УДК 56.016:551.71

МЕЗОАРХЕЙСКИЕ ХЕМОГЕННЫЕ СИЛИЦИТЫ – УНИКАЛЬНАЯ СРЕДА СОХРАННОСТИ РАННЕЙ ЖИЗНИ

© 2013 г. С. А. Светов, П. В. Медведев

Институт геологии Карельского научного центра РАН 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11 E-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию: 19.07.2012

Впервые в истории палеонтологических исследований на Фенноскандинавском щите обнаружены трубчатые микрообразования в кремнистых осадочных породах (хемогенных силицитах), приуроченных к нижней части разреза мезоархейской (3.0–2.9 млрд. лет) протоокеанической ассоциации и островодужному андезитовому комплексу Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Центральная Карелия). Выявленные микроструктуры интерпретируются как фрагменты чехлов нитчатых микроорганизмов, обитавших в подводных условиях вблизи действующих гидротермальных систем.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит, мезоархей, микроорганизмы, Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс, кремнистые породы.

Проблема появления и эволюции органических форм на Земле является ключевой в современной геологии и биологии. Развитие современных инструментальных методов микроскопических исследований позволяет заниматься бактериальнопалеонтологическим изучением осадочных пород на новом техническом уровне, в результате чего стало возможным установить широкое распространение фоссилизированных микроорганизмов в архейских вулканогенно-осадочных породных ассоциациях. [1, 2, 8, 19, 22, 24–29]

Древнейшие, на сегодняшний день, фоссилизированные микроорганизмы обнаружены в кремнистых породах, метаморфизованных в зеленосланцевой фации, из вулканогенных разрезов зеленокаменных поясов Западной Австралии (серия Варравуна, 3.49–3.31 млрд. лет) и Южной Африки (серии Онвервахт, 3.50-3.26 млрд. лет и Фиг Три, 3.26-3.23 млрд. лет). Подробнее об этих находках и об обосновании возраста вмещающих пород можно узнать в обзоре [15] и атласе [1]. Следует подчеркнуть, что все найденные древнейшие микрофоссилии связаны с микробиальными постройками (строматолитами и др.) [26]. Большинство специалистов трактует палеоархейские микрофоссилии, как остатки коккоидных и нитчатых бактерий, обладавших хемолитотрофным метаболизмом и не нуждавшихся в солнечном свете и кислороде [23].

За последние 15 лет многочисленные минеральные псевдоморфозы по микроорганизмам были обнаружены в метеоритах, относящихся к классу углистых хондритов [1, 22], и, несмотря на продолжающиеся дебаты по обоснованию биологической природы древнейших микрофоссилий [1, 7, 15, 25], все сделанные находки позволяют существенно дополнить наши знания о времени возможного зарождения жизни в раннем архее.

На территории Фенноскандинавского щита самыми древними находками являются сфероморфные акритархи и фрагменты нитчатых микроорганизмов, выделенные методом мацерации (химического растворения кремнезема плавиковой кислотой) из метаморфизованных осадочных пород Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса с возрастом 2.85-2.86 млрд. лет (Семченская и Совдозерская структуры, Центральная Карелия) [17]. В настоящее время данные находки подтверждены методами электронной микроскопии. Новые разновидности микрофоссилий позже были диагностированы в осадочных породах с возрастом 2.80-2.70 млрд. лет в Хизоварской структуре (Парандово-Тикшозерский зеленокаменный пояс), на севере Карелии [1, 2].

В данной работе представлены результаты детального геологического и палеонтологического исследования древнейших (3.0–2.9 млрд. лет) на Фенноскандинавском щите мезоархейских кремнистых осадочных пород – силицитов, на примере вулканогенно-осадочных разрезов Хаутаваарской и Койкарской структур Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Центральной Карелии (Рис. 1).

В изучаемых структурах силициты приурочены к коматиит-базальтовой и базальт-андезит-дацитриолитовой (БАДР) вулканогенно-осадочным ассоциациям формирующимся в контрастных геодинамических обстановках зоны перехода протоокеан-протоконтинет во временном интервале от 3.05 до 2.90 млрд. лет [10, 11, 16]. Таким образом, на примере исследуемых объектов возможно не только охарактеризовать вероятное присутствие



Рис. 1. Упрощенная схема геологического строения палеоархейского Ведлозерского блока (Центральная и Восточная Карелия) и положения зеленокаменных структур в его обрамлении.

