

УДК 56.016:551.71

МИКРОФОССИЛИИ ИЗ РЕЛИКТА МЕЗОАРХЕЙСКОЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ КОМАТИИТОВ КОЙКАРСКОЙ СТРУКТУРЫ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ КАРЕЛИЯ)

**С. Ю. Чаженина, А. В. Бакаева, З. П. Рыбникова,
П. В. Медведев, С. А. Светов**

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

Изучены реликты коры выветривания мезоархейского (3000–2930 млн лет) возраста, сформированной на туфах и лавах коматиитов в Койкарской структуре (Центральная Карелия). В сохранившейся части профиля коры, представленной слоем хлорититов, обнаружены микроскопические трубчатые и сферические образования, морфологически сходные с фоссилизированными остатками микроорганизмов. Обсуждается природа этих образований и возможность их интерпретации как ацидофильных бактерий, обитавших на суше в зоне химического выветривания вулканогенных пород.

Ключевые слова: микрофоссилии; мезоархей; кора выветривания; коматииты; Фенноскандинавский щит.

**S. Yu. Chazhengina, A. V. Bakaeva, Z. P. Rybnikova, P. V. Medvedev,
S. A. Svetov. MICROFOSSILS FROM RELICT MESOARCHEAN PALEOSOL
DEVELOPED ON KOMATIITES FROM KOIKARY AREA, CENTRAL KARELIA**

Relics of the paleosol of Mesoarchean age (3000–2930 Ma) developed on tuffs and lavas of komatiites from Koikary Area (Central Karelia) were studied. Microscopic tubular and spherical structures morphologically similar to fossilized remnants of microorganisms were found in the preserved part of the crust profile, represented by a layer of chloritite. The nature of these micro structures and the possibility of their interpretation as acidophilic bacteria inhabiting the land in the zone of chemical weathering of volcanic rocks are discussed.

Keywords: microfossils; Mesoarchean; paleosol; komatiites; Fennoscandian Shield.

Введение

Изучение появления, становления жизни на Земле и ранних стадий эволюции органического мира – одна из фундаментальных проблем современной науки. Ископаемые остатки микроорганизмов в древнейших породах являются единственными прямыми

свидетельствами этих процессов, которые позволяют получить информацию о начале эволюции жизни на планете. Познание ископаемой летописи микроорганизмов послужило толчком к выработке набора критериев для распознавания микробных окаменелостей. Полученный к настоящему времени целый спектр доказательств свидетельствует о том, что

микробная жизнь присутствовала на Земле в палеоархее около 3,5 млрд лет назад [Розен и др., 2006].

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). Современное состояние исследований этих находок и вопросы, связанные с их изучением, приведены в обзоре интернациональной группы исследователей [Tomescu et al., 2016]. В основном находки фоссилизированных микроорганизмов архейского возраста приурочены к аквальным морским обстановкам [Астафьева и др., 2011].

На территории Восточной Фенноскандии подобные реликты микроорганизмов были установлены, например, в кремнистых осадочных породах (хемогенных силицитах), приуроченных к нижней части разреза мезоархейской протоокеанической ассоциации и островодужному андезитовому комплексу Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Центральная Карелия) [Светов, Медведев, 2013], а также в палеопротерозойских подушечных лавах Суйсарской структуры (Центральная Карелия) [Astafieva et al., 2013] и в вулканогенно-осадочных породах Сортавальской структуры [Астафьева, 2017]. В континентальных условиях микрофоссилии имеют слабую сохранность, и поэтому их исследования малочисленны, а интерпретация неоднозначна [Розанов и др., 2008; Brasier, 2013].

Микроорганизмы играют важную роль в формировании коры выветривания. Современные методы, преимущественно сканирующей электронной микроскопии, свидетельствуют, что практически все влажные поверхности, по меньшей мере в верхних частях зоны гипергенеза, покрыты бактериальными биопленками [Fossil..., 2003]. Исследования древних отложений позволяют предположить, что в раннем докембрии ситуация была подобной, хотя четких данных о микробном заселении именно субаэральных поверхностей пока не установлено. Можно ли продолжить применение актуалистических моделей субаэрального выветривания за пределами возникновения оксигенированной атмосферы 2400 млн лет назад и появления краснокветов? Как влияла на состояние железа, индикатора окислительных условий, диссимиляторная железоредукция в анаэробных условиях? Все эти вопросы относятся

к области палеобиологии докембрия [Заварзин, Рожнов, 2010].

Коры выветривания архейского возраста являются практически единственными достоверными свидетельствами существования на Земле в криптозое континентальных фациальных обстановок. Изучение архейских кор выветривания в зеленокаменных поясах древнейших кратонов мира широко используется для определения физико-химических и климатических условий жизни на суше. Наиболее древние коры выветривания архейского возраста установлены для кратона Пилбара, Западная Австралия, с возрастом 3,4 млрд лет [Johnson et al., 2008], в супергруппе Понгола (Nsuzze Pongola), Южная Африка, с возрастом 2,96 млрд лет [Crowe et al., 2013], в структуре Кеотдхар, кратона Сингхбхум (Keonjhar, Singhbhum), Западная Индия, с возрастом 3,29–3,02 млрд лет [Bandopadhyay et al., 2010; Mukhopadhyay et al., 2014], в структуре Моунт Ро (Mount Roe), Западная Австралия, с возрастом 2,76 млрд лет [Macfarlane et al., 1994].

Из подобных объектов на территории Фенноскандинавского щита детально изучены архейские переотложенные коры выветривания, например, сформированные на гранитоидах Лехтинской структуры с возрастом 2,8 млрд лет (район оз. Воронье, устье р. Нижняя Охта) [Матреничев и др., 2011], на средних метавулканитах Хизоваарской зеленокаменной структуры (Сев. Карелия) с возрастом 2,8–2,7 млрд лет [Кожевников, 2000; Thurston, Kozevnikov, 2000], на кислых метавулканитах с возрастом 2,4 млрд лет в районе оз. Паанаярви (Сев. Карелия) [Алфимова и др., 2011]. Наиболее древние микрофоссилии из кор выветривания на территории Карелии установлены в основании охтинской серии Лехтинской структуры, морфология которых достаточно многообразна, однако преобладают одиночные нитевидные формы [Астафьева, Розанов, 2010, 2012].

В данной работе представлены результаты детального изучения микрофоссилий из реликта коры выветривания мезоархейского (3000–2930 млн лет) возраста, сформированной на туфах и лавах коматиитов в Койкарской структуре (Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Центральной Карелии) (рис. 1).

Материалы и методы

Для изучения микрофоссилий из коры выветривания, сформированной на туфах и лавах коматиитов, было проведено детальное картирование и сплошное бороздвое опробование

