют округлую или удлиненную эллипсовидную конфигурацию в плане диаметром до метра (см. рис. 2б). В центральной части они обладают мощностью не больше 4 см, а по краям – около 1 см. Кроме этого, в перемятых аргиллитах таврической серии встречаются круп-



Масштаб 1:16 000

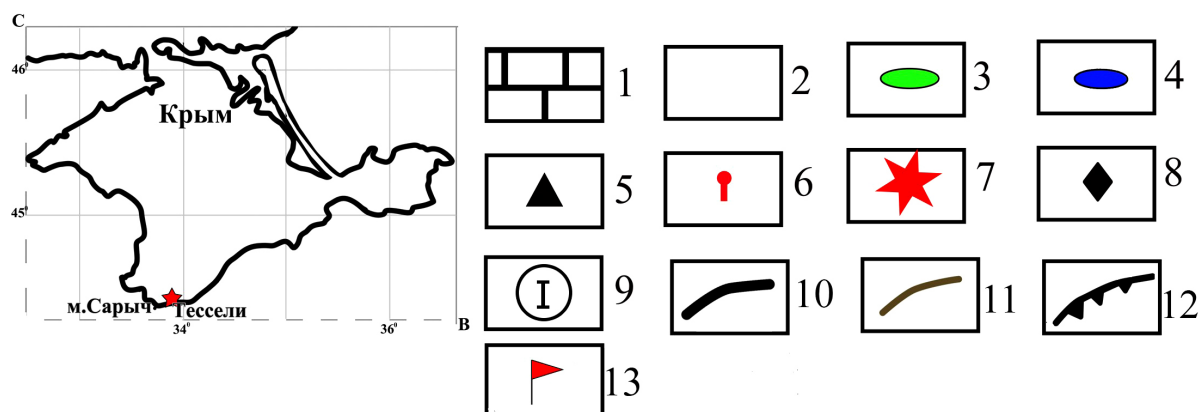


Рис. 1. Схема расположения выходов эффузивных пород Тессельского палеовулкана и находок пород конус в конусе.

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

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 – locations of bacterial structures found cone to cone; 8 – Red massif; 9 – zones of outcrops of effusive rocks (I – southern, II – central, III – northern); 10 – limestone cliffs of the Main Ridge; 11 – isolines of the relief; 12 – highway Yalta – Sevastopol; 13 – Sail rock.

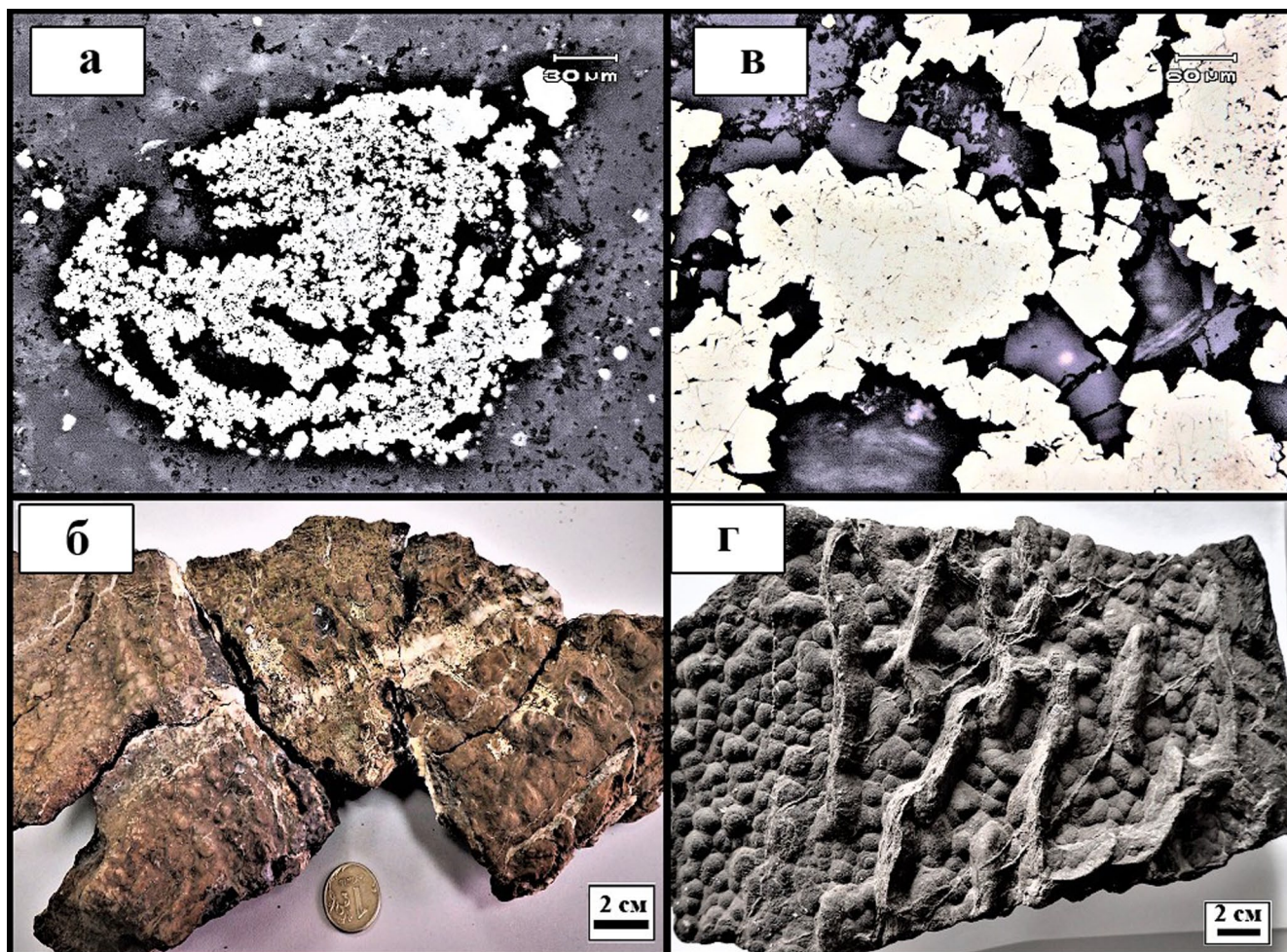


Рис. 2. Туфы и внешний вид построек.

а – раковина моллюска в туффитах, замещенная пиритом; б – сростки эвгедральных кристаллов и фрамбоидов пирита в туффитах; в – внешний вид поверхности постройки конус в конусе; г – угловатый блок постройки конус в конусе. а, б – в отраженном свете.

Fig. 2. Tuffites and the appearance of buildings.

а – mollusk shell in tuffites, replaced by pyrite; б – intergrowths of euhedral crystals and pyrite framboids in tuffites; в – external appearance of the surface of a cone-in-cone structure; г – angular block of a cone-in-cone structure. а, б – in reflected light.

ные угловатые плоские обломки с текстурой СИС. У них боковые поверхности залечены карбонатами и затерты глинистым веществом (см. рис. 2г). Нижние поверхности СИС имеют резкие контакты с алевролитами или туфами. В некоторых случаях они расположены под углом к косой слоистости подстилающих пород (рис. 3а). Аргиллиты плотно облегают выступы верхних частей построек СИС.

На верхней поверхности СИС иногда отмечают разноориентированные секущие прожилки белого кальцита и черного антраконита (см. рис. 2б). Прожилки кальцита, заполняющие трещиноватость построек, и находки крупных угловатых обломков строений СИС в породах таврической серии

подтверждают, что их формирование происходило в активной геодинамической обстановке на склонах действующего вулкана.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЙ КОНУС В КОНУСЕ

Постройки в СИС, как и любые создания живых организмов, имеют сложное внутреннее и поверхностное строение. Отдельные их части имеют размеры несколько микрон и различный минеральный состав, что осложняет изучение таких форм образования. Реконструкция строения скелета построек проведена нами по отдельным поперечным

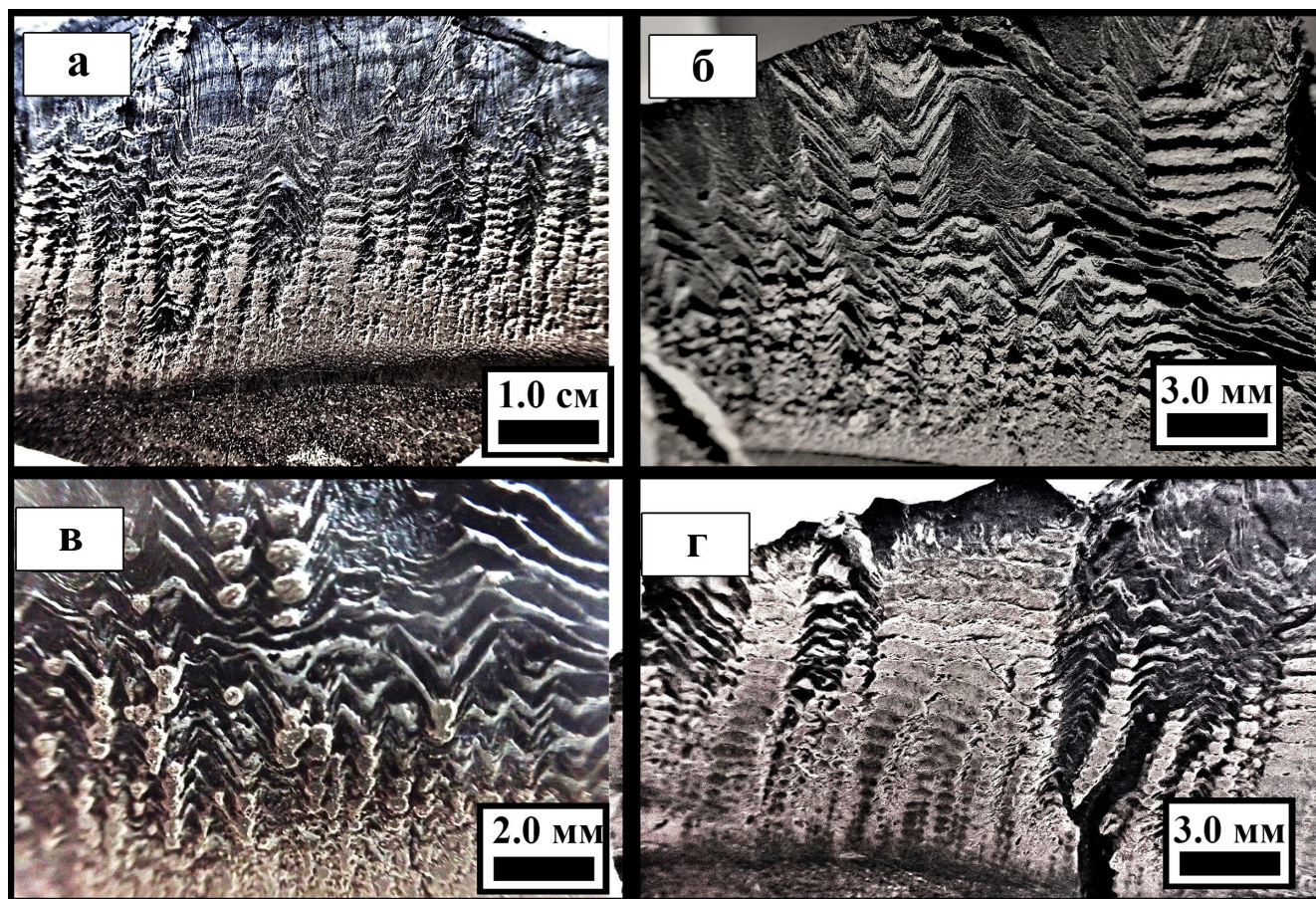


Рис. 3. Внутреннее строение построек конус в конусе.