Черным цветом показаны мезоархейские зеленокаменные структуры, темно-серым цветом архейские комплексы Ведлозерского блока, светло-серый цвет – перекрывающие палеопротерозойские породные ассоциации. Районы работ: а – Койкарская, б – Хаутаваарская структуры Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. биоформ в древнейших на Фенноскандинавском щите осадочных породах, но и оценить характер распределения биоформ в латерально разобщенных палеообстановках транзитной зоны от шельфа до океанического ложа.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

Архейский Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс представляет собой сохранившийся фрагмент мезо-неоархейской аккреционной системы, сложенной несколькими стратотектоническими ассоциациями, образованными в контрастных геодинамических обстановках, сходных с современными конвергентными зонами перехода океан-континент [10].

Древнейшие комплексы зеленокаменного пояса представлены вулканитами дифференцированной БАДР-серии известково-щелочного и адакитового ряда [11] (Хаутаваарская и Койкарская структуры) интерпретируемой как фрагмент островодужного комплекса [10], а также коматиит-базальтовой серией (сохранившейся в Хаутаваарской, Койкарской, Совдозерской, Паласельгинской структурах) с прослоями глубоководных кремнистых и углеродистых осадков [13], сформированной в обстановке океанического плато [14].

Дифференцированный БАДР-адакитовый комплекс Койкарской структуры сохранился в редуцированном объеме в виде фрагмента верхней ча-



- Место опробования силицитов в разрезах

Рис. 2. Схемы реконструированных разрезов.

а – редуцированный фрагмент мезоархейского разреза БАДР адакитовой ассоциации Койкарской структуры, б – мезоархейская коматиит-базальтовая ассоциация Хаутаваарской структуры (от остального разреза отделена тектоническими зонами).



Рис. 3. Диаграммы с конкордиями для цирконов из пород древней островодужной и коматиит-базальтовой ассоциации Хаутаваарской структуры Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Центральной Карелии.

а – выделенные цирконы из центральной части субвулканического некка Игноильской постройки (БАДР – адакитовая ассоциация Хаутаваарской структуры); б – выделенные цирконы из слоя силицитов (в пачке с тонким переслаиванием мафитовых туффитов и силицитов) в средней части коматиитового разреза Хаутаваарской структуры. Ниже изохрон приведена морфология зерен цирконов (СL-режим) и положение точек датирования на вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP II. Рядом с номером точек, приведены значения ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb возраста отдельных зерен цирконов.

сти вулканогенно-осадочного разреза реконструированной мощностью 500 м (рис. 2а). Разрез сформирован стратифицированной толщей тонкого переслаивания туфов дацитового состава (БАДР-адакитовой серии), туффитов, туфопесчаников, граувакк, силицитов, доломитов с прослоями углеродсодержащих алевролитов и двухфазной дайковой системой дацитового, дацит-риолитового состава с возрастом 2935 ± 15 млн. лет [3]. Изучаемый фрагмент породной последовательности Койкарской структуры является аналогом верней части разреза мезоархейского островодужного комплекса Хаутаваарской площади [10].

Интерпретация петрологического состава вулканитов и геохимии осадочных пород островодужного комплекса позволяет предполагать формирование ассоциации в задуговом бассейне [14]. В настоящее время получены новые геохронологические данные для субвулкананической фазы Хаутаваарской структуры (Игноильская палеовулканическая постройка). На вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) проведено исследование 10 зерен цирконов, выделенных из 8 кг пробы субвулканических дацитов (рис 3а).

Все зерна имеют магматическую зональность и хорошую сохранность ядерных частей кристаллов. Установлено, что Th/U-отношение для изученных зерен варьирует в пределах 0.29-1.14 (среднее значение по пробам – 0.72, свидетельствует об их магматическом происхождении), а изохронный возраст равен 2958.7 ± 6.0 млн. лет, что может рассматриваться как время формирования субвулканической фазы Хаутаваарской структуры.

Полученная датировка хорошо согласуется с имеющимися геохронологическими данными [6, 10, 12]. Время формирования всего разреза вулканогенноосадочного островодужного комплекса ВедлозерскоСегозерского зеленокаменного пояса укладывается в интервал 2995 (±20)–2945 (±19) млн. лет (Хаутаваарская структура), 2990 (±20)–2935 (±15) млн. лет (Койкарская структура).

Мафитовый (коматиит-базальтовый) комплекс Хаутаваарской структуры в современном эрозионном срезе представлен стратифицированной лавово-пирокластической толщей высокомагнезиальных пород коматиит-базальтовой ассоциации мощностью около 2.5 км [13]. Осадочные породы – силициты, туффиты, графитистые алевролиты широко распространены в разрезе в виде цемента в подушечных лавах коматиитов, базальтов и отдельных (от 3 до 20 м) прослоев туффитов и силицитов между массивными лавовыми потоками (рис. 2б). Время формирования коматиит-базальтовой ассоциации по данным Sm-Nd метода (по породе в целом) составляет 2921 ± 55 млн. лет [10]. Для более точной оценки времени формирования осадочных прослоев и, соответственно, коматиитового разреза Хаутаваарской структуры, проведено изучение цирконов из слабоизмененного слоя силицитов (залегающего в пачке с тонким переслаиванием мафитовых туффитов и силицитов) в средней части коматиитового разреза Хаутаваарской структуры (рис. 2б).