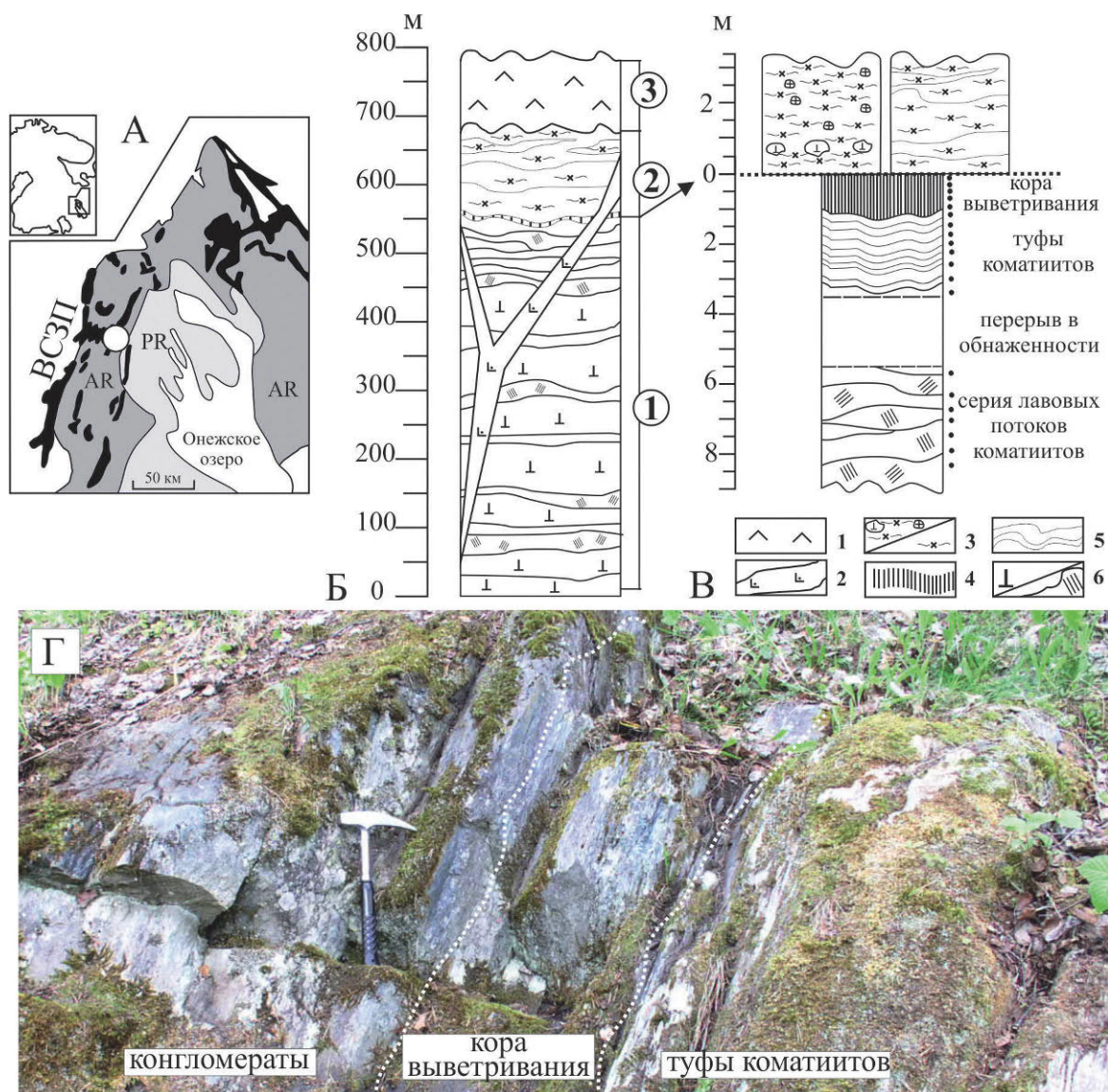


Рис. 1. Положение Койкарской структуры (показано окружностью) на Фенноскандинавском щите (А); стратиграфическое положение коры выветривания в общем разрезе Койкарской структуры [по: Светов, 2005] (Б) и детальное строение коры выветривания (В); фотография обнажения с изучаемым профилем выветривания (Г):

Б: 1 – коматиит-базальтовый, 2 – граувакковый, 3 – андезитовый комплексы. В: 1 – мезоархейская (~2,86 млрд лет) андезитовая ассоциация (лавы, туфы, внутриформационные осадки); 2 – дайки и субвулканические тела дацитов (2,935–2,927 млрд лет) с ксенолитами мафитовых граувакк и коматиитов; 3 – полимиктовые конгломераты с граувакковым цементом / граувакковый комплекс; 4 – кора выветривания; мезоархейская коматиитовая серия: 5 – туфы коматиитов; 6 – лавы коматиитов (массивные, подушечные, вариолитовые) в переслаивании с туфами и лавами базальтов / лавовые потоки коматиитов со спинифекс-структурами. Положение отобранных проб (показаны черными окружностями справа от колонки)

по профилю выветривания вкрест простираения. По профилю протяженностью около 8 м (рис. 1) было отобрано 20 проб, для которых проведено изучение минерального состава, выполнено определение содержания основных и примесных химических элементов.

Для поиска микрофоссилий методом электронной сканирующей микроскопии были исследованы свежие сколы образцов, отобранных по всему разрезу коры выветривания

(6 образцов), а также сколы туфов и лав коматиитов (2 образца).

Для исключения поверхностного загрязнения образцы, приготовленные непосредственно перед исследованием, выдерживались в течение 24 часов в серной кислоте (концентрация 40 %), а затем промывались в дистиллированной воде.

Непосредственно перед электронно-микроскопическим исследованием образцы

напылялись углеродом или золотом. Изучение морфологии и химического состава микрофоссилий, а также минералогического состава пород, как коры выветривания, так и туфов и лав коматиитов, было выполнено на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) при параметрах: W-катод, напряжение 20 кВ, время сканирования в стандартном режиме съемки 90 сек. Микроскопические исследования образцов проводились при использовании детекторов вторичных (SE) и обратнорассеянных (BSE) электронов. Компьютерная обработка микрозондовых анализов минералов осуществлялась с помощью программы «MINAL» (автор Д. В. Доливо-Добровольский).

Определение содержания петрогенных элементов в пробах выполнялось методом мокрой химии [Пономарев, 1961], концентрации редких и редкоземельных элементов измерялись на квадрупольном масс-спектрометре XSERIES 2 Terhmo Scientific по методике [Светов и др., 2015]. Все работы проводились в Аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

Результаты

Геохимическая и минералогическая характеристика реликта коры выветривания. Разрез коматиитовой серии Койкарской структуры (сформированный переслаиванием лав коматиитов и коматиитовых базальтов), детально описанный в работе [Светов, 2005], выполнен (снизу вверх): массивными лавами коматиитов, перекрываемых туфами, на которых непосредственно сформирована кора выветривания, представленная слоем хлорититов мощностью 0,7–0,9 м [Светова, Рыбаков, 1987; Светова, 1988] (рис. 1).

Выше по разрезу хлорититы перекрываются полимиктовыми конгломератами, в которых доминирующий цемент – мафитовая граувакка, и вулканомиктовыми и мафитовыми граувакками. В зависимости от области изучения коры выветривания (по простиранию) перекрывающий разрез представлен или мафитовыми граувакками или полимиктовыми конгломератами (рис. 1, В), смена перекрывающих ассоциаций наблюдается на участке максимальной сохранности коры выветривания, район оз. Питкилампи, где кора выветривания прослеживается на 350–400 м.

Слой хлорититов представляет собой мелкозернистую породу, на 90–95 % сложенную железистым клинохлором [Светова, Рыбаков, 1987]. Минеральный состав пород туфов и лав

коматиитов представлен преимущественно амфиболами и хлоритами. Среди амфиболов выделены две разновидности: роговая обманка $\text{Na}_{0.7}\text{Ca}_2(\text{Mg}_{3.2}\text{Fe}^{2+}_{1.2}\text{Fe}^{3+}_{0.3}\text{Al}_{0.4})[\text{Si}_{7.1}\text{Al}_{0.9}\text{O}_{22}](\text{OH})_2$ и актинолит $(\text{Ca}_2)(\text{Mg}_{3.7}\text{Fe}^{2+}_{0.9}\text{Fe}^{3+}_{0.4}\text{Al}_{0.3})[\text{Si}_{7.8}\text{O}_{22}](\text{OH})_2$. Роговая обманка сохраняется в виде реликтов в ядрах крупных зерен амфиболов и замещается актинолитом. Это минеральное преобразование сопровождается выносом щелочных элементов (натрия) и алюминия в процессе метаморфических реакций, характерных для условий зеленосланцевой-эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма, установленных ранее для мафитовых комплексов Койкарской структуры [Володичев и др., 2002].

Хлориты из туфов и лав коматиитов, также как и из коры выветривания, представлены преимущественно железистым клинохлором, и это свидетельствует, что процесс хлоритизации вследствие метаморфических преобразований протекал уже после формирования коры выветривания.