а – резкий контакт древовидных образований конус в конусе с поверхностью туфов; б – микропоросль построек конус в конусе на твердой поверхности туфов; в – морфология древовидных образований конус в конусе, в правом углу сегменты отдельных построек срослись между собой; г – увеличение размеров сегментов скелета и срастание их в монолитное слоевище. а, б, г – отполированные штупы пород после травления в кислоте; в – отполированный штуп породы.

Fig. 3. Internal structure of cone-in-cone structures.

а – sharp contact of cone-in-cone tree-like formations with the surface of tufovs; б – microgrowth of cone-in-cone structures on the hard surface of tufovs; в – morphology of cone-in-cone tree-like formations, in the right corner segments of individual structures have grown together; г – increase in the size of skeleton segments and their fusion into a monolithic thallus. а, б, г – polished rock samples after acid etching; в – polished rock sample.

и продольным срезам. По анализу изображений срезов условно можно выделить три фазы их формирования.

Зарождение построек СИС начинается на твердой поверхности туфов или аргиллитов (см. рис. 3а, г). На ней появляются почти микронные округлые пузырьки (рис. 3б, в). Иногда видно, что в стороны от них отходят по два, а иногда по три видимых лепестка под углом 30–40° к оси роста (см. рис. 3г). Между ними много лепестковых отростков, но заметны только образования, покрытые налетом глинистой и кварцевой пыли. В отдельных научных работах аналогичные листочки микронной мощности называются ламинами (Богоявлен-

ская, 2007; Ярков, 2015). Их сростки образуют спиральные конические рулоны вокруг осевой линии скелета. Ламинны из рядом стоящих пузырьков срастаются между собой и формируют пилообразную плоскую поверхность (см. рис. 3а–в). Уже на этом этапе видны конусовидные строения. Рост нижних частей конуса начинается на поверхности пузырьков (см. рис. 3а–в). На пузырьки нарастают следующие подобные образования, которые имеют вертикальную ориентировку (см. рис. 3в, г). Их размеры с взрослением увеличиваются, а расстояния между пузырьками уменьшаются. Пилообразная площадная поверхность срастания ламин в вертикальном разрезе повторяется множество раз. Об-

щая мощность микропоросли построек в разных местах составляет от 3.0 до 10.0 мм (см. рис. 3а–в).

Не все первичные ростки пузырьков с модульным строением продолжают развитие в следующую стадию. В борьбе за существование некоторая часть поросли прекращает рост и освобождает пространство для более сильных организмов. Оставшиеся ростки при росте увеличиваются в размерах и приобретают древовидную форму (см. рис. 3а–в). Эти части построек имеют агглютированный скелет. Он ориентирован вдоль осевой линии и обладает модульным принципом роста (см. рис. 3а, в). Центральная часть скелета состоит из отдельных сегментов. Они незначительно увеличиваются в размерах от 0.1 до 2.0 мм в процессе развития (см. рис. 3а, в). В нижней части строний сегменты имеют округлую форму, а в процессе роста принимают формы неправильных эллипсоидов. Иногда происходит срастание сегментов отдельных скелетов в один крупный монолитный фрагмент (см. рис. 3а, в, г). В дальнейшем древовидные строения развиваются с нарастанием друг на друга монолитных толстых слоевищ (см. рис. 3а, в, г). В некоторых случаях в верхней части происходит их разделение на более мелкие сегменты, которые дают рост конусообразным образованиям (см. рис. 3в).

Текстуры СИС в постройках создают сростки ламин, которые отходят от сегментов центрального канала. При срастании между собой они формируют многолепестковый “цветочек” с внешним видом пустотелого конуса (рис. 4а, б). Удлиненные листики образуют угол с осевой линией постройки от 10 до 45° (см. рис. 3в; 4в, г). Конические сростки ламин образуют сплошные рулоны за счет спирального роста от сегментов (см. рис. 4а, б). Факт спирального роста ламин микронной мощности можно наблюдать при просмотре их срезов под биноклем. Листочки ламин срастаются с подобными образованиями окружающих рядом древовидных построек. Возникает сплошной ковер с конусовидными углублениями. Его поверхность меняется с ростом ламин.

Из-за микронных размеров сложно подсчитать количество ламин от одного сегмента скелета. Учету поддаются только отдельные из них, которые обычно покрыты пылевидным веществом или глиной (см. рис. 4в). Длина отростков ламин не постоянная. Она зависит от расстояния до расположенных рядом других древовидных образований (см. рис. 3а, б, г; 4в). Иногда на одном сегменте скелета симметричные ламин имеют различную длину роста. Их срастание с подобными образованиями других построек происходит на одинаковом расстоянии от рядом стоящих древовидных скелетов (см. рис. 3б, г; 4в). Для увеличения площади соприкосновения с морской водой ламин покрыты микрорифлеными выступами (см. рис. 4а). Нарос-

ты на поверхности лепестков позволяют установить их границы в многолепестковом коническом рулоне. В полировках рифленая поверхность имеет пилообразную форму (см. рис. 4г). Ее концентрическое строение хорошо видно после обработки полировки кислотой (рис. 5а). При этом нужно учитывать, что на рисунке мы видим негативное изображение растворения поверхности антракониновых ламин. Можно предположить, что размеры рифленой поверхности зависят от поступления терригенного материала и контролируются живыми организмами (см. рис. 4г, 5а). Во многих научных статьях остроугольные выступы рифленой поверхности ламин принимаются за пилообразные структуры эпигенетических процессов латерального давления к поверхностям напластования. Некоторые исследователи считают, что это стилолитовые швы, с чем трудно согласиться (Колокольников, 2002; Maher, et al., 2017; Шумилов, 2020).

Наблюдается зависимость образования сегментов скелета от выпадения глинистого материала на поверхность ламин (см. рис. 4г; 5а). На некоторых полировках направление роста конусовидных лепестков ламин изменяется в горизонтальное (см. рис. 4в; 5б). Их мощность и длина увеличиваются за счет срастания с другими сростками и выпадения на поверхность глинистого материала. При этом прекращается рост древовидных построек под линзой глин (см. рис. 4в). На этой поверхности глинистого материала ламин образуют новые конусовидные структуры, сложенные антраконитом без примесей (см. рис. 4в). Присутствие вулканогенного и глинистого материала на поверхности построек усложняет их строение, что хорошо видно на рисунках (см. рис. 5б). Часто периферия постройки имеет полосчатое плоскопараллельное строение. В ней карбонатный материал разделен глинистыми прослоями (см. рис. 5в). При увеличении заметно, что образования коричневого антраконита состоят из микропоросли древовидных образований. После выпадения глинистого и пеплового материала их рост прекращался. Через некоторый промежуток времени на поверхности постройки начинался процесс образования новых конусовидных сростков.

Верхние фрагменты построек отличаются от описанных. У них почти отсутствуют инородный терригенный материал и сегменты агглютированного скелета (см. рис. 3а; 5г). Листоватые формы ламин отходят от центра условной осевой линии под углом 5–30°. Они образуют пучки конусов с зональной окраской. Чередование черных и светло-коричневых полос антраконита связано с содержанием органического вещества. Световая зональность не нарушает строение сростков конических рулонов ламин и указывает на их одновременный рост.

Как отмечалось ранее, верхняя граница постройки конус в конусе с вмещающими породами очень

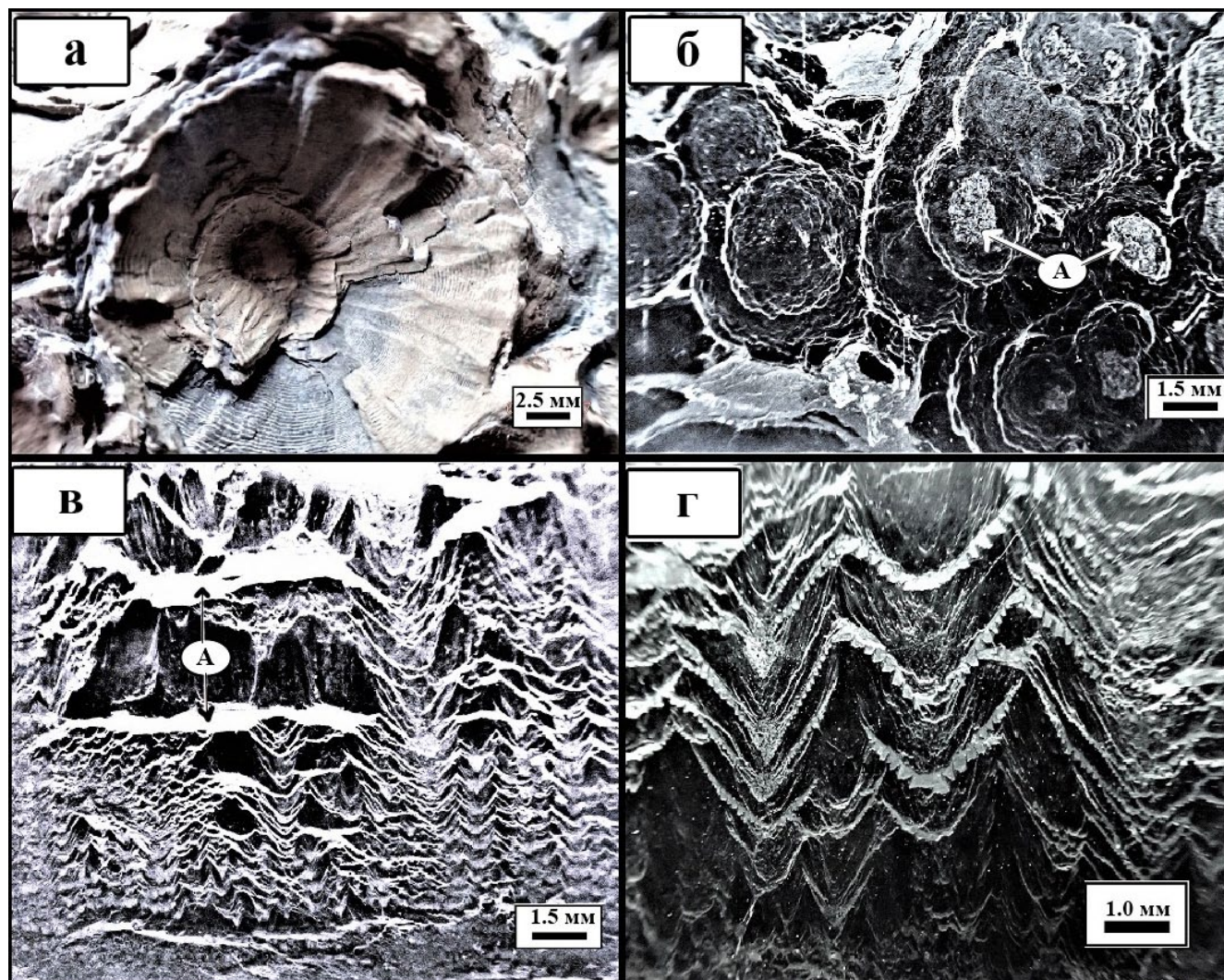


Рис. 4. Внутреннее строение построек.