Из слоя силицитов была отобрана проба весом 10 кг, из которой удалось выделить около 20 зерен циркона, имеющих торпедовидный, копьевидный, гиацинтовый и изометричный облик. Цвет зерен варьирует от розоватого, желтоватого до сероватого. Размер зерен колеблется от 0.35 × 0.10 до 0.15 × 0.11 мм. Микрозондовое изучение циркона показало наличие в них микровключений ильменита, апатита, олигоклаза и фрагментарно сохраненное обрастание циркона каймами плагиоклаза (лабрадор-андезин). Для большинства зерен характерна магматическая зональность и хорошая сохранность ядерных частей кристаллов. Именно такие кристаллы были изучены на прецизионном вторично-ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II (ЦИИ ВСЕГЕИ). В результате датирования шести зерен цирконов установлено, что Th/U отношение для данных зерен варьирует в пределах 0.42-1.32, и их изохронный возраст составляет 2917.2 ± 8.7 млн. лет (рис. 3б). Таким образом, полученные временные значения могут рассматриваться как возможное древнее ограничение времени формирования высокомагнезиальной ассоциации Хаутаваарской структуры.

В пределах Койкарской зеленокаменной структуры коматиит-базальтовая ассоциация представлена 80-метровым стратифицированным разрезом (переслаивание массивных, подушечных лавовых потоков с пачками туфов, туффитов и силицитов), имеет близкий по вещественному наполнению разрез (аналог Хаутаваарского) и сечется дайками дацитов возрастом 2935 ± 15 млн. лет [3]. Время формирования коматиит-базальтовой ассоциации Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса соответствует интервалу 2950–2900 млн. лет.

МЕЗОАРХЕЙСКИЕ СИЛИЦИТЫ

Изучаемые в работе мезоархейские силициты представляют собой афанитовые кремнистые и алюмокремнистые породы хемогенной природы, маркирующие в разрезе мафитовой и островодужной ассоциаций перерывы в вулканической деятельности [9].

Силициты характеризуются массивной, тонкослоистой, брекчированной, реже конкреционной текстурой (рис. 4а, б), имеют серый, зеленовато-серый, розоватый или черный цвет, обусловленный присутствием в осадочных породах хлорита, окислов железа и тонкодисперсного графитистого вещества. В минеральном составе силицитов преобладает волокнистый, колломорфный халцедон (на отдельных участках породы частично перекристаллизованный в криптозернистый кварц), слагающий породу на 75-86%. В виде примеси присутствуют серицит, альбит, калиевый полевой шпат, биотит, мусковит. В качестве акцессорных минералов выявлено небольшое количество зерен терригенного циркона (чаще осколков, имеющих слабо окатанные, корродированные формы), а также редкие минеральные агрегаты ниобатов группы фергюсонитасамарскита.

Особенностью осадочного разреза в Хаутаваарской структуре является широкое распространение маломощных прослоев тонкослоистых силицитов (рис. 4б, г), сложенных чередующимися слоями кварца (1–3 мм) и слойками (0.2–0.6 мм) хлорит-серицитового состава. В минеральном составе пород доминирует мелкозернистый кварц. Мощность слоев тонкослоистых силицитов варьирует от 1 до 3–5 м.

В Койкарской структуре наряду с тонкослоистыми, широко представлены в разрезе массивные серые, зеленовато-серые силициты с конкреционными текстурами. Конкреционные силициты встречаются как в виде отдельных слоев, так и в виде линзовидных прослоев в горизонтах туффитов. Породы характеризуются наличием большого количество кремнистых стяжений – конкреций, правильной овальной или линзовидной формы, вытянутых по сланцеватости. Конкреции размером от 1-2 до 20 мм, характеризуются четкими внешними контурами (рис. 4а). В ряде случаев для стяжений характерно внутренне зональное строение: периферическая часть более светлая, тонкозернистая, центральная - более темная с радиальнолучистыми волокнистыми структурами, выполнена халцедоном с примесью альбита и карбоната, содержит отдельные вкрапленники кварца размером до 0.5-1 мм. По периферии конкреции или



Рис. 4. Макро- и микрофото мезоархейских силицитов Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. а, в – конкреционные силициты Койкарской структуры, б, г – тонкослоистые силициты Хаутаваарской структуры. Ник. +.