Акцессорные минералы всего профиля выветривания (как коры выветривания, так и туфов и лав коматиитов) представлены титанитом с включениями рутила и ильменита, а также апатитом и в редких случаях цирконом. Для лав коматиитов в качестве акцессорного минерала установлен также хроммагнетит. Титанит в изучаемых породах всего разреза встречается преимущественно в виде зерен неправильной формы и имеет включения рутила, идентифицированного по данным рамановской спектроскопии, и ильменита. Апатит в лавах коматиитов представлен ксеноморфными, реже идиоморфными зернами размером 20×40 мкм, в туфах коматиитов и коре выветривания размер зерен уменьшается до 5×15 мкм и установлены только ксеноморфные формы.

Анализ изменения содержания петрогенных элементов показал, что породы коры выветривания (хлорититы) характеризуются повышенным содержанием (в вес. %) Al_2O_3 ($22,6 \pm 0,1$), FeO_{tot} ($19,8 \pm 0,4$) и TiO_2 ($1,3 \pm 0,8$) по сравнению с подстилающими их туфами и лавами коматиитов (рис. 2). В коре выветривания наблюдается уменьшение концентрации (в вес. %) SiO_2 ($30,9 \pm 0,3$), щелочных и щелочноземельных элементов ($\text{Na}_2\text{O} = 0,02 \pm 0,01$; $\text{K}_2\text{O} = 0,01 \pm 0,005$; $\text{CaO} = 1,2 \pm 0,1$), что является характерным признаком химического выветривания (рис. 2).

Хлорититы существенно обогащены редкоземельными элементами ($\Sigma_{\text{REE}} = 39$ ppm) по сравнению туфами ($\Sigma_{\text{REE}} = 10$ ppm) и лавами ($\Sigma_{\text{P39}} = 15$ ppm) коматиитов. Топология спектров распределения редкоземельных элементов

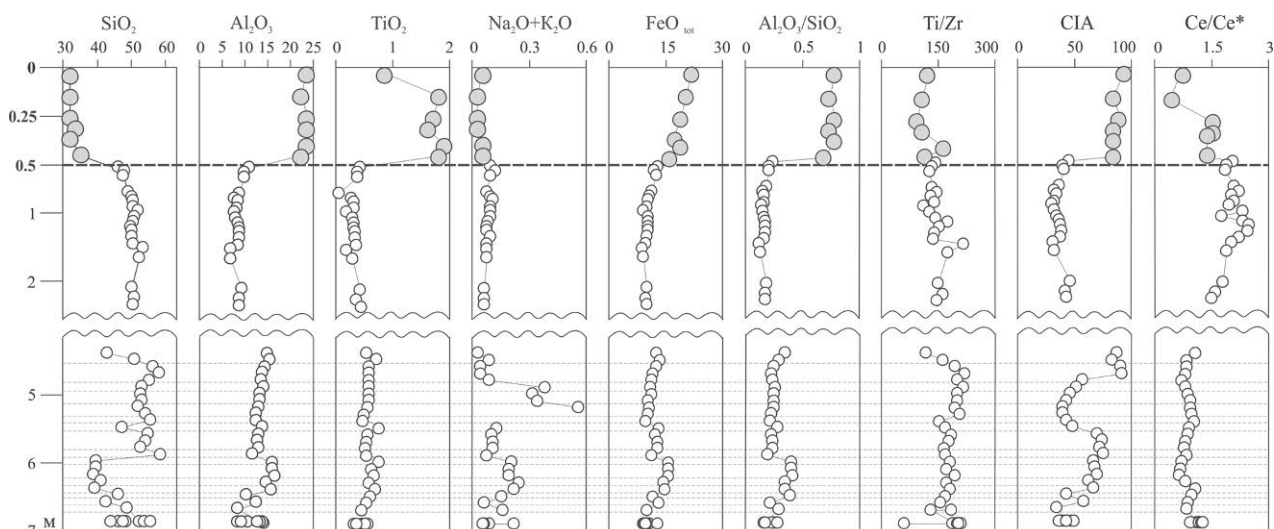


Рис. 2. Изменение химического состава пород (окислы в вес. %) по профилю выветривания

От 0 до 0,5 м – кора выветривания; от 0,5 до 2,5 м – туфы коматиитов; 4,5–7 м – массивные лавы коматиитов. Коэффициенты рассчитаны как: $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) * 100$, по молекулярным количествам, содержание CaO учитывается только для силикатных минералов [Nesbitt, Young, 1982]; $Ce/Ce^* = 3 * Ce_n / (2 * La_n + Nb_n)$ (нормировано по хондриту [McDonough, Sun, 1995])

(РЗЭ) коры выветривания подобна спектрам распределения РЗЭ в туфах и лавах коматиитов [Бакаева и др., 2017]. Туфы и лавы коматиитов незначительно обогащены легкими РЗЭ ($\Sigma_{LREE} / \Sigma_{HREE} = 1,2-1,4$), для хлорититов коры выветривания доля тяжелых РЗЭ незначительно возрастает ($\Sigma_{LREE} / \Sigma_{HREE} = 1,1$).

Микрофоссилии. В результате детального электронно-микроскопического и микрозондового исследования коры выветривания Койкарской структуры были выявлены микроскопические образования двух разновидностей. Одна из них представляет собой сферические образования диаметром до 40 мкм (рис. 3, а, б), которые могут быть интерпретированы как псевдоморфозы фоссилизированных оболочек коккоидных микроорганизмов. Вторая разновидность представлена деформированными переплетающимися нитчатыми (диаметром 2–3 мкм) и трубчатыми (диаметром 6–8 мкм) образованиями (рис. 3, в, г), возможно, представляющими собой фоссилизированные нити и чехлы микроорганизмов.

Химический состав выявленных сферических и трубчатых образований (псевдоморфозы микрофоссилий) характеризуется наличием углерода, повышенным содержанием фосфора и воды по сравнению с вмещающей породой (рис. 4). Такие особенности состава позволяют нам предположить, что установленные микрофоссилии представляют собой псевдоморфозы хлорита по оболочкам микроорганизмов, в состав которых входили органические

соединения. В образцах туфов и лав коматиитов микрофоссилии установлены не были.

Обсуждение

Выявление и изучение древних кор выветривания имеет большое значение для стратиграфических и палеогеографических реконструкций, а также для изучения ранних архейских форм жизни. Одновременно идентификация древних кор выветривания (особенно архейских) является нетривиальной задачей, которая осложняется тем, что материал кор выветривания может быть переотложен при физико-химическом выветривании или транспортирован при последующих тектонических процессах, что приводит к разрушению или частичному нарушению первичного профиля коры. Кроме того, в результате наложенных метаморфических процессов может происходить частичное (или полное) изменение минерального состава продуктов выветривания.