а – сплошная конусообразная поверхность сростков ламин от центра сегмента; б – многолепестковые цветочки, образованные сростками ламин (А – сегмент скелета); в – переход угловатых ламин в горизонтальные (А – глинистый материал); г – пилообразные формы с налетами терригенного материала (светлый) на рифленую поверхность ламин (темный). б–г – срезы поверхностей отполированных штучков.

Fig. 4. Internal structure of the structures.

а – continuous cone-shaped surface of intergrowths of laminae from the center of the segment; б – multi-petal flowers formed by intergrowths of laminae; в – transition of angular laminae to horizontal ones; г – saw-toothed forms with deposits of terrigenous material (light) on the corrugated surface of laminae (dark). б–г – sections of the surfaces of polished specimens.

резкая. Ее поверхность характеризуется выступами различной морфологии (см. рис. 2в, г). Основная часть поверхности покрыта бугорками округлой или эллипсовидной формы. Они имеют диаметр от 0.2 до 15.0 мм и возвышаются над поверхностью до 2.0 мм. Бугорки различного размера срastaются между собой (см. рис. 2г; 6а). При увеличении видно, что их поверхность имеет двойственную природу образования. Она состоит из мелких сферолитовых сростков карбоната, которые при-

урочены к краям лепестков (рис. 6б, в). Это хорошо заметно после травления бугристой поверхности постройки в кислоте (см. рис. 6в, г). В некоторых образцах концовки ламин на поверхности постройки покрыты налетом микросферолитовых сростков кристаллов кварца (рис. 7а). Этот покров создает ажурный рисунок и подчеркивает сферолитовое строение многолепестковой постройки. Как уже указывалось, лепесточки ламин выходят из единого центра. Они срastaются между собой

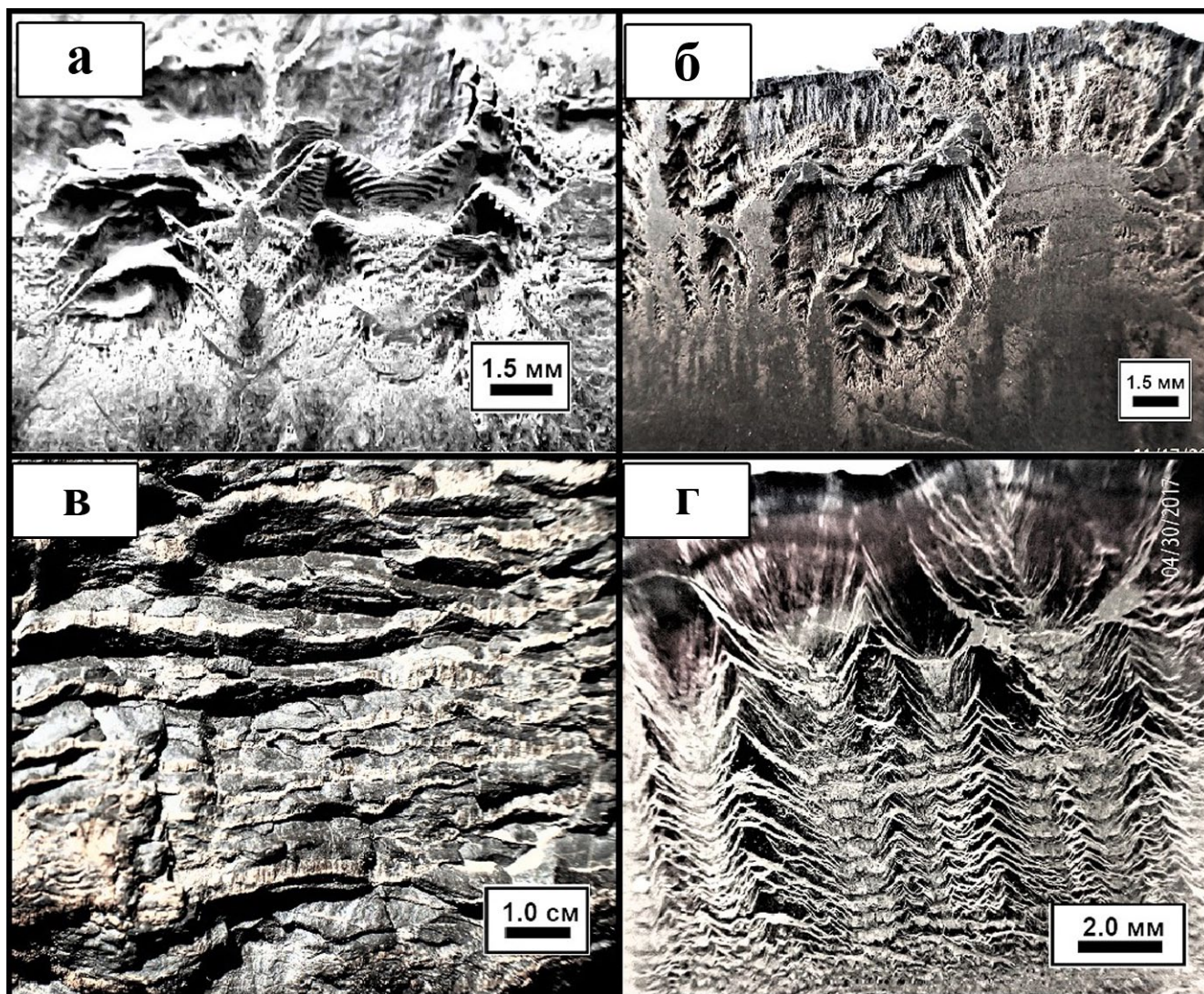


Рис. 5. Строение ламин построек.

а – негативные изображения концентрического строения рифленых образований на поверхностях ламин; б – усложнение строения построек за счет выпадения терригенного материала и переход конусовидного положения ламин в горизонтальное; в – полосчатое строение периферии некоторых построек; г – конусовидные антраконитовые строения верхней части построек (карбонат серого и черного цвета). а, б – поверхности штучков после растворения в кислоте, г – срез отполированной поверхности.

Fig. 5. Structure of laminar structures.

а – negative images of the concentric structure of ribbed formations on the surfaces of laminar structures; б – complication of the structure of structures due to the precipitation of terrigenous material. and the transition from the conical position of laminae structures to horizontal; в – banded structure of the periphery of some structures; г – conical anthraconitic structures of the upper part of structures (carbonate of gray and black color). а, б – surfaces of specimens after dissolution in acid, г – section of polished surface.

и образуют радиально-лучистый многолепестковый “цветочек” конусовидной формы (см. рис. 4а; 6б, в). Конусы срастания накручиваются друг на друга. Между ними иногда находятся микропрослойки глинистого вещества, по которым происходит разрушение вздутий. Поэтому некоторые верхние части конусов выпадают из постройки. В цен-

тральной части бугорков наблюдаются конусовидные выемки в виде кратеров (см. рис. 4а; 6б; 7б). По их краям отмечаются концентрические окружности сростков ламин, на которых просматриваются рифленые борозды (см. рис. 4а). Встречаются образования, у которых центральная часть конусов выполнена с участием сульфидной минерали-

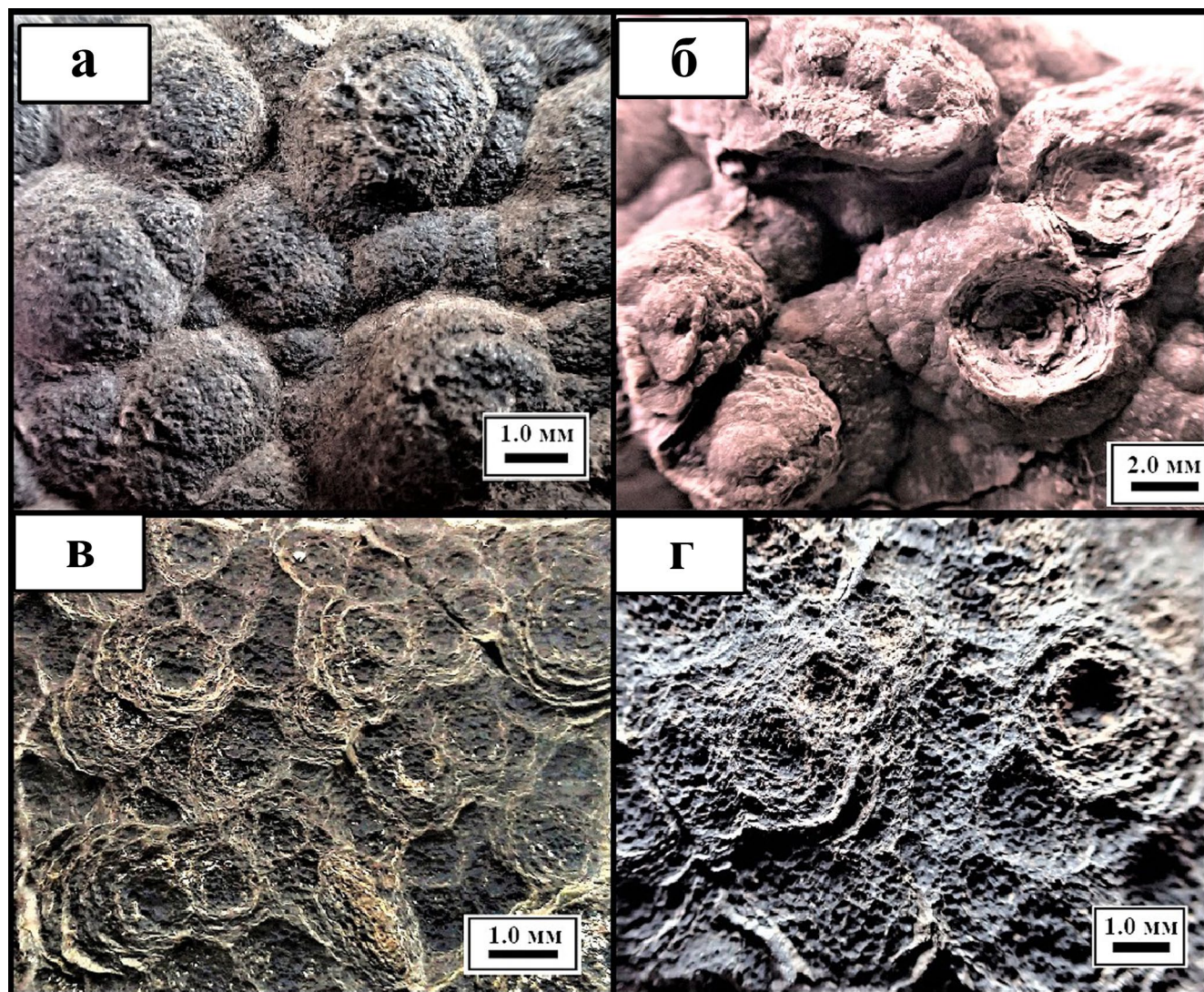


Рис. 6. Поверхность построек.