плотно соприкасаются, или заключены в цемент криптозернистого кремнезема с рассеянными включениями чешуек серицита. Мощность слоев конкреционных силицитов в Койкарской структуре варьирует от 1 до 20 м.

Важно подчеркнуть, что в рассматриваемых структурах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса силициты находятся в хорошей сохранности, породы метаморфизованы в условиях хлорит-серицитовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма [5, 9], это позволяет проводить детальные микропалеонтологические исследования, ввиду отсутствия процесса перекристаллизации кремнезема.

МЕТОДЫ ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ

Для палеонтологического исследования нами был выполнен отбор проб из выходов силицитов. В Койкарской структуре изучались конкреционные и массивные силициты из верхней части разреза осадочной пачки островодужного комплекса (рис. 2а), в Хаутаваарской структуре слои массивных силицитов того же уровня, где было выполнено геохронологическое датирование (рис. 2б). В работе использованы штуфы породы, не имеющие контакта с дневной поверхностью, без корок выветривания, трещиноватости и любых проявлений вторичных процессов (ожелезнения, карбонатизации и т.д.). Глубина отбора проб от дневной поверхности варьировала от 15 до 25 см. Электронномикроскопически анализировались сколы силицитов площадью от 2 до 6 см², приготовленные непосредственно перед исследованием. В стерильных лабораторных условиях образцы со свежими сколами промывались последовательно в дистиллированной воде (15 минут с ультразвуковой обработкой) и позже - в спирте для исключения поверхностного загрязнения. В общей сложности было подготовлено около 30 препаратов с различны-

ЛИТОСФЕРА № 6 2013

ми плоскостными сечениями (как вкрест напластованию, так и параллельно).

Микроскопические исследования образцов с углеродным и бериллиевым напылением проводились на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) в Институте геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), с использованием BSE и SE детекторов при HV = 20 кВ. Расчет химического состава (в случае использования бериллиевого напыления) осуществлялся в лицензионном программном комплексе "The microanalysis suite issue 17" (Oxford instruments).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Валовый химический состав 25 проб силицитов определен "мокрой" химией в Институте геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск). Содержание петрогенных элементов (мас. %) в тонкослоистых массивных кремнистых породах варьируют в следующих пределах: $SiO_2 - 75.20-86.23$, $TiO_2 - 03-0.28$, $Al_2O_3 - 8.10-11.41$, $Fe_2O_3 - 0.14-1.52$, FeO - 0.10-0.36, MnO - 0.01-0.05, MgO - 0.21-0.57, CaO - 0.14-0.98, $Na_2O - 0.50-2.10$, $K_2O - 3.15-4.47$, $H_2O - 0.06-0.22$, п.п.п - 0.30-1.72, при этом кремнистые породы Хаутаваарской и Койкарской структур имеют близкую геохимическую характеристику.

Для конкреционных силицитов Койкарской структуры концентрации петрогенных элементов (мас. %) находятся на близком уровне с массивными силицитами. Содержания варьируют в следующих пределах: SiO₂ – 76.10–82.34, TiO₂ – 0.05–0.42, Al₂O₃ – 8.01–11.24, Fe₂O₃ – 0.21–1.12, FeO – 0.12–0.31, MnO – 0.01–0.04, MgO – 0.17–0.32, CaO – 1.10–1.41, Na₂O – 0.69–1.97, K₂O – 2.71–5.56, H₂O – 0.04–0.36, п.п.п – 0.38–2.18.

Прецизионный анализ содержания редких и редкоземельных элементов проводился на квадрупольном масс-спектрометре X – SERIES 2 фирмы Terhmo scientific (метод ICP – MS) в Институте геологии КарНЦ РАН. Установлено, что мезоархейские силициты значительно обогащены Rb (400– 720), Ba (700–1200), Th (20–40), U (4–6), Nb (25– 60), Ta (2–6), Zr (600–900), Hf (25–36) (все в г/т) и тяжелыми РЗЭ.

В результате детального электронно-микроскопического и микрозондового исследования было выявлено присутствие в мезоархейских кремнистых осадочных породах Хаутаваарской структуры нескольких разновидностей микроскопических образований (рис. 5а–г). Наибольшее количество находок связано с обнаружением фрагментов полых трубок длиной от 30 до 600 мкм, диаметром от 5 до 20 мкм и толщиной стенок 0.5–1 мкм. Кроме того, выявлены многочисленные деформированные (скрученные, сплющенные, разорванные) фрагменты трубок (рис. 5в). В единичных случаях обнаружены нижние части агрегатов трубок, собранных в пучки, размером 60 на 100 мкм в поперечнике, прикрепленные к породе (рис. 5д).