В настоящее время для идентификации древних кор выветривания используется ряд текстурных, геохимических и минералогических критериев [Rye, Holland, 1998], включающий в себя в том числе и наличие комплекса фоссилизированных микроорганизмов, участвующих в процессе выветривания. Признаки, характерные для древних кор выветривания, установлены нами для изучаемого слоя хлорититов, сформированного на туфах коматиитов Койкарской структуры:

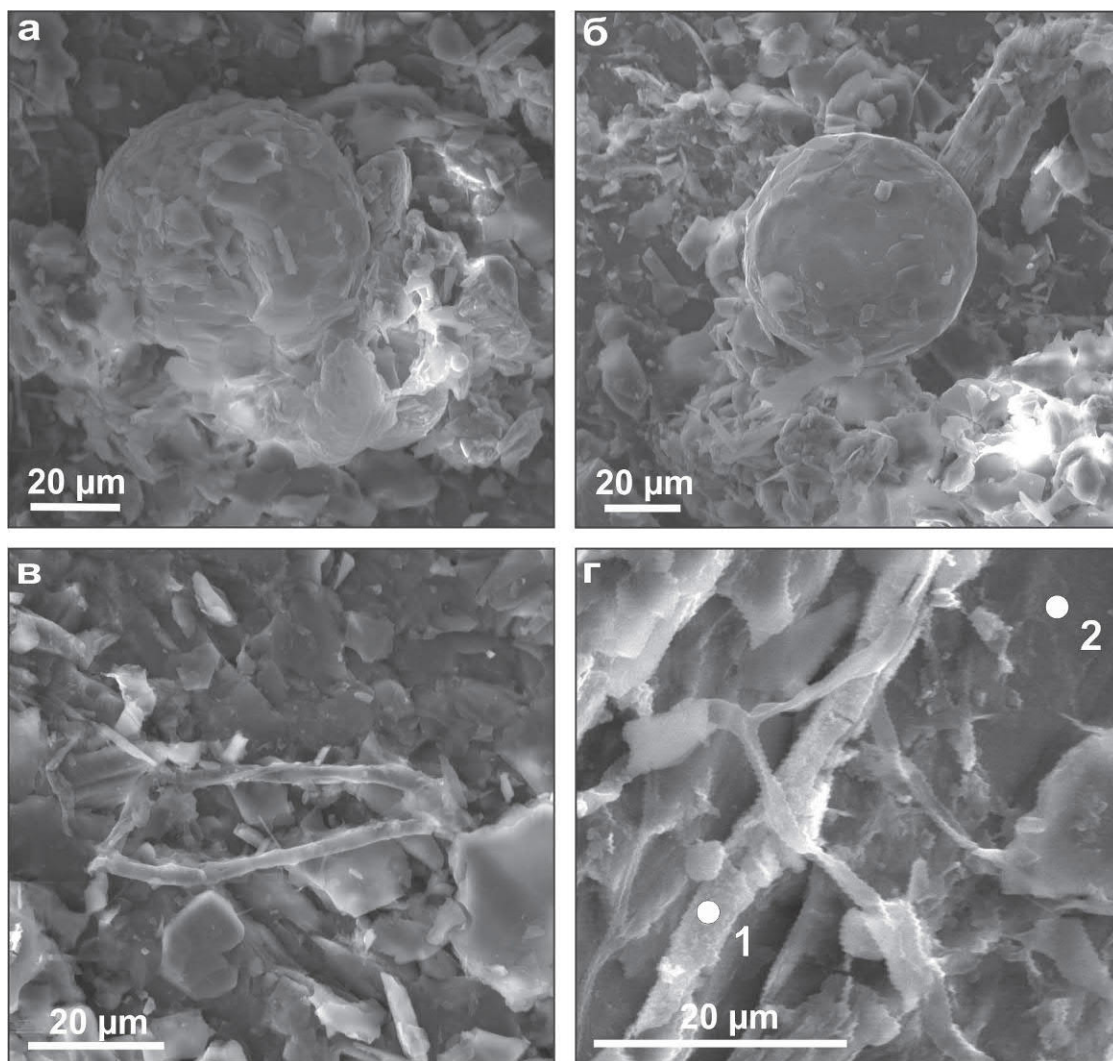


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения (детектор рассеянных электронов) микрообразований, выявленных в мезоархейской коре выветривания коматиитов Койкарской структуры:

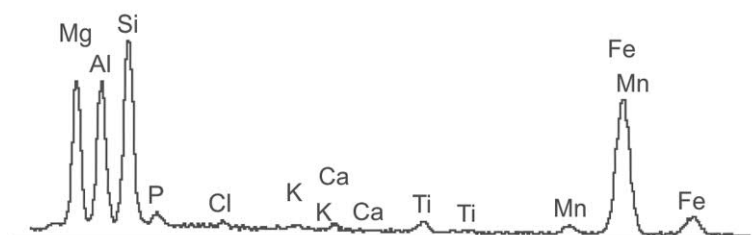
а, б – сферические образования диаметром до 40 мкм, вероятно, фоссилизированные оболочки коккоидных микроорганизмов; в, г – минерализованные трубчатые структуры диаметром до 5 мкм, вероятные чехлы нитчатых микроорганизмов

- индекс химического выветривания CIA [Nesbitt, Young, 1982], рассчитанный для хлорититов, составляет до 91 ± 1 , тогда как для неизмененных в процессе выветривания лав и туфов коматиитов индекс CIA составляет 46 ± 3 и 37 ± 5 соответственно. Высокие значения CIA отражают высокую интенсивность химического выветривания мафитов, что также подтверждается высокими значениями алюмосиликатного ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) модуля ($0,73 \pm 0,01$), свидетельствующего об интенсивном глинообразовании;
- соотношения маломобильных элементов, например Ti/Zr, имеют близкие значения для хлорититов (122 ± 5) и туфов коматиитов (137 ± 21) и, следовательно, соответствуют критерию остаточных кор выветривания,

для которых вариации этого индекса не должны превышать 40% [Maynard, 1992; Rye, Holland, 1998]. Эти данные наряду с отсутствием корреляции Ti/Zr с индексом CIA (коэффициент корреляции составляет $-0,28$ и $-0,07$ для хлорититов и туфов коматиитов соответственно), а также близкие значения содержания MgO и MnO свидетельствуют о том, что источником формирования коры выветривания являлись породы коматиитовой серии;

- дополнительным свидетельством генетической взаимосвязи коры выветривания и туфов и лав коматиитов является стабильность состава и морфологии акцессорных минералов по всему разрезу, например титанита. При этом наблюдается увеличение

1



2



Рис. 4. Химический состав трубчатых микрофоссилий (1) и вмещающих пород – хлорититов (2), выявленных в мезоархейской коре выветривания коматиитов Койкарской структуры. Локализация точек анализа указана на рис. 3, г

- содержания TiO_2 в хлорититах коры выветривания. Отметим, что титанит по всему разрезу имеет характерные включения ильменита и рутила, однако размер зерен титанита в хлорититах уменьшается, вероятно, из-за разрушения в процессе выветривания;
- одним из характерных признаков древних и современных кор выветривания является их обогащение РЗЭ в процессе выветривания, тогда как аутигенные глинистые минералы содержат меньше РЗЭ по сравнению с породами субстрата и элювиальной зоны [Nesbitt, 1992; Алфимова и др., 2011]. Общее содержание РЗЭ в хлорититах превышает их содержание в туфах и лавах коматиитов, что соответствует характеру перераспределения РЗЭ в процессе выветривания;
 - гомогенный минеральный состав коры выветривания (хлорититов), близкий к мономинеральному, и отсутствие обломочного материала являются признаками того, что формирование хлорититов не сопровождалось привнесением терригенного материала.

Это позволяет нам предположить, что данные породы, вероятнее всего, образовались в процессе химического выветривания, а не осадконакопления;

- минеральный состав хлорититов представлен в основном железистым клинохлором, а присутствие в составе коры выветривания относительно высокоглиноземистых разновидностей хлорита может свидетельствовать о первично латеритной природе исходных глин [Геологический..., 2010].
- в коре выветривания были установлены две разновидности микрофоссилий, тогда как в туфах и лавах коматиитов микрофоссилии не были обнаружены.

Таким образом, полученные данные позволяют нам интерпретировать исследованный слой хлоритита, залегающий на туфах коматиитов Койкарской структуры, как сохранный фрагмент (реликт) древней мезоархейской коры выветривания мафитов. Кроме того, в процессе исследования не были выявлены такие признаки древних кор выветривания,

как постепенный переход от пород субстрата к коре выветривания, наличие зоны дезинтеграции субстрата и внутренняя зональность коры выветривания. Это, вероятно, связано прежде всего с небольшой мощностью (около 1 м) сохраненного реликта первичной коры, которая, несомненно, ранее имела значительно большую мощность (>100 м). Косвенным свидетельством данного обстоятельства является наличие выше по разрезу мощного грауваккового парагенеза, интерпретируемого нами, по геохимическим данным, как сформированный в результате переработки и переотложения первичной коры выветривания. Вместе с тем изучаемая территория (район оз. Питкилампи) подвергнута влиянию сдвиговой тектоники, которая проявлена в формировании крупной shear-зоны [Светов и др., 2016]), что делает реальным тектоническое смещение отдельных фрагментов разреза мафитов, в том числе изучаемого нами горизонта, по отношению к исходному коматиитовому разрезу.