а – срастание бугорков различного размера между собой и обрастание их сферолитами карбоната; б – бугристая поверхность из отдельных лепестков, покрытых сферолитами карбоната; в – лепестковое сферическое строение спиральных рулонов подчеркивается пылевидным терригенным материалом, а углубления растворения свидетельствуют о присутствии сферолитов карбоната; г – перпендикулярные срезы конусовидных строений, сложенных многолепестковыми рулонами. в, г – поверхности штудфов после растворения в кислоте.

Fig. 6. Surface of the structures.

а – fusion of tubercles of different sizes with each other and their overgrowth with carbonate spherulites; б – tuberculate surface of individual petals covered with carbonate spherulites; в – petal spherical structure of spiral rolls is emphasized by dust-like terrigenous material, and dissolution depressions indicate the presence of carbonate spherulites; г – perpendicular sections of cone-shaped structures composed of multi-petal rolls. в, г – surfaces of specimens after dissolution in acid.

зации. Они также характеризуются концентрической текстурой обрастания с общим центром (см. рис. 7в). Кроме округлых вздутий на поверхности построек фиксируются волнообразные гребни, которые в статьях называют “мозговыми извилинами” (Tarr, 1922; Сонин, 2007). Иногда они покрывают более половины площади поверхности неко-

торых построек и создают сетку пересечения друг с другом (см. рис. 2г; 7в). Такие образования усложняют строения живых организмов внутри построек и на их поверхности. Волнообразные образования имеют форму длинных слабоизогнутых пластинок размером до 10.0 см и мощностью от 2.0 до 12.0 мм (см. рис. 2г; 7в). Они возвышаются над

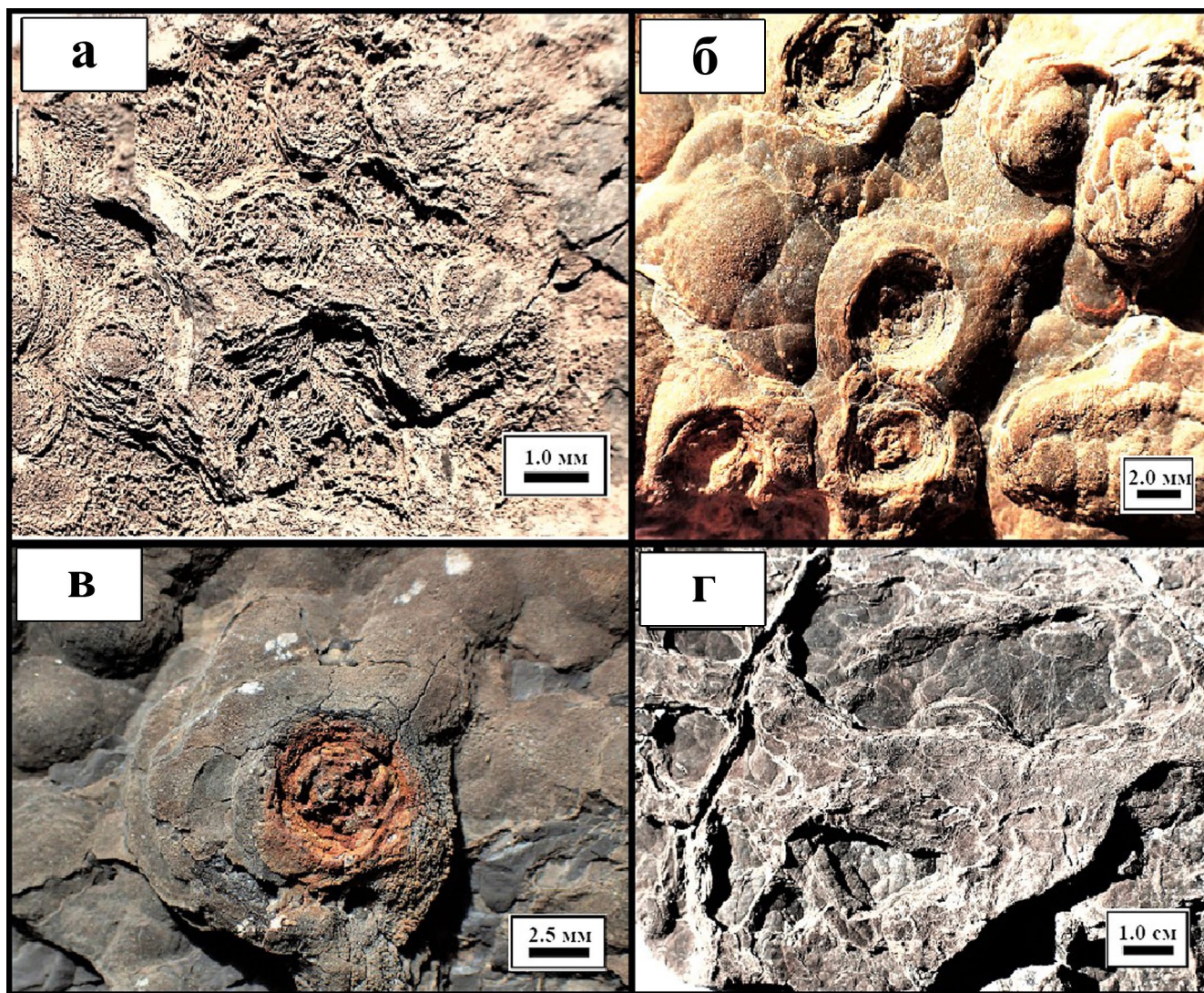


Рис. 7. Морфология бугристой поверхности построек.

а – ажурный рисунок присыпок кварца (белая окраска) на поверхности постройки, после травления ее в кислоте; б – конусовидные выемки в виде кратеров на поверхности постройки со сростками рифленых ламин; в – карбонатное вздутие округлой формы с сульфидной минерализацией; г – разноориентированные волнообразные извилины покрывают более половины площади поверхности постройки. а – поверхность протравлена в кислоте.

Fig. 7. Morphology of the hummocky surface of the buildings.

а – openwork pattern of quartz (white coloring) powder on the building surface after etching it in acid; б – cone-shaped depressions in the form of craters on the building surface with intergrowths of ribbed laminae; в – carbonate swelling of a rounded shape with sulphide mineralization; г – differently oriented wave-like convolutions cover more than half of the building surface area. а – the surface is etched in acid.

поверхностью до 10.0 мм. В разрезе мозговые извилины имеют сечение треугольников или усеченных конусов. Их поверхности покрыты округлыми сферолитами и фрагментарно состоят из сростков ламин дугообразного очертания (рис. 8а, б).

В некоторых местах построек отмечается постепенный переход от бугристой поверхности к полосчатой форме. Здесь происходит изменение

ориентировки роста ламин от угловой направленности к горизонтальной поверхности (см. рис. 8в). Наблюдается нарастание одного слоя на другой. Линия раздела между прослоями не прямая, а представлена сростками дугообразных сегментов ламин (см. рис. 8в). Можно предположить, что их горизонтальный рост связан с возможностью увеличить площадь питания. Поэтому большин-

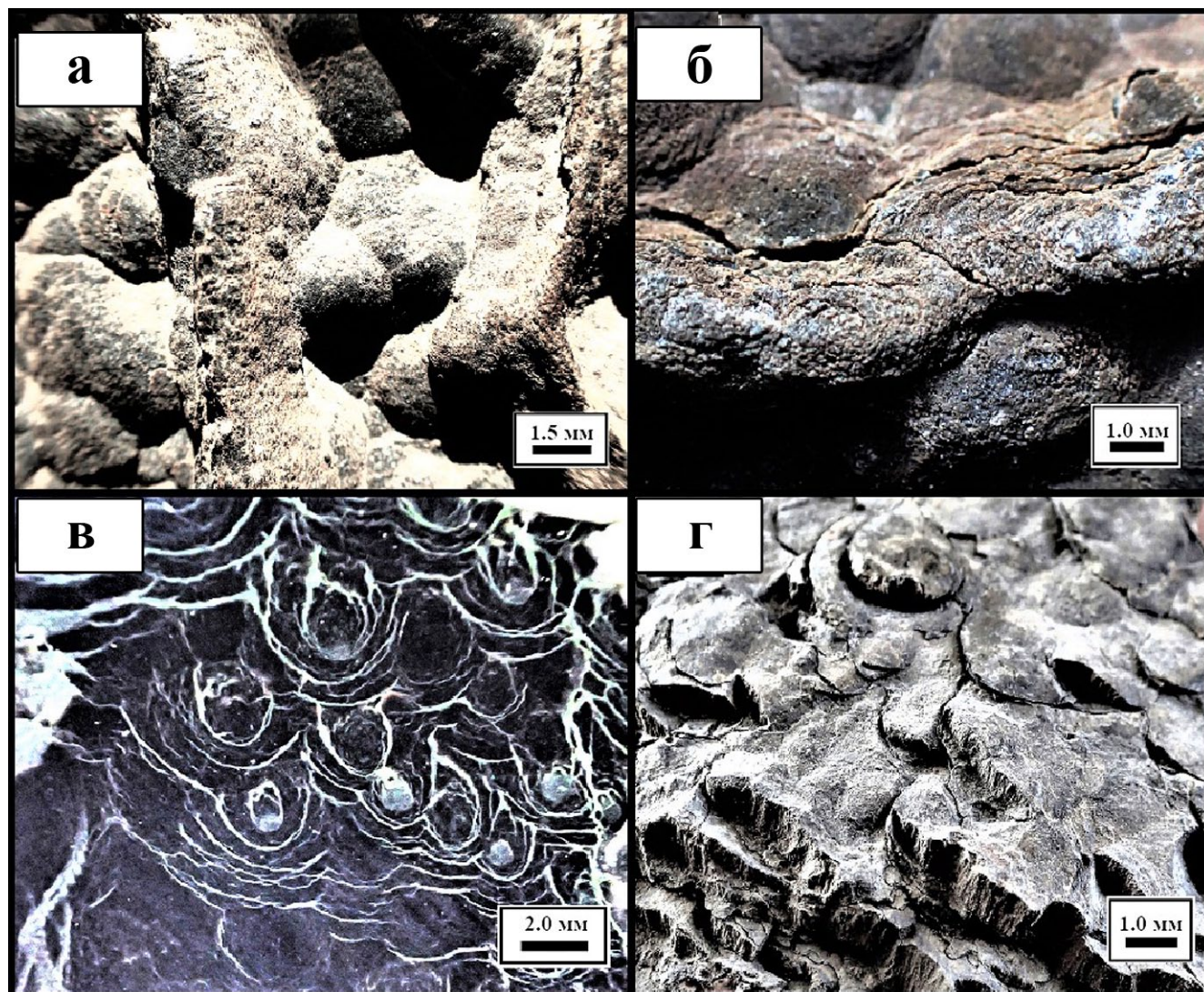


Рис. 8. Строение выступов изгибов и переход в полосчатое строение.