В конкреционных силицитах Койкарской структуры также удалось установить нахождение трубчатых образований (рис. 6а–л), причем в значительно большем количестве, чем в кремнистых породах из Хаутаваары. Среди доминирующих находок – прекрасно сохранившиеся фрагменты трубок длиной от 40 до 800 мкм (рис. 6а, в, д), что значительно превышает размер нитевидных образований, найденных в силицитах Хаутаваары.

Важно отметить, что морфология находок в изучаемых структурах идентична, однако размеры и сохранность существенно отличаются. Отдельные трубки сохранили область крепления к породе (рис. 5д, е), напоминающую своеобразную "корневую систему". Диаметр нитевидных трубчатых образований колеблется от 5 до 15-18 мкм, при этом толщина стенок трубок варьирует от 0.7 до 2 мкм (рис. 6и). Особенностью морфологии выявленных объектов является однородная, без признаков ветвления нитевидная структура трубок. Кроме целых форм, нами идентифицировано значительное количество расплющенных и деформированных фрагментов размером от 10-20 до 400 мкм (рис. 6ж-л). В отдельных случаях стенки трубок имеют обрастание мелкими гранулами кремнезема.

Химический состав выявленных нами трубчатых образований несколько отличается от вмещающей породы (приводится по данным микрозондового анализа, с использованием бериллиевого напыления проб, содержание элементов в вес. %). По химическому составу выделяется 2 группы "трубчатых образований": I – "углеродистые" (С – 17–64, О – 33–56%, Si – 0–4.9, Al – 0–1.5, P – 0–0.2); II – "кремнистые" (Si – 7–20, О – 34–64, С – 0–40, Al – 0–8). Однако полученные микрозондовым методом значения нормализованы к 100%, и, в силу инструментального ограничения, не учитывают предполагаемых концентраций N, H в органических формах. Они могут использоваться лишь как ориентировочные, не позволяя проводить корректные химические классификации.

В целях сопоставления, кроме силицитов, нами дополнительно проведено изучение образцов доломитов Койкарской структуры, залегающих в разрезе выше конкреционных силицитов.

Доломиты в разрезе формируют пласты мощностью от 35 до 45 м и прослеживаются в структуре на 2 км по латерали. По химическому составу породы отвечают известковистым доломитам MgO/CaO = 0.38–0.40. Доломиты имеют массивную текстуру, сургучно-красный цвет пород обусловлен примесью гематита. Изучение пород под сканирующим электронным микроскопом показало наличие в них трубчатых образований, подобных



Рис. 5. Электронно-микроскопические изображения микрообразований, выявленных в хемогенных силицитах из разреза коматиит-базальтового комплекса Хаутаваарской структуры Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса.

а – прямая трубка; б – увеличенная деталь стенки трубки с обрастанием мелкими гранулами кремнезема; в – скрученое лентовидное образование; г – трубчатое продольно раскрытое образование; д – пучковидный агрегат трубок в поперечном сечении. а–в – детектор рассеянных электронов (SE), д – детектор обратного рассеивания электронов (BSE).

обнаруженным в кремнистых осадочных породах, но лишь в единичных случаях.

Выявленные нами микрообразования (в силицитах и доломитах мезоархейского возраста) морфологически идентичны трубчатым структурам, приведенным в [1, 22], где они проинтерпретированы как бактериальные формы, а также подобны нитевидным микроорганизмам, установленным в корах выветривания палеопротерозойского (~2.4 млрд. лет, район оз. Паанаярви, Сев. Карелия), архейского (~2.8 млрд. лет, район оз. Воронье, Лехтинская структура, Сев. Карелия) возраста и близки бактериальным формам, обнаруженным в углистом хондритовом метеорите Мурчисон (СМ2) [1].

Следует подчеркнуть, что похожие микроструктуры, обладающие гибкими, но разорванными стенками, иногда собранные в пучкообразные, подобные колониям, агрегаты описаны ранее в кремнистых породах мезоархейского возраста (2.97 млрд. лет) в блоке Пилбара (Западная Австралия) [28]. В данной работе, на основании морфологических и геологических наблюдений, трубчатые структурные формы отнесены к фоссилизированным останкам микроорганизмов. Эти микрофоссилии так же, как и сделанные нами находки, по данным Рамановской спектроскопии, состоят из неупорядоченного углерода, изотопный состав которого согласуется с биологическим происхождением. Можно предполагать, что выявленные трубчатые структуры являются фоссилизированными чехлами хемолитотрофных микроорганизмов, обитавших в глубоководных обстановках, в зоне гидротермальной активности, связанной с ультраосновным (коматиитбазальтовым) вулканизмом.