Ранее предполагалось [Корякин, 1975], что на территории Фенноскандинавского щита древние коры выветривания, сформированные в архее и протерозое, имели площадной региональный характер распространения, и это предположение является дискуссионным. Данные по уже обнаруженным и изученным корам выветривания архейского возраста постоянно обновляются. Отмечается, что в изученных разрезах (наиболее полно сохранившихся на территории Карелии) раннедокембрийских кор выветривания выделяется карбонатная зона, следующая за зоной дезинтеграции, и глинистая зона, соответствующая наиболее выветренной части коры [Алфимова, Матреничев, 2006].

Вне зависимости от состава и степени химического преобразования пород субстрата главными новообразованными минералами остаточных кор выветривания раннего докембрия являются глинистые минералы группы смектита и иллита, которые в процессе метаморфизма преобразовывались в хлориты [Алфимова, Матреничев, 2006].

Геохимические исследования [Бакаева и др., 2017] реликта коры выветривания, сформированной на туфах и лавах коматиитов Койкарской структуры, показали, что изменение состава лав и туфов коматиитов в процессе выветривания соответствует тренду преобразования мафитов с формированием смектитов, а затем и каолинитов, в качестве конечного продукта выветривания. Близость состава и морфологии акцессорных минералов и близкие значения соотношений маломобильных элементов (индексы Ti/Zr и Ti/Al) также

являются косвенными свидетельствами в пользу того, что кора формировалась на породах, близких по составу к туфам коматиитов.

Таким образом, исследованный слой хлоритов может быть интерпретирован как редуцированная кора выветривания, сформированная, как и коматиит-базальтовая серия, ранее 2930 ± 2915 млн лет. Ее состав может быть использован для проведения палеореконокструкций окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий выветривания.

Выветренные породы, сформировавшиеся в условиях гумидного климата, характеризуются более высокими значениями CIA, чем образовавшиеся в аридных и гляциальных обстановках. Это обусловлено более интенсивным выносом щелочей и, вследствие этого, обогащением Al_2O_3 выветренных пород. Высокое значение CIA, определенное для коры выветривания, сформированной на коматиитах Койкарской структуры, свидетельствует о формировании этих отложений в условиях теплого гумидного климата. На диаграмме $(CaO + Na_2O + K_2O) - Al_2O_3 - (FeO_{tot} + MgO)$ [Nesbitt, 1992] тренд выветривания мезоархейских коматиитов совпадает с трендами изменения современных базальтов [Бакаева и др., 2017], что свидетельствует о субаэральных условиях формирования коры выветривания и преимущественно окислительных обстановках. Повышенное содержание железа в породах коры выветривания по сравнению с туфами и лавами коматиитов также, вероятно, свидетельствует в пользу окислительных обстановок.

Туфы коматиитов характеризуются незначительной положительной Ce-аномалией ($Ce/Ce^* = 1,4$), которая сглаживается в коре выветривания ($Ce/Ce^* = 1,1$), что, вероятно, связано с выносом церия в процессе выветривания. В отмечаемых нами окислительных обстановках это возможно лишь в кислых условиях. Полученные выводы согласуются с данными о существовании слабокислой среды и вероятных окислительных условий в экзогенных обстановках на территории Фенноскандинавского щита в архейское и палеопротерозойское время [Алфимова и др., 2011].

Таким образом, тренд модификации химического состава реликта коры выветривания и характер распределения РЗЭ в коре выветривания позволяют предположить, что ее формирование происходило в субаэральных обстановках гумидного и теплого климата при окислительных условиях.

Установленные в хлорититах Койкарской структуры микрофоссилии интерпретируются нами как фоссилизированные остатки

цианобактерий ацидофилов, живших в коре выветривания, сформированной на вулканогенных породах (туфах и лавах коматиитов) в условиях гумидного климата. Они характеризуются нитчатой и трубчатой морфологией, сходной с минерализованными фоссилиями микроорганизмов, обнаруженных в докембрийских корах выветривания на Фенноскандинавском щите, которые интерпретируются как остатки цианобактерий [Астафьева, Розанов, 2012].

Изотопно-геохимические исследования [Watanabe et al., 2000, 2004] состава органического вещества коры выветривания с возрастом 2,7–2,3 млрд лет на дунитах в Восточном Трансваале свидетельствуют о наличии цианобактериальных сообществ в профиле выветривания. По результатам СЭМ в составе микрофоссилий реликта мезоархейской коры выветривания Койкарской структуры также обнаружены признаки (следы) органических соединений, а именно: повышенное содержание фосфора и воды по сравнению с вмещающими породами.

Находки фоссилизированных остатков микробиоты в породах докембрийских кор выветривания на территории Карелии совместно с полученными данными по распределению редкоземельных элементов, свидетельствующими о кислых или слабокислых условиях выветривания, согласуются с предположением об ацидофильной природе микробиальных сообществ континентальных экосистем в раннем докембрии [Фелицын и др., 2010]. Отметим, что в хемогенных силицитах и доломитах этой же структуры (Койкары) ранее были найдены остатки микроорганизмов, приуроченные к морским бассейновым фациям того же мезоархейского временного уровня [Светов, Медведев, 2013; Медведев и др., 2014]. Таким образом, можно сделать вывод о существовании в мезоархее на территории Карелии как морских, так и континентальных обстановок с развитой микробиальной жизнью.

Выводы

Слой хлоритов, залегающий на туфах коматиитов Койкарской структуры Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, является реликтом первичной, не переотложенной коры выветривания, время формирования которой можно оценить как близкое к времени образования коматиит-базальтовой серии в интервале 3000–2930 млн лет.

Характер распределения макроэлементов и РЗЭ в коре выветривания и тренд модификации ее химического состава позволяет

заклучить, что формирование коры произошло в субэраляных условиях гумидного климата в окислительных обстановках и слабокислой среде.

В сохранившейся части профиля коры обнаружены микроскопические трубчатые и сферические образования, морфологически сходные с остатками микроорганизмов. Эти образования могут быть интерпретированы как фоссилизированные остатки цианобактерий ацидофилов, участвовавших в формировании континентальной коры выветривания на вулканогенных породах (коматиитовых базальтах и их туфах).

Полученные результаты свидетельствуют о существовании в мезоархее на территории Карелии развитой микробиальной жизни не только в морских, но и в континентальных обстановках.

Исследования выполнялись при частичной поддержке РФФИ, гранты 16-35-00268, 17-55-45005.

Литература

Алфимова Н. А., Матреничев В. А. Континентальное выветривание в раннем докембрии: особенности минеральных преобразований и состав гипергенных растворов // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 41. С. 518–529.

Алфимова Н. А., Фелицын С. Б., Матреничев В. А. Подвижность Се в экзогенных обстановках Балтийского щита 2.8–2.1 млрд лет назад: данные по корам выветривания и осадочным карбонатам // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 5. С. 1–13.

Астафьева М. М. Вулканогенно-осадочные породы сортавальской серии – среда обитания древнейших микроорганизмов // Палеонтологический журнал. 2017. № 1. С. 83–88. doi: 10.7868/S0031031X17010020

Астафьева М. М., Герасименко Л. М., Гелтнер А. Р., Жегалло Е. А., Жмур С. И., Карпов Г. А., Орлеанский В. К., Пономаренко А. Г., Розанов А. Ю., Сумина Е. Л., Ушатинская Г. Т., Хувер Р., Школьник Э. Л. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.