а – поверхности изгибов покрыты округлыми выступами ламин и наростами сферолитов; б – дугообразные изгибы, на поверхности которых наблюдаются сростки ламин и сферолитов; в – переход конусовидных строений в образования с полосчатой текстурой; г – постепенный переход бугристой поверхности построек в горизонтальное. в – срез отполированной поверхности.

Fig. 8. The structure of the projections of the convolutions and the transition to a banded structure.

а – the surfaces of the convolutions are covered with rounded projections of lamina and growths of spherulites; б – arcuate convolutions, on the surface of which intergrowths of lamina and spherulites are observed; в – the transition of conical structures into formations with a banded texture; г – a gradual transition of the bumpy surface of the structures to a horizontal one. в – a section of the polished surface.

ство таких переходов встречаются в краевых частях построек.

Постройки СИС возникали на незначительном расстоянии от центров извержения Тессельского палеовулкана. Выбросы прослои туфов указывают на некоторую активность вулкана в период их формирования. Пепловый вулканогенный материал и сейсмичность значительно усложняют внутреннее строение построек. Поэтому образцы по-

род с текстурой СИС характеризуются разнообразием морфологии и внутреннего строения. Сложно установить родственные связи построек СИС по отдельным срезам из-за многообразия их рисунков. Главным признаком внешнего морфологического строения наших построек является просматриваемые на боковых плоскостях фрагменты конусных форм, а дополнительным – бугристые листоватые холмы на их верхних поверхностях.

МИНЕРАЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ПОСТРОЕК

Основными минералами построек являются антраконит и кварц. Кристаллы антраконита, которые образуют текстуру СИС, имеют удлиненную шестоватую форму. Вблизи верхней поверхности они имеют зональную окраску чередования коричневых и черных полос, что связано с количеством органического вещества (керогена) и битумов (см. рис. 3а; 5г). Их зональная окраска не нарушает текстуру постройки. Подобная зональность характерна для сферолитов антраконита на поверхности постройки (см. рис. 6а, в). Они представлены сноповидными игольчатыми кристаллами, выходящими из единого центра. При просмотре под микроскопом выявлено четкое крестообразное угасание. В нижней части построек отмечаются карбонаты магния, марганца и железа, что установлено реакциями растворения образцов в кислоте и по данным геохимических анализов.

Кварц в постройках представлен двумя генерациями. В нижних частях строений он замещает карбонат. Границы процессов окварцевания сложно проследить. В некоторых маломощных образованиях происходит полное замещение карбоната кварцем. Кроме этого, мелкие сферолитовые сростки кристалликов кварца облипают контуры ламин построек (см. рис. 7а). Их внешний вид и расположение в пространстве позволяют высказать предположение о биогенной природе их образования. Мелкие зернышки кварца участвует в создании сегментов скелета построек (см. рис. 3а, б; 5а).

В тессельских образцах СИС встречаются вкрапления пирита различной формы. Мелкие кристаллы пириты кубической формы находятся между ламинами, а на их поверхности наблюдаются сростки глобул и фрамбоидов пирита. Иногда пиритовая “пыль” плотно покрывает поверхность ламин и сегменты скелета отдельных построек (см. рис. 7в).

Черный глинистый материал часто разделяет поверхности ламин. Просматривается некоторая периодичность его выпадения на поверхность построек (см. рис. 4г). Возможно, это следы временных интервалов выбросов, которые контролировали формирование сегмента скелета. При значительном поступлении глинистого материала временно прекращается рост построек (см. рис. 4в; 5б, в). Глина почти не содержит алевроитовой примеси и легко размывается водой. Она не испытывала процессов катагенеза, что отрицает природу образования структур СИС за счет литостатического давления. Глинистый материал построек имеет черную окраску за счет обогащения углеродистым веществом и относится к монтмориллонитовой группе (определение выполнил А.В. Касаткин из Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН). По цветовой окраске глина отличается от вмещаю-

щих серых аргиллитов и алевролитов таврической серии. По цвету, физическим свойствам и внешне-му виду глинистый материал построек имеет сходство с выбросами действующих грязевых вулканов Керченского полуострова (Шнюков и др., 2005).

Ранее в статье описывалось присутствие органики и битумов в карбонатах постройки. Это подтверждается специфическим запахом углеводородов при ударе по материалу построек. Дополнительным свидетельством являются результаты растворения антраконита из верхней части постройки в соляной кислоте. На поверхности раствора образовалась пленка с побежалостью легких битумов, а на дно химического стакана выпал черный осадок микрокапель тяжелых углеводородов и микропластинок (керогена) органического вещества. Органическое вещество сгорает в пламени горелки с образованием зольного материала. Предположительно, нефть являлась материалом фумарольных флюидов, а органическое вещество – материалом хемосинтеза сообществ бактерий и архей.

Для геохимических анализов материал отбирался с верхней части построек, где отмечаются низкие содержания терригенных примесей. Кроме пробы антраконита (ЛВ-891/2), анализировался сухой остаток растворения карбоната в соляной кислоте (ЛВ-891/1). Результаты анализов приведены в табл. 1.

Содержания химических элементов Li, Rb, Cs, Ba, Nb, Ti, Mn, V, Cr, Co, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Sc, Bi, Be, Sb, Sn, Te и Th в материале антраконита постройки превышают кларк для карбонатных пород. Концентрации ниже кларка для карбонатных пород характерны для Ni, Y, Sr, Mo, Se, Cd, Lu, Tl, Pb и U (см. табл. 1) (Эрнст, 1976; Интерпретация..., 2001). Еще более высокими содержаниями характеризуется анализ кислотного остатка. В нем числовые значения увеличились в 3–10 раз. В то же время в кислотном остатке более низкие концентрации Mn, Sr, Te, As, Sm, Gd, Tb и Dy, чем в антраконите постройки (см. табл. 1). Высокие содержания литофильных, халькофильных и редкоземельных элементов в анализах подтверждают связь образования построек с глубинными флюидами фумарольных газов вулканов (Балашов, 1976; Юдович, Кетрис, 2011).

На состав магматических пород вулкана указывают содержания Cu, Zn, Pb, Sn, Be, Mo, As, Sb, Nb, Cr, Ni, Co и V (Эрнст, 1976; Интерпретация..., 2001). Их высокие концентрации свидетельствуют о том, что флюиды связаны с вулканизмом андезитового состава (Балашов, 1976; Дубинин, 2004). Дополнительно это подтверждают невысокие содержания Ni, Co и отношение Cu к Zn (0.4) (Butterfield, Massoth, 1994; Дубинин, 2004).

В анализах концентрации редкоземельных элементов (REE) выше кларка карбонатных пород (см. табл. 1; рис. 9) (Интерпретация..., 2001). Общая их сумма в карбонате постройки составляет

Таблица 1. Содержания литофильных, халькофильных и редкоземельных химических элементов в пробах карбонатов и кислотного остатка материала построек конус в конусе, мг/кг**Table 1.** Contents of lithophile, chalcophile and rare earth chemical elements in samples of carbonates and acid residue of the material of cone-in-cone structures, mg/kg

Элемент	ЛВ-891/2	ЛВ-891/1	Кларк карбоната	Элемент	ЛВ-891/2	ЛВ-891/1	Кларк карбоната	Элемент	ЛВ-891/2	ЛВ-891/1	Кларк карбоната
Li	23.10	152.00	6.90	Y	4.03	3.72	20.00	Gd	1.31	0.93	0.99
Be	0.68	1.81	0.60	Zr	20.00	146.00	20.00	Tb	0.22	0.167	0.17
Sc	3.05	5.88	2.00	Nb	8.26	12.00	0.30	Dy	1.10	1.10	0.73
Ti	1327.00	4939.00	600.00	Mo	0.29	39.30	0.50	Ho	0.26	0.28	0.26
V	22.10	143.00	19.00	Cd	0.052	0.34	0.36	Er	0.58	1.74	0.47
Cr	17.70	81.10	11.00	Sn	1.88	5.21	0.75	Tm	0.84	2.28	0.22
Mn	4525.00	204.00	830.00	Sb	0.64	4.01	0.23	Yb	0.61	1.48	0.35
Co	5.20	7.89	1.60	Te	0.24	0.195	0.16	Lu	0.085	0.23	0.066
Ni	10.80	68.20	12.00	Cs	1.97	5.61	0.40	Hf	0.82	4.29	0.35
Cu	15.30	78.00	6.80	Ba	66.50	544.00	53.00	Ta	0.134	0.24	—
Zn	36.70	160.00	22.00	La	7.90	10.30	5.00	W	0.53	1.46	0.53
Ga	5.91	25.30	2.60	Ce	13.70	26.00	1.00	Tl	0.006	0.43	0.05
Ge	0.31	0.47	0.12	Pr	2.04	2.89	1.20	Pb	5.82	17.5	8.80
As	38.40	0.57	1.60	Nd	7.80	10.10	1.50	Bi	0.13	0.26	0.013
Rb	22.70	42.40	5.00	Sm	1.47	1.35	1.20	Th	2.05	3.02	1.80
Sr	477.00	84.80	540.00	Eu	0.33	0.33	0.20	U	0.55	3.08	2.30

38.3 г/т, но это несколько ниже, чем в кислотном остатке – 59.1 г/т. Разница содержаний REE карбонатов с кислотным остатком значительно меньше, чем подобные результаты с халькофильными и литофильными элементами (см. табл. 1). Концентрации промежуточных элементов Sm, Eu, Gd, Tb и Dy в карбонатных строениях несколько превышают подобные содержания в кислотном остатке (см. рис. 9; табл. 1). Отношение $LREE_n$ к $HREE_n$ для карбонатов, нормированных по хондритам, составляет 3.9, а для кислотного остатка – 2.7. График распределения элементов в своей легкой части имеет почти одинаковый наклон (см. рис. 9). Соотношение Li_n/Sm_n для карбоната составляет 3.28, а для кислотного остатка – 4.6 (Дубинин, 2004). Наблюдаются значительные различия в части его тяжелого спектра (см. рис. 9). Отношение Gd_n к Yb_n для карбоната составляет 1.7, а для кислотного остатка – 0.49. Отношение La_n/Yb_n для построек равно 8.5, а для кислотного остатка – 4.6 (Балашов, 1976).