Сходные условия существуют в настоящее время вблизи осевых зон срединно-океанических хребтов и зафиксированы в геологической летописи, начиная с раннего архея [20, 21, 29].

Вместе с тем, следует отметить, что проблема распознавания останков микроорганизмов в геологической летописи криптозоя и отличие *bona fide*



Рис. 6. Электронно-микроскопические изображения (детектор рассеянных электронов) микрообразований, выявленных в хемогенных силицитах из верхней части разреза БАДР-адакитового комплекса Койкарской структуры Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса.

а – скрученная продольно раскрытая трубка; б – деталь предыдущего снимка, видна деформация стенки трубки; в – длинное скрученное трубчатое образование; г – увеличенная деталь продольно раскрытой трубки с мелкими гранулами кремнезема на ее стенке; д – деформированное трубчатое образование; е – место крепления трубки к кристаллу кварца и выделение аморфного кремнезема в правом нижнем углу снимка (деталь предыдущего изображения); ж – сильно деформированное трубчатое образование; з – изогнутая перекрученная трубка, вверху слева видно место крепления к вмещающей породе; и – раскрытое окончание трубки, видна толщина стенок, деталь изображения а; к и л – фрагменты трубок с многослойной стенкой. биологических микрофоссилий от псевдофоссилий остается наиболее серьезным препятствием в изучении ранней жизни на Земле.

Исследования показывают, что не существует какого-либо универсального критерия (или критериев) определения биологического происхождения обнаруживаемых в породах архейского и протерозойского возраста микрообразований [27]. Междисциплинарный подход, объединяющий усилия геологии, биологии, химии и их приборные аналитические базы, возможно станет единственным способом решения данной проблемы в перспективе.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛИЦИТОВ КАК СРЕДЫ РАЗВИТИЯ АРХЕЙСКИХ МИКРОБИАЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

Геологические данные, полученные в результате предыдущих исследований Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса [5, 9–14], позволяют нам провести интерпретацию условий формирования кремнистых породных серий.

Петрологическое изучение островодужного БАДР-адакитового комплекса Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Хаутаваарская и Койкарская структуры) с мощной осадочной толщей в верхней части разреза позволило установить его подобие с породными ассоциациями фанерозойских субдукционных систем, формирующихся в окраинно-континентальных обстановках [10, 11].

На основе детального петрологического и изотопно-геохимического изучения коматиит-базальтовой ассоциации Хаутаваарской структуры (содержащей прослои силицитов) установлена принадлежность коматиитов к Al-недеплетированному типу Мунро (аналогичных комплексу Мунро Тауншип, Канада [18]), формировавшихся в плюмовом режиме [10]. Широкое распространение в ассоциации с коматиитами мощных (1500–1800 м) толщ толеитовых подушечных лав, содержащих между потоками прослои туфов и глубоководных осадочных пород - силицитов, графитистых алевролитов с горизонтами железистых кварцитов, позволяет предполагать образование коматиитбазальтового комплекса в океанических обстановках внеосевого вулканизма (удаленного от спрединговых центров), подобных современным океаническим плато [10, 14].

Образование силицитов в Койкарской и Хаутаваарской структурах происходило в перерывах между фазами вулканической активности в подводных обстановках, при этом основное отличие в генезисе кремнистых осадочных пород связано с различными типами бассейнов седиментации – глубоководным океаническим (в случае коматиитбазальтовой формации Хаутаваарской структуры) и мелководным задуговым (БАДР-адакитовой ассоциации Койкарской структуры). Изучение изотопной систематики кислорода δ^{18} О, проведенное ранее для силицитов Койкарской структуры [5] показало, что величина δ^{18} О для массивных кремнистых осадочных пород варьирует в узких пределах от 12.9 ± 0.16‰ (тонкослоистый силицит) до 13.0 ± 0.17‰ (однородые, массивные силициты). Для конкреционных разновидностей отмечаются более широкие вариации значения δ^{18} О – от 12.7 ± 0.12‰ до 13.1 ± 0.14‰. Изотопный состав кислорода мезоархейских силицитов Койкарской структуры подобен кремнистым породам группы Онвервахт, зеленокаменного пояса Барбертон (ЮАР), имеющих возраст 3.5 млрд. лет. Для данных образований разброс велечины δ^{18} О составляет 9.4–21‰.

Формирование силицитов в изучаемых структурах приурочено к гидротермальной фумарольной активности подводных вулканических построек, при этом в процессе седиментогенеза активно участвовала морская вода.

Модельная температура кремнистого осадконакопления в Койкарской структуре, полученная при интерпретации δ^{18} O, составляла 160°C (детальный расчет приведен в [5]), что, скорее всего, не может соответствовать палеотемпературам архейского океана, однако сопоставимо с температурами в океанических гидротремальных полях.

Альтернативная интерпретация, допускающая участие в седиментогенезе силицитов метеорной воды (с низким первичным δ^{18} O) в объеме от 40 до 50% позволяет получить палеотемпературы океана на уровне 70°C, что коррелирует с моделью формирования силицитов группы Онвервахт, для которых вклад метеорных воды составлял около 40%).

Для мезоархейских силицитов Койкарской структуры, формировавшихся в задуговом бассейне в непосредственной близости от островодужного комплекса, предположение об участии метеорных вод в седиментогенезе представляется возможным. Таким образом, реальные значения температур седиментации могли варьировать от 70° до 160°С.

Отложение мезоархейских кремнистых пород вероятнее всего происходило при химическом осаждении кремнезема из метастабильных коллоидных растворов, формирующихся в подводных гидротермальных системах. Вполне вероятно, что флюидные растворы глубинной циркуляции в архейских бассейнах, подобно современным морским гидротермальным системам, характеризовались повышенной температурой и наряду с кремнеземом были обогащены CO_2 и CH_4 [4], делая среду потенциально благоприятной для развития термофильных хемолитотрофных микроорганизмов.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования древнейших силицитов Фенноскандинавского щита,

ЛИТОСФЕРА № 6 2013

приуроченных к нижней части разреза мезоархейской (3.0-2.9 млрд. лет) протоокеанической ассоциации и островодужному андезитовому комплексу Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Центральная Карелия), впервые установлены трубчатые микрообразования размером 10 мкм в диаметре при длине до первых сотен мкм. Вероятно, они представляют собой фоссилизированные сообщества нитчатых микроорганизмов. Это позволяет предположить, что на данной территории 3.0-2.9 млрд. лет назад существовали оазисы жизни, локализованные в зонах гидротермальной активности, связанной с подводным коматиитовым вулканизмом в обстановках, подобных современным океаническим плато и средне-кислым вулканизмом в задуговых бассейнах. В этих условиях обитали хемолитотрофные микроорганизмы, метаболизм которых не требовал солнечного света и кислорода. Все необходимые для органического синтеза химические элементы поставлялись с продуктами поствулканической гидротермальной деятельности. Выявленные микроорганизмы, вероятно, принадлежат к группе термофилов, комфортно существующих в водной среде при высокой температуре.

Исследования ведутся в рамках программы фундаментальных исследований № 28 Президиума РАН "Проблемы происхождения жизни и становления биосферы", проект: "Реконструкция древнейших (3.8–3.0 млрд. лет) условий становления и последующего развития микробиальных сообществ раннего докембрия на примере восточной части Фенноскандинавского щита" и поддержаны грантом РФФИ 11-05-93959-ЮАР_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьева М.М., Герасименко Л.М., Гептнер А.Р. и др. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Ред. А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.
- Астафьева М.М., Розанов А.Ю. Древнейшие коры выветривания (на примере Карелии) и микрофоссилии // Палеопочвы и индикаторы континентального выветривания в истории биосферы. Серия "Геобиологические системы в прошлом". М.: ПИН РАН, 2010. С. 10–22.
- Бибикова Е.В., Крылов И.Н. Изотопный возраст кислых вулканитов Карелии // Докл. АН СССР. 1983. Т. 268, № 5. С. 1231–1235.
- 4. Короновский, Н.В. Гидротермальные образования в океанах // Соросовский Образовательный Журнал. 1999. № 10. С. 55–62.
- Металлогеническая эволюция архейских зеленокаменных поясов Карелии. Часть І. СПб.: Наука, 1993. 208 с.
- Овчинникова Г.В., Матреничев В.А., Левченков О.А. и др. U-Pb и Pb-Pb изотопные исследования кислых вулканитов Хаутаваарской зеленокаменной структуры, Центральная Карелия // Петрология. 1994. Т. 2, № 3. С. 266–281.