Астафьева М. М., Розанов А. Ю. Древнейшие коры выветривания и микрофоссилии (на примере Карелии) // Палеопочвы и индикаторы континентального выветривания в истории биосферы. Сер. Гео-биологические системы в прошлом. М.: ПИН РАН, 2010. С. 10–22.

Астафьева М. М., Розанов А. Ю. Древние коры выветривания как среда обитания наземной биоты // Ранняя колонизация суши. Сер. Гео-биологические системы в прошлом. М.: ПИН РАН, 2012. С. 57–68.

Бакаева А. В., Чаженгина С. Ю., Светов С. А. Реликт мезоархейской коры выветривания коматиитов Койкарской структуры (Центральная Карелия)

// Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62, № 2. С. 119–140. doi: 10.21638/11701/spbu07.2017.201

Володичев О. И., Кулешевич Л. В., Кузенко Т. И. Эндеогенные режимы метаморфизма в различных геодинамических обстановках докембрия Карелии. Рукописный научный отчет. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 187 с.

Геологический словарь / Ред. О. В. Петров. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. Т. 1. 267 с.

Заварзин Г. А., Рожнов С. В. Выветривание и палеопочвы // Палеопочвы и индикаторы континентального выветривания в истории биосферы / Ред. С. В. Рожнов, В. А. Демкин. Сер. Гео-биологические процессы в прошлом. М.: ПИН РАН, 2010. С. 4–9.

Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 223 с.

Корякин А. С. Диагностические критерии метаморфизованной коры выветривания (на примере Центральной Карелии) // Докембрийские коры выветривания. М.: ВИМС, 1975. С. 28–33.

Матреничев В. А., Алфимова Н. А., Левченков О. А., Саватенков В. М., Беляцкий Б. В., Астафьева М. М., Макеев А. Ф., Яковлева С. З. Стратиграфия и изотопный возраст лопийского комплекса Лехтинской структуры, Северная Карелия // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. № 19. С. 3–25.

Медведев П. В., Светов С. А., Светова А. И. Реликты термофильной хемолитотрофной микробиоты в кремнистых породах архейского возраста (Центральная Карелия) // Труды КарНЦ РАН. 2014. № 1. С. 135–147.

Пономарев А. И. Методы химического анализа силикатных и карбонатных горных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 414 с.

Розанов А. Ю., Астафьева М. М., Вревский А. Б., Алфимова Н. А., Матреничев В. А. Микрофоссилии раннедокембрийских континентальных кор выветривания Фенноскандинавского щита // Отечественная геология. 2008. № 3. С. 83–90.

Розен О. М., Аббясов А. А., Аксаментова Н. В., Бреданова Н. В., Злобин В. Л., Мигдисо А. А., Сафронов В. Т., Толкачикова А. А., Трусов А. И., Чехович П. А., Ярошевский А. А. Седиментация в раннем докембрии: типы осадков, метаморфизованные осадочные бассейны, эволюция терригенных отложений. М.: Научный мир, 2006. 400 с.

Светов С. А. Магматические системы зоны перехода океан – континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 230 с.

Светов С. А., Иващенко В. И., Рыбникова З. П., Гоголев М. А., Назарова Т. Н. Неоархейская (2.60 млрд лет) реактивация сдвиговых зон и орогенных золоторудных систем в западном сегменте Волдозерского террейна // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 10. С. 1–18. doi: 10.17076/geo360

Светов С. А., Медведев П. В. Мезоархейские хемогенные силициты – уникальная среда сохранности ранней жизни // Литосфера. 2013. № 6. С. 3–13.

Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Рыбникова З. П., Михайлова А. И.,

Парамонов А. С., Утицына В. Л., Эхова М. В., Колодей В. С. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Светова А. И. Архейский вулканизм Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1988. 148 с.

Светова А. И., Рыбаков С. И. Архейская кора выветривания в осадочно-вулканогенных комплексах Койкарской структуры (Центральная Карелия) // Геология и петрология: Опер.-информ. материалы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1987. С. 10–15.

Фелицын С. Б., Алфимова Н. А., Матреничев В. А., Климова Е. В. Распределение редкоземельных элементов в палеопротерозойских корях выветривания Балтийского щита // Палеопочвы и индикаторы континентального выветривания в истории биосферы. Сер. Гео-биологические системы в прошлом. М.: ПИН РАН, 2010. С. 23–35.

Astafieva M. M., Chistyakov A. A., Bogina M. M., Sharkov E. V. Early Proterozoic Pillow Lavas of Suisari as Habitats of the Earliest Microorganisms // Paleontol. J. 2013. Vol. 47, no. 10. P. 1110–1115. doi: 10.1134/S0031030113100055

Bandopadhyay P. C., Eriksson P. G., Roberts R. J. A Vertic Paleosol at the Archean-Proterozoic Contact from the Singhbhum-Orissa Craton, Eastern India // Precamb. Res. 2010. Vol. 177, no. 3–4. P. 277–290. doi: 10.1016/j.precamres.2009.12.009

Brasier A. T. Archaean Soils, Lakes and Springs: Looking for Signs of Life / Eds. Y. Dilek, H. Furnes. Netherlands: Springer International Publishing. 2013. Vol. 7. P. 367–384. doi: 10.1007/978-94-007-7615-9_13

Crowe S. A., Døssing L. N., Beukes N. J., Bau M., Kruger S. J., Frei R., Canfield D. E. Atmospheric oxygenation three billion years ago // Nature. 2013. Vol. 501. P. 535–538. doi: 10.1038/nature12426

Fossil and Recent Biofilms. A natural history of life on Earth / Eds. W. E. Krumbein, D. M. Paterson, G. A. Zavarzin. Dordrecht: Kluwer Ac. Press, 2003. 482 p. doi: 10.1017/S0016756805260776

Johnson I. J., Watanabe Y., Yamaguchi K., Hama-saki H., Ohmoto H. Discovery of the oldest (~3.4 Ga) lateritic paleosols in the Pilbara Craton Western Australia // Geological Society of America Abstracts with Programs. 2008. Vol. 40, no. 6. 143 p.

Macfarlane A. W., Danielson A., Holland H. D. Geology and major and trace element chemistry of the late Archean weathering profiles in the Fortescue Group, Western Australia: Implications for atmospheric PO₂ // Precamb. Res. 1994. Vol. 65. P. 297–317. doi: 10.1016/0301-9268(94)90110-4

Maynard J. B. Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols // J. Geol. 1992. Vol. 100. P. 279–289. doi: 10.1086/629632

McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. Vol. 120. P. 223–253. doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4

Mukhopadhyay J., Crowley Q. G., Ghosh S., Ghosh G., Chakrabarti K., Misra B., Heron K., Bose S. Oxygenation of the Archean atmosphere: New paleosol

constraints from eastern India // *Geology*. 2014. Vol. 42, no. 10. P. 923–926. doi: 10.1130/G36091.1

Nesbitt H. W. Diagenesis and metasomatism of weathering profile, with emphasis on Precambrian paleosols / Eds. I. P. Martini, W. Chesworth. New York: Elsevier, 1992. P. 127–152. doi: 10.1016/B978-0-444-89198-3.50011-8

Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lithites // *Nature*. 1982. Vol. 299. P. 715–717. doi: 10.1038/299715a0

Rye R., Holland H. D. Paleosols and the Evolution of Atmospheric Oxygen: A Critical Review // *Am. J. Science*. 1998. Vol. 298, no. 8. P. 621–672. doi: 10.2475/ajs.298.8.621

Tomescu A. M. F., Klymiuk A. A., Matsunaga K. K. S., Bippus A. C., Shelton G. W. K. Microbes and the Fossil Record: Selected Topics in Paleomicrobiology / Ed. C. J. Hurst. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. P. 69–169. doi: 10.1007/978-3-319-28071-4_3