Для расчета аномальных значений использовались формулы: $Eu^*_n = 2Eu_n/(Sm_n + Gd_n)$ и $Ce^*_n = 2Ce_n/(La_n + Pr_n)$ (Интерпретация..., 2001; Юдович, Кетрис, 2011). Карбонатное вещество постройки характеризуется неглубокими отрицательными аномалиями $Eu^*_n = 0.71$ и $Ce^*_n = 0.80$ (см. рис. 9).

Данные исследования изотопного состава серы, углерода и кислорода из андезитов, туфов, кислотного остатка (кирогена) и антраконита СИС приведены в табл. 2.

В лавах андезитов вкрапленники пирита встречаются повсеместно. Их концентрация в породе несколько выше содержания магнетита (Лысенко и др., 2022). Изотопный состав серы из пирита андезитов составляет +1.72‰, что является доказательством ее глубинного генезиса (Фор, 1989). Более тяжелый состав имеет сера пирита (+11.28‰) из линз пирита в туфах вблизи контактов с постройками СИС. Ее состав не отличается от современных сульфидных образований из фумарол грязевых котлов и термальных источников. (Арсланов, 1987; Фор, 1989).

Антраконит построек характеризуется легким изотопным составом углерода от –13.59 до –19.14‰ (см. табл. 2). Предположительно, разброс $\delta^{13}C$ связан с расстоянием от центров поступления флюидов и изменением его состава в период вулканической активности. Это подтверждает разница $\delta^{13}C$ в антраконите из верхних и нижних частей построек. Результаты $\delta^{13}C$ антраконита СИС не отличаются от подобных данных других исследователей (Тугарова, 2014; Шумилов 2020). Органическое вещество (кироген) кислотного остатка характерно

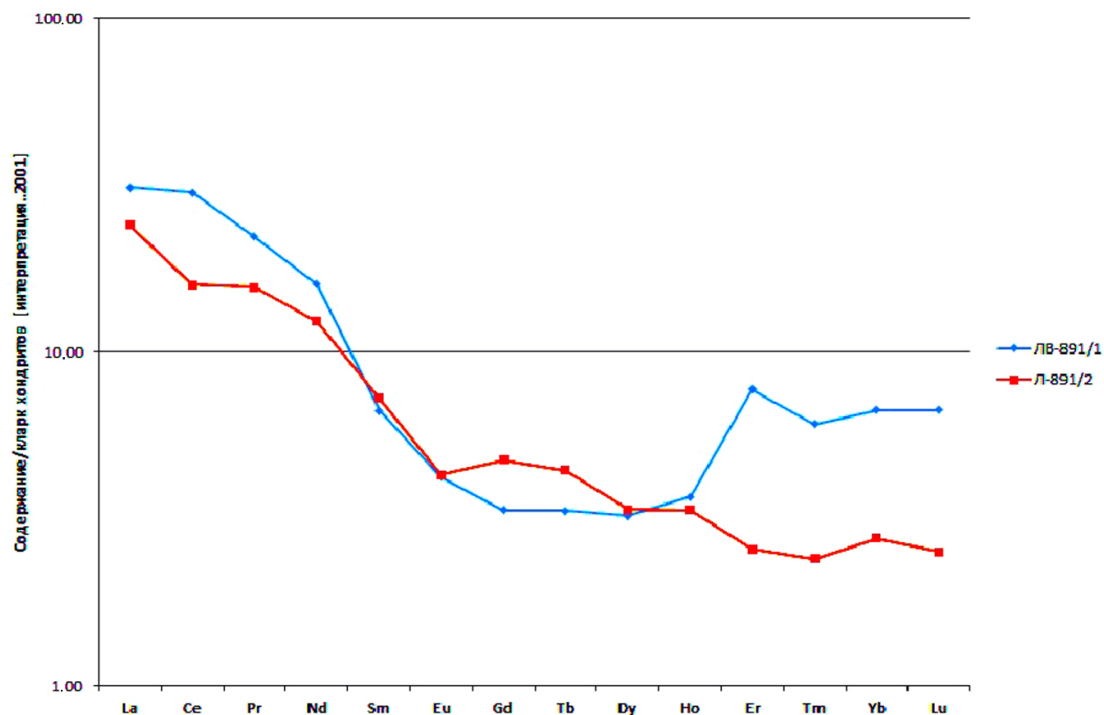


Рис. 9. Распределение редкоземельных химических элементов в антраците (красный) и кислотном остатке (голубой) материала построек конус в конусе в сравнении с кларком хондритов.

Fig. 9. Distribution of rare earth chemical elements in anthracite (red) and acid residue (blue) of the building material cone in cone in comparison with the chondrite clark.

ризуется изотопным составом углерода -36.64% . Изотопная разница между составом углерода в антраците СІС и биогенном материале (кирогене) составляет -17.50% . Значительно более тяжелый изотопный состав углерода ($+2.16\%$) имеет карбонат конкреций из толщ таврической серии.

Изотопный состав кислорода в антраците построек СІС изменяется в интервале от -14.52 до -13.45% (VPDB). Их значения характеризуются значительно меньшим разбросом содержаний, чем углерод (см. табл. 2). Отмечаются изменения в составе карбонатов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ по мере роста построек. На начальном этапе они отличаются слегка облегченным содержанием изотопов кислорода и более тяжелым составом изотопов углерода.

ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБОНАТНЫХ ПОСТРОЕК С ТЕКСТУРОЙ КОНУС В КОНУСЕ

Интересные породы с текстурой СІС встречаются в отложениях от протерозоя до мезозоя (Tarr, 1922; Логвиненко, 1961; Hesse et al., 2019). Множество гипотез их образования можно разделить на два крупных блока. Первый связан с процессами механического преобразования осадков, а второй —

с деятельностью живых организмов (Колокольников, 2002; Сонин, 2007; Тугарова, 2014; Hesse et al., 2019). Результаты наших исследований позволяют отказаться от взглядов на механические гипотезы и по-другому осмыслить биогенную природу образования построек с текстурами СІС.

Ученые, которые придерживаются биогенной гипотезы, обычно описывают породы СІС, как конкреции (Сонин, 2007; Тугарова, 2014; Maher et al., 2017; Hesse et al., 2019). Некоторые из них считают, что они формировались в осадочном слое на глубинах от нескольких сантиметров до нескольких метров. Бактерии за счет переработки органического вещества из вмещающих толщ создают карбонатный материал, из которого процессы диагенеза и катагенеза создавали биоморфные структуры СІС (Maher et al., 2017; Hesse et al., 2019). Другие связывают образование подобных “конкреций” с деятельностью цианобактерий в прибрежной части морских бассейнов, при этом указывается на их связь с метановыми флюидами (Сонин, 2007; Тугарова, 2014).

Результаты наших исследований морфологии и геохимии пород с текстурой СІС подтверждают, что они отличаются от конкреций и являются постройками сообществ микроорганизмов. У них всегда имеются основание и вершина, а рост начинается с

Таблица 2. Изотопный состав углерода, кислорода, серы из антраконита, кислотного остатка (кирогена) материала построек CIC, пирита из андезитов, туфов и конкреций**Table 2.** Isotopic composition of carbon, oxygen, sulfur from anthraconite, acid residue (kyrogen) of the CIC building material, pyrite from andesites, tuffs and concretions

№ пробы	Описание	$\delta^{13}\text{C}$ ‰, PDB	$\delta^{34}\text{S}$ ‰, CDT	$\delta^{18}\text{O}$ ‰, SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ ‰, PDB
Л-422	Антраконит из верхней части CIC обр. 1	–18.60	Н. д.*	+17,73	–13.71
Л-423	Антраконит из нижней части CIC обр. 1	–18.51	Н. д.	+16,90	–14.52
Л-425	Антраконит из верхней части CIC обр. 2	–15.64	Н. д.	+18,00	–13.45
Л-424	Антраконит из нижней части CIC обр. 2	–13.52	Н. д.	+17,25	–14.18
Л-934	Антраконит из верхней части CIC обр. 10	–19.14	Н. д.	Н. д.	Н. д.
ЛВ-891/1	Антраконит из нижней части CIC обр. 10	–17.94	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Л-935	Антраконит из верхней части CIC обр. 18	–17.37	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Л-57	Антраконит из нижней части CIC обр. 18	–16.64	Н. д.	Н. д.	Н. д.
ЛВ-887	Карбонатный материал конкреций	+2.16	Н. д.	Н. д.	Н. д.
ЛВ-883	Кислотный остаток антраконита из верхней части постройки CIC обр. 10	–36.64	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Л-75	Пирит из лав андезитов	Н. д.	+1.72	Н. д.	Н. д.
Л-57/1	Пирит из сульфидных линз туфов под поверхностью построек CIC	Н. д.	+11.28	Н. д.	Н. д.

Примечание. Н. д. – нет данных.

Note. Н. д. – no data.

пузырьковой формы и заканчивается древовидной (см. рис. 3а, б, г). Ранее были описаны три стадии образования построек CIC. Главными их формами служат древовидный скелет с модульным строением и лепестки ламин, имеющие микронную толщину. По предположению А.А. Яркова, ламины являются плоскими клетками простейших (2015). Возможно, в них присутствуют ядрышки с цитоплазмой (Богоявленская, 2007; Ярков, 2015). Поэтому ламины выступали центрами формирования новых подобных клеток постройки. Их длина зависела от расположенных рядом сегментов скелетов построек. В процессе роста ламины срастались не только с родственными близлежащими лепестками, но также с плоскими клетками древовидных строений, расположенных рядом (см. рис. 3в). В результате формировалась плоская поверхность матов с углублениями около сегментов скелетов. В понижениях скапливался терригенный материал. Обычно между лепестками ламин его содержание незначительное, что подтверждает высокие скорости образования строений CIC. В периоды существенного выпадения глинистого материала на поверхность матов ламины обретали способность увеличивать высоту рифленых выступов (см. рис. 4а, г; 5а). Это позволяло очистить поверхность от грязи, а по выступам

отростков, предположительно, поступало питание в клетки из окружающей среды.

Нахождение построек CIC в аргиллитах таврической серии и данные формирования вулканической толщи свидетельствуют об образовании их на значительных морских глубинах в афотической зоне (Лысенко и др., 2022). Морские условия подтверждаются соотношением $\text{Sr/Ba} = 7.2$ (Катченков, 1959). Постройки формировались на твердой поверхности. Значительные содержания марганца, титана и соотношение $\text{Ti/Zr} = 66$ свидетельствуют о нахождении их рядом с вулканическими центрами (Юдович, Кетрис, 2011). Питание живых организмов построек не связано с жизнедеятельностью цианобактерий или с переработкой биогенных остатков, как считают некоторые исследователи (Тугарова, 2014; Ярков, 2015; Сонин, 2007). Данные анализов $\delta^{13}\text{C}$ карбонатного материала (от –13.59 до 19.14‰) и органики (36.64‰) построек свидетельствуют о том, что их образование коррелирует с симбиозом прокариот и архей по переработке углеродородных флюидов хемосинтезом. По изотопному составу углерода материал построек отличается от конкреций (+2.16‰) из терригенной толщи таврической серии, что доказывает различные условия их формирования.