- Происхождение биосферы и коэволюция минерального и биологического миров / Ред. Н.П. Юшкин, В.И. Ракин, О.В. Ковалева. Сыктывкар: ИГ КомиНЦ УрО РАН, 2007. 202 с.
- Розанов А.Ю., Астафьева М.М., Вревский А.Б. и др. Микрофоссилии раннедокембрийских континентальных кор выветривания Фенноскандинавского щита // Отечеств. геология. 2008. № 3. С. 83–90.
- Рыбаков С.И., Светова А.И. Конкреционные алюмокремнистые породы в разрезах осадочно-вулканогенных формаций архейских зеленокаменных поясов Карелии // Конкреции докембрия. Л.: Наука, 1989. С. 199–207.
- Светов С.А. Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита / Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 230 с.
- 11. Светов С.А. Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита / Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 115 с.
- Светов С.А., Светова А.И., Назарова Т.Н. Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс Центральной Карелии – новые геохронологические данные и интерпретация результатов // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 13. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. С. 5–12.
- Светова А.И. Архейский вулканизм Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1988. 148 с.
- Светова А.И., Светов С.А., Назарова Т.Н. Мезоархейские седиментационные ансамбли в пределах офиолитоподобных комплексов Центрально-Карельского террейна // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 11. Петрозаводск: ИГ КарНЦ, 2008. С. 135–141.
- Сергеев В.Н., Семихатов М.А., Федонкин М.А. и др. Основные этапы развития докембрийского органического мира. Сообщение 1. Архей и ранний протерозой // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2007. Т. 15, № 2. С. 25–46.
- Слабунов А.И., Лобач-Жученко С.Б., Бибикова Е.В. и др. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. 2006. № 6. С. 1–29.
- 17. Тимофеев Б.В. Микрофитофоссилии раннего докембрия. Л.: Наука, 1982. 128 с.
- 18. *Arndt N.T.* Komatiite / Cambridge university press. 2008. 490 p.
- 19. Furnes H. Early Life Recorded in Archean Pillow Lavas // Science. 2004. V. 304, №. 5670. P. 578–581.
- Golding S.D., Duck L.J., Young E. et al. Earliest Seafloor Hydrothermal Systems on Earth: Comparison with Modern Analogues // Earliest Life on Earth: Habitats, Environments and Methods of Detection / S.D. Golding, M. Glikson (Eds.) Springer, 2011. P. 15–50.
- Hofmann A. Archaean Hydrothermal Systems in the Barberton Greenstone Belt and Their Significance as a Habitat for Early Life // Earliest Life on Earth: Habitats, Environments and Methods of Detection / S.D. Golding, M. Glikson (Eds.) Springer, 2011. P. 51–78.
- Hoover R.B. Fossils of Cyanobacteria in CI1 Carbonaceous Meteorites: Implications to Life on Comets, Europa, and Enceladus // J. Cosmology, 2011. V. 13. P. 3811–3848.

- 23. *Konhauser K.* Introduction to Geomicrobiology. Malden. Blackwell. 2007. 425 p.
- Schidlowski M. A 3.800-Million year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks // Nature. 1988. V. 333. P. 313–318.
- Schopf J.W. Fossil evidence of Archean life // Roy. Soc. Phil. Trans. Ser. B. 2006. V. 361. P. 869–885.
- Schopf J.W., Kudryavtsev A.B., Czaja A.D., Tripathi A.B. Evidence of Archean life: stromatolites and microfossils // Precambrian Res. 2007. V. 158. P. 141–155.
- 27. Schopf J.W., Kudryavtsev A.B., Sugitani K., Walter M.R. Precambrian microbe-like pseudofossils: A promising

solution to the problem // Precambrian Res. 2010. V. 179. P. 191–205.

- Sugitani K., Grey K., Allwood A. et al. Diverse microstructures from Archaean chert from the Mount Goldsworthy-Mount Grant area, Pilbara Craton, Western Australia: microfossils, dubiofossils, or pseudofossils? // Precambrian Res. 2007. V. 158. P. 228–262.
 Van Kranendonk M.J. Volcanic degassing, hydrothermal
- 29. Van Kranendonk M.J. Volcanic degassing, hydrothermal circulation and the flourishing of early life on Earth: a review of the evidence from c. 3490–3240 Ma rocks of the Pilbara Supergroup, Pilbara Craton, Western Australia. Earth-Sci. Rev. 2006.V. 74. P. 197–240.

Рецензент В.Н. Сергеев

Chemically precipitated siliceous rocks of Mesoarchean age – a unic environment for preservation of the early life traces

S. A. Svetov, P. V. Medvedev

Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS

Tube-like microstructures were discovered in chemically precipitated siliceous rocks with age ca 3 Ga on Fennoscandian shield for the first time. The rocks are situated in the low part of an oceanic paleovolcanic succession and island arc complex in Vedlozero-Segozero greenstone belt (central Karelia). The founded microstructures are interpreted as fragments of filamentous microorganisms inhabited zone of hydrothermal activity in a subaquatic environment.

Key words: Fennoscandian shield, Mesoarchean, microfossils, Vedlozero-Segozero greenstone belt, siliceous rocks.