Thurston P. C., Kozevnikov V. N. An archean quartz arenite-andesite associations in the eastern Baltic Shield, Russia: implications for assemblage types and shield history // *Precamb. Res.* 2000. Vol. 101. P. 313–340. doi: 10.1016/S0301-9268(99)00093-5

Watanabe Y., Martini J. E. J., Ohmoto H. Geochemical evidence for terrestrial ecosystems 2.6 billion years ago // *Nature*. 2000. Vol. 408. P. 574–578. doi: 10.1038/35046052

Watanabe Y., Stewart B. W., Ohmoto H. Organic- and carbonate-rich soil formation ~2.6 billion years ago at Shagen, East Transvaal district, South Africa // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68, no. 9. P. 2129–2151. doi: 10.1016/j.gca.2003.10.036

Поступила в редакцию 04.07.2017

References

Alfimova N. A., Matrenichev V. A. Kontinental'noe vyvetrivanie v rannem dokembrii: osobennosti mineral'nykh preobrazovaniy i sostav gipergennykh rastvorov [Continental weathering in the Early Precambrian: the features of mineral transformations and the composition of hypergenic solutions]. *Litologiya i poleznye iskopaemye* [Lithology and Mineral Resources]. 2006. No. 41. P. 518–529.

Alfimova N. A., Felitsyn S. B., Matrenichev V. A. Podvizhnost' Ce v ekzogennykh obstanovkakh Baltiiskogo shchita 2.8–2.1 mlrd let nazad: dannye po koram vyvetrivaniya i osadochnym karbonatam [Ce mobility in exogenic conditions of the Baltic Shield 2.8–2.1 Ga: paleosols and sediment carbonates]. *Litologiya i poleznye iskopaemye* [Lithology and Mineral Resources]. 2011. No. 5. P. 1–13.

Astaf'eva M. M. Vulkanogenno-osadochnye porodny sortaval'skoi serii – sreda obitaniya drevneishikh mikroorganizmov [Volcano-sedimentary rocks of the Sortavala group: a habitat of ancient microorganisms]. *Paleontol. J.* 2017. No. 1. P. 83–88. doi: 10.7868/S0031031X17010020

Astaf'eva M. M., Gerasimenko L. M., Geptner A. R., Zhegallo E. A., Zhmur S. I., Karpov G. A., Orleanskii V. K., Ponomarenko A. G., Rozanov A. Yu., Sumina E. L., Ushatinskaya G. T., Khuver R., Shkol'nik E. L. Iskopaemye bakterii i drugie mikroorganizmy v zemnykh porodakh i astromaterialakh [Fossil bacteria and other microorganisms in terrestrial rocks and astromaterials]. Moscow: PIN RAN, 2011. 172 p.

Astaf'eva M. M., Rozanov A. Yu. Drevneishie kory vyvetrivaniya i mikrofosilii (na primere Karelii) [Paleosols and microfossils (the case of Karelia)]. *Paleopochvy i indikatory kontinental'nogo vyvetrivaniya v istorii biosfery. Ser. Geo-biologicheskie sistemy v proshlom* [Paleosols and Indicators of Continental Weathering in the History of Biosphere. Ser. Geo-Biological Systems in the Past]. Moscow: PIN RAN, 2010. P. 10–22.

Astaf'eva M. M., Rozanov A. Yu. Drevnie kory vyvetrivaniya kak sreda obitaniya nazemnoi bioty

[Paleosol as the environment of terrestrial biota]. *Rannaya kolonizatsiya sushy. Seriya Geo-biologicheskie sistemy v proshlom* [Early Colonization of Land. Ser. Geo-Biological Systems in the Past]. Moscow: PIN RAN, 2012. P. 57–68.

Bakaeva A. V., Chazhengina S. Yu., Svetov S. A. Relikt mezoarkheiskoi kory vyvetrivaniya komatiitov Koikarskoi struktury (Tsentral'naya Kareliya) [Relict of Meso-Archean paleosol developed on the komatiites from Koikary Area, Central Karelia]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle* [Proceed. of SpbSU. Earth Sciences]. 2017. Vol. 62, no. 2. C. 119–140. doi: 10.21638/11701/spbu07.2017.201

Felitsyn S. B., Alfimova N. A., Matrenichev V. A., Klimova E. V. Raspredelenie redkozemel'nykh elementov v paleoproterozoiskikh korakh vyvetrivaniya Baltiiskogo shchita [Distribution of rare-earth elements in the Palaeoproterozoic weathering crust of the Baltic Shield]. *Paleopochvy i indikatory kontinental'nogo vyvetrivaniya v istorii biosfery. Ser. Geo-biologicheskie sistemy v proshlom* [Paleosols and Indicators of Continental Weathering in the History of Biosphere. Ser. Geo-Biological Systems in the Past]. Moscow: PIN RAN, 2010. P. 23–35.

Geologicheskii slovar' [Geological dictionary]. Ed. O. V. Petrov. St. Petersburg: VSEGEI, 2010. Vol. 1. 267 p.

Kozhevnikov V. N. Arkheiskie zelenokamennye poyasa Karel'skogo kratona kak akkretsiionnye orogeny [Archean greenstone belts of the Karelian craton as accretionary orogens]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2000. 223 p.

Koryakin A. S. Diagnosticheskie kriterii metamorfizovannoi kory vyvetrivaniya (na primere Tsentral'noi Karelii) [Diagnostic criteria of metamorphosed weathering crust (the case of Central Karelia)]. Moscow: VIMS, 1975. P. 28–33.

Matrenichev V. A., Alfimova N. A., Levchenkov O. A., Savatenkov V. M., Belyatskii B. V., Astaf'eva M. M., Makeev A. F., Yakovleva S. Z. Stratigrafiya i izotopnyi vozrast lopiiskogo kompleksa Lekhtinskoi struktury,

Severnaya Kareliya [Stratigraphy and isotope age of the Lopi complex of the Lehtin structure, North Karelia]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya* [Stratigraphy. Geological Correlation]. 2011. No. 19. P. 3–25. doi: 10.1134/S0869593811050078

Medvedev P. V., Svetov S. A., Svetova A. I. Relikty termofil'noi khemolitotrofnoi mikrobioty v kremnistykh porodakh arkheiskogo vozrasta (Tsentral'naya Kareliya) [Relics of thermophilic chemolithotrophic microbiota in siliceous rocks of the Archaean age (Central Karelia)]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. of KarRC of RAS]. 2014. No. 1. P. 135–147.

Ponomarev A. I. Metody khimicheskogo analiza silikatnykh i karbonatnykh gornyykh porod [Methods of chemical analysis of silicate and carbonate rocks]. Moscow: AN SSSR, 1961. 414 p.

Rozanov A. Yu., Astaf'eva M. M., Vrevskii A. B., Alfimova N. A., Matrenichev V. A. Mikrofosilii ranne-dokembriiskikh kontinental'nykh kor vyvetrivaniya Fennoskandinavskogo shchita [Microfossils of the Early Precambrian continental weathering crusts of the Fennoscandian shield]. *Otechestvennaya geologiya* [National Geology]. 2008. No. 3. P. 83–90.

Rozen O. M., Abbyasov A. A., Aksamentova N. B., Bredanova N. B., Zlobin V. L., Migdisov A. A., Safonov V. T., Tolkachikova A. A., Trusov A. I., Chehovich P. A., Yaroshevsky A. A. Sedimentatsiya v rannem dokembrii: tipy osadkov, metamorfizovannye osadochnyye basseiny, evolyutsiya terrigenykh otlozhenii [Sedimentation in the Early Precambrian: types of precipitation, metamorphosed sedimentary basins, evolution of terrigenous deposits]. Moscow: Nauchuy mir, 2006. 400 p.

Svetov S. A. Magmaticheskie sistemy zony perekhoda okean – kontinent v arkhee vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita [Magmatic systems of the ocean-continent transition zone in the Archaean of the eastern part of the Fennoscandian shield]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2005. 230 p.