На существование симбиоза клеток ламин с сообществом метаногенных, метанотрофных, нитрат- и сульфатредуцирующих бактерий и архей указывают присутствие в породе фрамбоидов пирита, микростяжений кварца и сферолитов антраконита. Описания подобных форм в породах СИС приводятся в работах ряда исследователей (Gilman, Metzger, 1967; Тугарова, 2014; Maher et al., 2017; Hesse et al., 2019). В статье (Hesse et al., 2019) описаны переходы сферолитовых сростков в текстуры СИС. Авторы данной статьи считают, что образование сферолитов связано с раскристаллизацией коллоидных растворов в осадках при незначительном давлении, а при опускании пород в недра до 4.0 км сферолитовые волокна замещаются коническими пучками (Hesse et al., 2019). Данная трактовка генезиса не подтверждается сохранностью глинистого вещества между ламинами и не совсем ясно, почему сферолиты сохраняются на поверхности конкреций СИС, хотя давление кругом одинаковое. Другие исследователи (в том числе мы) считают, что образование сферолитов связано с бактериальной деятельностью (Buczynski, Chafetz, 1992; Kirkham, Tucker, 2018; Лысенко, 2019б). В англоязычной литературе их обычно называют ботриоидальными образованиями. Они описываются при характеристике древних карбонатов просачивания углеводородов (Aharon, 1994; Campbell, 2006). Образование сферолитов карбоната за счет процессов бактериального хемосинтеза дополнительно подтверждают данные разницы изотопного состава углерода из карбоната и органического вещества (–17.5‰) (Aharon, 1994; Campbell, 2006; Юдович, Кетрис, 2011). Присутствие сферолитовых образований на поверхности ламин построек проще объяснить симбиозом между ними и сообществами архей и прокариот. Ламин для этих микроорганизмов служили надежным субстратом и укрытием.

Процессы образования карбоната, судя по составу вулканических флюидов, повышенному содержанию органического вещества и данным соотношениям $V/(V + Ni) = 0.67$ и $V/Cr = 1.24$, протекали в аноксидной обстановке (Эрнст, 1976; Летникова, 2005; Жарков и др., 2011; Мизенс и др., 2014). В то же время формирование органического вещества клеток ламин происходило в оксидных условиях, что подтверждают соотношения $Mo/Mn = 0.000006$ и $U/Th = 0.27$, а также содержания $U = 0.55$ г/т (Холодов, Недумов, 2005; Мизенс и др., 2014). Такие парадоксальные условия одновременно могут существовать в клетке или вблизи нее.

Вблизи поверхности подводных вулканов СИС формировались в промежутках между периодами его активной деятельности. В это время из жерла происходили незначительные выбросы туфового материала, которые сопровождалась выбросами газовых струй из фумарол на склонах. Зарождение и образование построек наблюдалось вблизи грязе-

вых котлов или около термальных источников. На это указывают высокие отношения титана к циркону (64.7) (Летникова, 2005; Мизенс и др., 2014). По изотопным данным кислорода температура флюидов находится в интервале от +62 до +83°. (Расчет по формуле $T = 14.6 - 4.4(\delta^{18}O - A) + 0.27(\delta^{18}O - A)^2$ ($A_{\text{вода океана Тетис}} = \delta^{18}O_{\text{SMOW}}$ от –2 до +2‰)) (Тейс, Найдин, 1973). Полученные данные температур почти не отличаются от результатов других исследователей и измерений на современных вулканах (Жарков и др., 2011; Hesse et al., 2019). По расчетам, нижние части построек СИС формировались при более высоком температурном режиме, чем верхние. Это объясняется затуханием деятельности фумарол.

Выбросы газов и гидротермальных вод носили периодический импульсный характер. Возможно, они контролировали динамику роста построек. Вместе с газами происходил выброс жидкого глинистого вещества монтмориллонитового состава, который формировался за счет разложения пород кислотными растворами гидротерм (Жарков и др., 2011). Можно предположить, что главными газовыми компонентами флюидов являлись метан и сероводород, обычно преобладающие в современных постмагматических процессах (Жарков и др., 2011). Это подтверждается наличием в породах Тессельского палеовулкана пирита и антраконита (Лысенко, 2019а; Лысенко и др., 2022). На связь углеводородных флюидов с вулканической деятельностью указывают высокие содержания лито-, халькофильных и редкоземельных элементов в антраконите построек СИС, присутствие пеплового материала в строениях, нахождение рядом комплекса вулканических пород, а также данные изотопного состава углерода, серы и кислорода (см. табл. 2) (Фор, 1989; Мизенс и др., 2014). Из недр совместно с газами поступали тяжелые и легкие углеводороды. На их одновременное присутствие указывает $V/Ni = 2.04$ (Валяев, 1997). Подобные выбросы нефтепродуктов характерны для постмагматической деятельности современных вулканов (Жарков и др., 2011). Метан, тяжелые и легкие углеводороды являлись материалом, которые прокариоты в процессе жизнедеятельности использовали для создания органического вещества и карбоната построек СИС. Биогенное углеродистое вещество формировалось в значительном количестве. Его было достаточно для питания живых клеток СИС, бактерий, крупной фауны, а также окрашивания кальцита и глинистого материала построек.

На современных выходах холодной и горячей дегазации обычно существуют оазисы жизни с крупной фауной (Aharon, 1994; Campbell, 2006). Подобный биоценоз червей, моллюсков и гастропод располагался вблизи описываемых построек СИС, об этом упоминалось при характеристике туфов (см. рис. 2а). Они находились в симбиозе с сообществом архей и прокариот. Жизнь в оазисе вблизи построек

ек СИС проходила на значительных глубинах – ниже границы критической зоны растворения карбоната и около гидротермальных источников вулкана (Лысенко и др., 2022). Поэтому карбонатный материал раковин биоценоза заместился сульфидами, а значительная его часть растворилась.

По условиям образования и многим признакам постройки СИС можно отнести к древним породам карбонатов углеводородного просачивания (hydrocarbon seeps carbonates), формирование которых связано с зонами углеродной дегазации (Aharon, 1994; Campbell, 2006). Впервые признаки их выделения были приведены в научной статье (Campbell, Bottjer, 1993). Наши исследования СИС дополнили критерии выделения карбонатов углеводородного просачивания в геологических разрезах. Главным условием их образования является поступление углеводородных флюидов из грязевых котлов или термальных источников. Из-за небольшого периода существования постройки СИС имеют сравнительно незначительные размеры. Вторым обязательным условием их формирования выступает деятельность сообщества бактерий и архей по переработке углеводов. Дополнительно на схожесть формирования карбонатов углеводородного просачивания с постройками СИС указывают следующие признаки: приуроченность к поверхности вулкана или тектоническим зонам; кварцевые и карбонатные сферолитовые образования (ботриониды); биомаркеры (кероген); присутствие раковин моллюсков и гастропод; наличие углеводов легкой и тяжелой нефти в карбонате; фрамбоиды пирита; повышенное содержание лито-, халькофильных и редкоземельных элементов; изотопный состав углерода антраконита; изотопное фракционирование углерода из карбоната и органического вещества. Материалом для формирования бактериальных СИС служил метан, поэтому подобные постройки карбонатов углеводородного просачивания можно называть метанолитами триаса (Лысенко и др., 2022).

При изучении пород СИС исследователи не уделяли достаточно внимания связям этих образований с вулканизмом. В то же время часто при характеристике геологических разрезов с породами СИС приводятся описания нахождения рядом интрузивных и вулканических образований (Тугарова, 2014; Hesse et al., 2019; Шумилов, 2020). Постройки СИС обладают разнообразной внешней морфологией и сложным внутренним строением. Подобное разнообразие связано с борьбой живых организмов за существование и выживание. Они формировались в экстремальных физико-географических условиях на поверхности действующего вулкана. У нас отсутствует возможность сравнить строения тессельских построек СИС с подобными образованиями из других временных интервалов и различных мест. Судя по рисункам из других статей, они не отличаются от наших тессельских построек СИС.

Строителями подобных образований является группа или вид проблематичных организмов. На сегодня отсутствуют их живые аналоги. По предложению А.А. Яркова, наши постройки СИС можно отнести к классу *Zarizinlaminata* из царства *Protista* (простейших) (Ярков, 2015). В то же время у них имеются отличия по условиям питания и образования. Ламины СИС питаются за счет симбиоза с сообществом метанотрофных архей и бактерий, поэтому постройки формируются в других палеогеографических условиях (Ярков, 2015).

Постройки СИС встречаются во временном интервале от протерозоя до конца мезозоя (Ярков, 2015; Hesse et al., 2019). В этот промежуток времени происходил эволюционный процесс модификации скелета и форм ламин. В будущем на основании изучения изменения этих компонентов можно разработать систематику организмов, которые участвовали в создании построек СИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что постройки с текстурами конус в конусе, найденные рядом с Тессельским палеовулканом, созданы простейшими организмами в симбиозе с прокариотами, которые перерабатывали углеводородные флюиды в органическое вещество и карбонат. Постройки формировались в афотической зоне на склонах подводного вулкана вблизи грязевых котлов или гидротермальных источников. Присутствие рядом с постройками биоценоза крупной фауны и другие признаки позволяют относить образования СИС к древним карбонатам углеводородного просачивания или метанолитам триаса. Углеводородные газы, которыми питались микроорганизмы, имеют связь с глубинными флюидами вулканов. Их природу подтверждают аномальные содержания в карбонате лито-, халькофильных и редкоземельных элементов, присутствие легких и тяжелых битумов, а также данные изотопного состава углерода и серы.

В настоящее время не известны живые организмы, которые могли создавать строения СИС. На дне Индийского и Тихого океанов имеется большое количество действующих и потухших вулканов, которые практически не изучены. Возможно, в будущем при их обследовании на больших глубинах рядом с выходами горячих источников будут обнаружены современные постройки СИС с живыми организмами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арсланов Х.А. (1987) Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л.: ЛГУ, 300 с.
Балашов Ю.А. (1976) Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 267 с.

- Богоявленская О.В. (2007) Девонские строматопораты (морфология, систематика, стратиграфическое и палеогеографическое распространение). *Литосфера*, (1), 109-122.
- Валяев Б.М. (1997) Углеводородная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений. *Геология нефти и газа*, (9), 1-6.
- Дубинин А.В. (2004) Геохимия редкоземельных элементов в океане. *Литология и полез. ископаемые*, (4), 339-358.
- Жарков Р.В., Козлов Д.Н., Дегтерев А.В. (2011) Современная фумарольная и гидротермальная активность вулкана Синарка (о. Шиашкотан, Курильские острова). *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(17), 179-184.
- Интерпретация геохимических данных (2001) (Под ред. Е.В. Склярова). М.: Интермет Инжиниринг, 288 с.
- Катченков С.М. (1959) Малые химические элементы в осадочных породах и нефтях. Л.: Гостоптехиздат, 271 с.
- Колокольцев В.Г. (2002) Текстура cone-in-cone и ее происхождение. *Литология и полез. ископаемые*, (6), 612-627.
- Летникова Е.Ф. (2005) Геохимическая специфика карбонатных отложений различных геодинамических обстановок северо-восточного сегмента палеоазиатского океана. *Литосфера*, (1), 70-81.
- Логвиненко Н.В. (1961) О флишевых текстурах триасовых отложений Крыма. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (3), 16-28.
- Лысенко В.И. (2019а) Характеристика вулканической толщи верхнего триаса в Юго-западной части Горного Крыма. *Уч. зап. Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*, 5(71), 230-253.
- Лысенко В.И. (2019б) Экспериментальные работы по возрождению к жизни сообществ архей и бактерий миоцена из гераклитов. *Тр. Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН*, 11(3), 17-41.
- 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>
- 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.
- Муратов М.В. (1959) О стратиграфии триасовых и нижнеюрских отложений Крыма. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (11), 31-41.
- Сонин Г.В. (2007) Фациальные условия распространения и экологический морфогенез пермских строматолитов. *Верхний палеозой России: стратиграфия и палеогеография: материалы всерос. науч. конф.* Казань, КазГУ, 306-309.
- Ставский А.П., Казанцев А.В. (1973) Некоторые особенности текстур конус в конусе в породах таврической серии Крыма. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (6), 199-201.
- Тейс Р.В., Найдин Д.П. (1973) Палеотермометрия и изотопный состав кислорода органических карбонатов. М.: Наука, 254 с.
- Тугарова М.А. (2014) Микробиолиты триаса архипелага Шпицберген. *Тр. ВНИИОкеангеология*, вып. 227. СПб.: ВНИИ Океангеология, 198 с.
- Фор Г. (1989) Основы изотопной геологии. М.: Мир, 590 с.
- Холодов В.Н., Недумов Р.И. (2005) О применении молибденового модуля к реконструкции газового состава вод меловой Атлантики. *Докл. АН*, 400(2), 250-253.
- Шнюков Е.Ф., Шереметьев В.М., Маслаков Н.А., Кутний В.А., Гусаков И.Н., Трофимов В.В. (2005) Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар.: ГлавМедиа, 176 с.
- Шумилов И.Х. (2020) Текстура конус-в-конусе: новые данные. *Литосфера*, 20(1), 76-92. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-1-76-92>
- Эрнст В. (1976) Геохимический анализ фаций. Л.: Недра, 127 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Ярков А.А. (2015) *Zarizinlaminata* – царские пластинки. *Современные проблемы географии*. Сборник науч. труд. по материалам Юбилейной науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию Волгоградского отделения Русского географического общества. М.: Планета, 55-104.
- Aharon P. (1994) Geology and biology of modern and ancient submarine Hydrocarbon seeps and vents: an introduction. *Geo-Marine Lett.*, 14(2), 69-73. <http://doi.org/10.1007/BF01203716>
- Buczynski C., Chafetz H.S. (1992) Bacterially Induced Lithification of Microbial Mats. *PALAIOS*, 7(3), 277-293. <http://doi.org/10.2307/3514973>
- 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(B3), 4951-4968. <http://doi.org/10.1029/93JB02798>
- Campbell K.A. (2006) Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 232(2-4), 362-407. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.018>
- Campbell K.A., Bottjer D.J. (1993) Fossil cold seeps. *National Geographic Research & Exploration*, 9(3), 326-343.
- Gilman R.A., Metzger W.J. (1967) Cone in cone concretions from Western New York. *J. Sediment. Petrol.*, 37, 87-95.
- Hesse R., Fong C., Schumann D. (2019) Origin of spherulitic and cone-in-cone concretions in Cambro-Ordovician black shales, St Lawrence Estuary, Quebec, Canada. *Geol. Mag.*, 156(10), 1793-1804. <https://doi.org/10.1017/S0016756819000128>
- Kirkham A., Tucker M.E. (2018) Thrombolites, spherulites and fibrous crusts (Holkerian, Purbeckian, Aptian): Context, fabrics and origins. *Sediment. Geol.*, 374, 69-84. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.07.002>
- Maher H., Ogata K., Braathen A. (2017). Cone-in-cone and beef mineralization associated with Triassic growth basin faulting and shallow shale diagenesis, Edgeøya, Svalbard. *Geol. Mag.*, 154(2), 201-216. <http://doi.org/10.1017/S0016756815000886>
- Tarr W.A. (1922) Cone-in-cone. *Amer. J. Sci.*, 4(21), 199-213.

REFERENCES

- Arslanov H.A. (1987) Radiocarbon: geochemistry and geochronology. Leningrad, LGU, 300 p. (In Russ.)
- Balashov Yu.A. (1976) Geochemistry of rare earth elements. Moscow, Nauka Publ., 267 p. (In Russ.)
- Bogoyavlenskaya O.V. (2007) Devonian stromatoporates (morphology, systematics, stratigraphic and paleogeographic distribution). *Lithosphere (Russia)*, (1), 109-122. (In Russ.)
- Buczynski C., Chafetz H.S. (1992) Bacterially Induced Lithification of Microbial Mats. *PALAIOS*, 7(3), 277-293. <http://doi.org/10.2307/3514973>
- 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(B3), 4951-4968. <http://doi.org/10.1029/93JB02798>
- Campbell K.A. (2006) Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 232(2-4), 362-407. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.018>
- Campbell K.A., Bottjer D.J. (1993) Fossil cold seeps. *National Geographic Research & Exploration*, 9(3), 326-343.
- Dubinin A.V. (2004) Geochemistry of rare earth elements in the ocean. *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (4), 339-358. (In Russ.)
- Ernst W. (1976) Geochemical analysis of facies. Leningrad, Nedra Publ., 127 p. (In Russ.)
- Fore G. (1989) Fundamentals of isotope geology. Moscow, Mir Publ., 590 p. (In Russ.)
- Gilman R.A., Metzger W.J. (1967) Cone in cone concretions from Western New York. *J. Sediment. Petrol.*, 37, 87-95.
- Hesse R., Fong C., Schumann D. (2019) Origin of spherulitic and cone-in-cone concretions in Cambro-Ordovician black shales, St Lawrence Estuary, Quebec, Canada. *Geol. Mag.*, 156(10), 1793-1804. <https://doi.org/10.1017/S0016756819000128>
- Interpretation of geochemical data. (2001) (Ed. by E.V. Sklyarov). Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 288 p. (In Russ.)
- Katchenkov S.M. (1959) Minor chemical elements in sedimentary rocks and oils. Leningrad, Gostoptekhizdat Publ., 271 p. (In Russ.)
- Kholodov V.N., Nedumov R.I. (2005) On the application of the molybdenum module to the reconstruction of the gas composition of the waters of the Cretaceous Atlantic. *Dokl. AN*, 400(2), 250-253. (In Russ.)
- Kirkham A., Tucker M.E. (2018) Thrombolites, spherulites and fibrous crusts (Holkerian, Purbeckian, Aptian): Context, fabrics and origins. *Sediment. Geol.*, 374, 69-84. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.07.002>
- Kolokoltsev V.G. (2002) Cone-in-cone texture and its origin. *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (6), 612-627. (In Russ.)
- Letnikova E.F. (2005) Geochemical specificity of carbonate deposits of different geodynamic settings of the northeastern segment of the Paleoasian ocean. *Lithosphere (Russia)*, (1), 70-81. (In Russ.)
- Logvinenko N.V. (1961) On flysch textures of Triassic deposits of Crimea. *Izv. Vuzov. Geologiya i Razvedka*, (3), 16-28. (In Russ.)
- Lysenko V.I. (2019a) Characteristics of the Upper Triassic volcanic strata in the southwestern part of Mountainous Crimea. *Uch. zap. Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 5(71), 230-253. (In Russ.)
- Lysenko V.I. (2019b) Experimental work on the revival of Miocene archaeal and bacterial communities from Heracles. *Tr. Karadagской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН*, 11(3), 17-41. (In Russ.)
- Lysenko V.I., Sadykov S.A., Mikhailichenko M.V. (2022) Hydrothermal-bacterial constructions with brachiopod fauna on the surface of the 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>
- Maher H., Ogata K., Braathen A. (2017). Cone-in-cone and beef mineralization associated with Triassic growth basin faulting and shallow shale diagenesis, Edgeøya, Svalbard. *Geol. Mag.*, 154(2), 201-216. <http://doi.org/10.1017/S0016756815000886>
- Mizens G.A., Stepanova T.I., Kucheva N.A., Sapurin S.A. (2014) Geochemical features of limestones and sedimentation conditions 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.)
- Muratov M.V. (1959) On the stratigraphy of Triassic and Lower Jurassic deposits of Crimea. *News of Universities. Izv. Vuzov. Geologiya i Razvedka*, (11), 31-41. (In Russ.)
- Shnyukov E.F., Sheremet'ev V.M., Maslakov N.A., Kutnii V.A., Gusakov I.N., Trofimov V.V. (2005) Mud volcanoes of the Kerch-Taman region. Krasnodar, GlavMedia Publ., 176 p. (In Russ.)
- Shumilov I.Kh. (2020) Cone-in-cone texture: new data. *Lithosphere (Russia)*, 20(1), 76-92. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-1-76-92>
- Sonin G.V. (2007) Facies conditions of distribution and ecological morphogenesis of Permian stromatolites. *Upper Paleozoic of Russia: stratigraphy and paleogeography: Proceedings of the All-Russian scientific conference*. Kazan, KazGU, 306-309. (In Russ.)
- Stavskiy A.P., Kazantsev A.V. (1973) Some features of "cone-in-cone" textures in rocks of the Tauride series of Crimea. *Izv. Vuzov. Geologiya i Razvedka*, (6), 199-201. (In Russ.)
- Tarr W.A. (1922) Cone-in-cone. *Amer. J. Sci.*, 4(21), 199-213.
- Teis R.V., Naidin D.P. (1973) Paleothermometry and isotopic composition of oxygen in organogenic carbonates. Moscow, Nauka Publ., 254 p. (In Russ.)
- Tugarova M.A. (2014) Triassic microbiolites of the Spitsbergen archipelago. *Tr. VNIIOkeangeologiya*, vyp. 227. Saint Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 198 p. (In Russ.)
- Valyaev B.M. (1997) Hydrocarbon degassing of the Earth and genesis of oil and gas fields. *Geologiya Nefti i Gaza*, (9), 1-6. (In Russ.)
- Yarkov A.A. (2015) Zarizinlaminata – royal plates. *Modern problems of geography*. Collection of scientific papers based on the materials of the Scientific practical conference dedicated to the 65th anniversary of the Volgograd branch of the Russian Geographical Society. Moscow, Planeta Publ., 55-104. (In Russ.)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2011) Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry). Syktyvkar, GeoPrint Publ., 742 p. (In Russ.)
- Zharkov R.V., Kozlov D.N., Degterev A.V. (2011) Modern fumarole and hydrothermal activity of Sinarka volcano (Shiashkotan Island, Kuril Islands). *Vestn. KRAUNTs. Nauki o Zemle*, 1(17), 179-184. (In Russ.)