Svetov S. A., Ivashchenko V. I., Rybnikova Z. P., Gogolev M. A., Nazarova T. N. Neoarkheiskaya (2.60 mlrd let) reaktivatsiya sdvigovykh zon i orogennykh zolotorudnykh sistem v zapadnom segmente Vodlozerskogo terreina [Neo-Archaean (2.60 billion years) reactivation of shear zones and orogenic gold ore systems in the western segment of the Vodlozero terrain]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. of KarRC of RAS]. 2016. No. 10. P. 1–18. doi: 10.17076/geo360

Svetov S. A., Medvedev P. V. Mezoarkheiskie khemogennyye silitsity – unikal'naya sreda sokhrannosti rannei zhizni [The Mesoarchean chemogenic silicites – a unique environment of early life preservation]. *Litosfera* [Lithosphere]. 2013. No. 6. P. 3–13.

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhailova A. I., Paramonov A. S., Utiysyna V. L., Ekhova M. V., Kolodei V. S. Pretsizionnyi (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornyykh porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezul'tatov na primere rannedokembriiskikh mafitovykh kompleksov [Precise (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock composition and minerals: a technique and assessment of results accuracy by the example of the Early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans.

of KarRC of RAS]. 2015. No. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Svetova A. I. Arkheiskii vulkanizm Vedlozersko-Segozerskogo zelenokamennogo poyasa Karelii [The Archaean volcanism of the Vedlozero-Segozero greenstone belt of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1988. 148 p.

Svetova A. I., Rybakov S. I. Arkheiskaya kora vyvetrivaniya v osadochno-vulkanogennykh kompleksakh Koikarskoi struktury (Tsentral'naya Kareliya) [The Archaean weathering crust in sedimentary-volcanogenic complexes of the Koikarskaya structure (Central Karelia)]. *Geologiya i petrologiya* [Geology and Petrology]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1987. P. 10–15.

Volodichev O. I., Kuleshevich L. V., Kuzenko T. I. Endogennyye rezhimy metamorfizma v razlichnykh geodinamicheskikh obstanovkakh dokembriya Karelii [Endogenous metamorphism regimes in various geodynamic settings of the Precambrian of Karelia]. Rukopisnyi nauchnyi otchet [Hand-written Scientific Report]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2002. 187 p.

Zavarzin G. A., Rozhnov S. V. Vyvetrivanie i paleopochvy [Weathering and paleosols]. *Paleopochvy i indikatory kontinental'nogo vyvetrivaniya v istorii biosfery* [Paleosols and Indicators of Continental Weathering in the History of Biosphere]. Ser. *Geo-biologicheskie protsesy v proshlom* [Ser. Geo-Biological Systems in the Past]. Moscow: PIN RAN, 2010. P. 4–9.

Astaf'eva M. M., Chistyakov A. A., Bogina M. M., Sharkov E. V. Early Proterozoic Pillow Lavas of Suisari as Habitats of the Earliest Microorganisms. *Paleontol. J.* 2013. Vol. 47, no. 10. P. 1110–1115. doi: 10.1134/S0031030113100055

Bandopadhyay P. C., Eriksson P. G., Roberts R. J. A Vertic Paleosol at the Archaean-Proterozoic Contact from the Singhbhum-Orissa Craton, Eastern India. *Precam. Res.* 2010. Vol. 177, no. 3–4. P. 277–90. doi: 10.1016/j.precamres.2009.12.009

Brasier A. T. Archaean Soils, Lakes and Springs: Looking for Signs of Life. *Evolution of Archaean Crust and Early Life. Modern Approaches in Solid Earth Sciences.* Netherlands: Springer Int. Publ., 2013. Vol. 7. P. 367–384. doi: 10.1007/978-94-007-7615-9_13

Crowe S. A., Døssing L. N., Beukes N. J., Bau M., Kruger S. J., Frei R., Canfield D. E. Atmospheric oxygenation three billion years ago. *Nature.* 2013. Vol. 501. P. 535–538. doi: 10.1038/nature12426

Fossil and Recent Biofilms. A natural history of life on Earth. Dordrecht: Kluwer Ac. Press. 2003. 482 p. doi: 10.1017/S0016756805260776

Johnson I. J., Watanabe Y., Yamaguchi K., Hama-saki H., Ohmoto H. Discovery of the oldest (~3.4 Ga) lateritic paleosols in the Pilbara Craton Western Australia. *Geological Society of America Abstracts with Programs.* 2008. Vol. 40, no. 6. 143 p.

Macfarlane A. W., Danielson A., Holland H. D. Geology and major and trace element chemistry of the late Archaean weathering profiles in the Fortescue Group, Western Australia: Implications for atmospheric PO₂. *Precam. Res.* 1994. Vol. 65. P. 297–317. doi: 10.1016/0301-9268(94)90110-4

Maynard J. B. Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. *J. Geol.* 1992. Vol. 100. P. 279–289. doi: 10.1086/629632

McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth. *Chemical geology*. 1995. Vol. 120. P. 223–253. doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4

Mukhopadhyay J., Crowley Q. G., Ghosh S., Ghosh G., Chakrabarti K., Misra B., Heron K., Bose S. Oxygenation of the Archean atmosphere: New paleosol constraints from eastern India. *Geology*. 2014. Vol. 42, no. 10. P. 923–926. doi: 10.1130/G36091.1

Nesbitt H. W. Diagenesis and metasomatism of weathering profile, with emphasis on Precambrian paleosols. New York: Elsevier, 1992. P. 127–152. doi: 10.1016/B978-0-444-89198-3.50011-8

Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lithites. *Nature*. 1982. Vol. 299. P. 715–717. doi: 10.1038/299715a0

Rye R., Holland H. D. Paleosols and the Evolution of Atmospheric Oxygen: A Critical Review. *Am. J. Science*. 1998. Vol. 298, no 8. P. 621–672. doi: 10.2475/ajs.298.8.621

Tomescu A. M. F., Klymiuk A. A., Matsunaga K. K. S., Bippus A. C., Shelton G. W. K. Microbes and the Fossil Record: Selected Topics in Paleomicrobiology. *Their World: A Diversity of Microbial Environments, Advances in Environmental Microbiology*. Switzerland: Springer Int. Publ., 2016. P. 69–169. doi: 10.1007/978-3-319-28071-4_3

Thurston P. C., Kozevnikov V. N. An archean quartz arenite-andesite associations in the eastern Baltic Shield, Russia: implications for assemblage types and shield history. *Precam. Res.* 2000. Vol. 101. P. 313–340. doi: 10.1016/S0301-9268(99)00093-5

Watanabe Y., Martini J. E. J., Ohmoto H. Geochemical evidence for terrestrial ecosystems 2.6 billion years ago. *Nature*. 2000. Vol. 408. P. 574–578. doi: 10.1038/35046052

Watanabe Y., Stewart B. W., Ohmoto H. Organic- and carbonate-rich soil formation ~2.6 billion years ago at Shagen, East Transvaal district, South Africa. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68, no. 9. P. 2129–2151. doi: 10.1016/j.gca.2003.10.036

Received July 04, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Чаженгина Светлана Юрьевна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: chazhengina@mail.ru

Бакаева Александра Владимировна

аспирант
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: sashe-ku@yandex.ru

Рыбникова Зоя Павловна

младший научный сотрудник
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: zoya_rybnikova@mail.ru

Медведев Павел Владимирович

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: pmedved@krc.karelia.ru

Светов Сергей Анатольевич

врио директора, руководитель лаб., д. г.-м. н.
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: ssvetov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Chazhengina, Svetlana

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: chazhengina@mail.ru

Bakaeva, Alexandra

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: sashe-ku@yandex.ru

Rybnikova, Zoya

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: zoya_rybnikova@mail.ru

Medvedev, Pavel

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

Svetov, Sergey

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru