

УДК 552.514: 550.4 + 551.71

МАТРИКС ПОЛИМИКТОВЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ НЕОАРХЕЙСКОГО МОЛАССОИДНОГО БАСЕЙНА КОЙКАРСКОГО ДОМЕНА: ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ИСТОЧНИКИ МАТЕРИАЛА

А. В. Бакаева

Институт геологии Карельского научного центра РАН, ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

Приводятся результаты петрографического и геохимического изучения цемента неоархейских полимиктовых конгломератов молассоидного комплекса в районе оз. Питкилампи Койкарского домена (центральная часть Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса). Установлен неоднородный состав цемента конгломератов по разрезу, представленному чередованием мафитовых, лититовых граувакк и граувакковых песчаников. Матрикс по геохимическим характеристикам подобен подстилающим молассоидный комплекс коматиитам и туфам коматиитов, имеет примесь кислого (дацитового) терригенного компонента, что свидетельствует о полимодальном источнике первичного материала. Петрогенетические отношения (La/Y, Sc/Cr, Ti/Zr и La/Sc) в матриксе конгломератов демонстрируют геодинамическую приуроченность первичных пород к конвергентным системам «океан – островная дуга».

Ключевые слова: пулл-апарт; конгломераты; цемент; граувакки; неоархей; Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс; Койкарский домен; Карельский кратон.

A. V. Bakaeva. MATRIX-SUPPORTED POLYMICTIC CONGLOMERATES OF THE NEOARCHEAN MOLASSOID BASIN OF THE KOIKARY DOMAIN: GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS, SOURCES OF MATERIAL

The paper presents the results of petrographic and geochemical studies of the cement of Neoarchaeal polymictic conglomerates in the molassoid complex in the Lake Pitkilampi area of the Koikary domain (central part of the Vedlozero-Segozero greenstone belt). The composition of the cement of the conglomerates was found to vary across the profile, being represented by an alternation of mafic, lithite graywacke and graywacke sandstones. The geochemical characteristics of the matrix are similar to that of the komatiites and komatiitic tuffs underlying the molassoid complex. It has an admixture of an acidic (dacite) terrigenous component, which indicates a polymodal source of the primary material. Petrogenetic ratios (La/Y, Sc/Cr, Ti/Zr, and La/Sc) in the cement of the conglomerates demonstrate a geodynamic association of the primary rocks with convergent ocean – island arc systems.

Keywords: pull-apart; conglomerates; cement; graywackes; Neoarchaeal; Vedlozero-Segozero greenstone belt; Koikary domain; Karelian craton.

Введение

Изучение терригенных осадочных пород, приуроченных к древним зеленокаменным поясам, позволяет вносить значительные коррективы в существующие геодинамические модели их формирования, поскольку многие породные комплексы, формирующие зеленокаменные домены, ранее были разрушены в ходе их эволюции. Сведения об утраченных геологических событиях могут быть восстановлены лишь путем детального изучения осадочных пород.

На территории Карельского кратона в пределах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса установлен ряд молассоидных комплексов (точнее, их реликтов), локализованных в бассейнах пулл-апарт типа.

Структуры пулл-апарт типа в основном формируются в областях тектонических разломов в результате сдвиговых смещений вдоль главной оси и поперечных тектонических растяжений. Подобные структуры характеризуются ромбической формой и структурным изоморфизмом [Burchfiel, Stewart, 1966].

Широко известными примерами пулл-апарт бассейнов являются Долина Смерти в Калифорнии, Мраморное море в Турции, серия локальных бассейнов в Южных Альпах (Италия, бассейны Коллио, Прамолло) и многие другие [Burchfiel, Stewart, 1966; Bertoluzza, Perotti, 1997; Armijo et al., 2002].

В связи с тем, что весь терригенно-осадочный материал в основном поступает в бассейны при разрушении локальных источников, а цементирующая масса формируется за счет размыва подстилающих и вмещающих толщ, осадочные комплексы, накапливающиеся в подобных структурах, могут «маркировать» заключительный этап формирования структур (в случае Карельского кратона – финальный этап развития зеленокаменных комплексов в неогархее и переход к стадии стабилизации).

На Карельском кратоне инициальный этап формирования бассейнов пулл-апарт типа выделен в интервале 2,7–2,6 млрд лет в Хаутаваарском, Койкарском, Эльмусском и Остерском доменах Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса [Рыбаков, Светова, 1993; Светов и др., 2005]. Первые исследования молассоидных образований в Центральной Карелии проводились сотрудниками Института геологии КарНЦ РАН А. И. Световой и С. И. Рыбаковым на примере грубообломочных пород Хаутаваарского и Койкарского доменов, что позволило получить первичные данные по литологии и геохимии конгломератов [Светова, Рыбаков, 1987; Рыбаков, Светова, 1993].

Цель данной работы – оценка условий формирования неогархейских пулл-апарт бассейнов (на примере Койкарского домена) на основе изучения геохимии трасс-элементов в цементе (матриксе) конгломератов.

Идеологической основой работы является исследование М. Р. Бхатия и К. А. В. Крука [Bhatia, Crook, 1986] по характеристике вариаций микроэлементного состава терригенных пород Австралии и моделированию геодинамических режимов их формирования. В последние годы данные геохимические подходы неоднократно тестировались [Floyd, 1987; Smirnova et al., 2017], что дает апробированную методическую основу для выполнения работ.

Объекты исследования

Исследуемые неогархейские молассоидные комплексы, приуроченные к осадочному бассейну пулл-апарт типа, локализованы на территории Карельского кратона в центральной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (ВСЗП). Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс шириной 50–60 км протягивается в субмеридиональном направлении на расстояние 300 км, в его составе выделяют ряд зеленокаменных доменов: Хаутаваарский, Койкарский, Семченский, Эльмусский, Паласельгинский, Остерский, Бергаульский, Совдозерский, Киндасовский и Койкарский.

Койкарский домен находится в центральной части ВСЗП и сформирован двумя мезогархейскими страто-тектоническими ассоциациями: коматиит-базальтовой (3,0–2,9 млрд лет) и более молодой (2,86–2,84 млрд лет) андезит-дацит-риолитовой (АДР) серией. Мафитовый комплекс представлен массивными вариолитовыми дифференцированными лавовыми потоками коматиитов с тонкими прослоями туфового материала. Базальты перекрывают коматииты и чередуются (реже) с ними в разрезе. На верхней части коматиит-базальтовой серии сформирована кора выветривания, выше которой залегают продукты ее размыва и переотложения, граувакки с редкими линзами аркоз и гравелитов общей мощностью 200–230 м. Возраст коматиит-базальтовой ассоциации оценивается по цирконометрии секущих даек дацитов и находится в интервале 3,0–2,9 млрд лет [Светов, 2005].

АДР-серия перекрывает коматиит-базальтовую толщу и представлена андезитовыми вулканитами в ассоциации с вулканогенно-осадочными, терригенными (конгломераты, гравелиты, граувакки, аркозы) и хемогенными породами общей мощностью до 940 м [Светов, 2005].

Молассоидный комплекс. Неоархейский молассоидный комплекс Койкарского домена представлен полимиктовыми конгломератами, установленными в районе озера Питкилампи, западного берега озера Каллиеволампи, на водоразделе озер Яниш и Каллиеволампи.

Нижние слои молассоидной толщи выполнены базальными конгломератами, сформированными на размытой коре выветривания по коматиит-базальтовой ассоциации, продукты разрушения которой формируют матрикс пород (район оз. Питкилампи). На участке оз. Майлампи – оз. Калиеволампи конгломераты залегают на разрезе АДР-серии, что отражено в составе как обломков, так и цемента [Светова, 1988; Рыбаков, Светова, 1993].

Изучение галек и валунов конгломератов всего комплекса [Рыбаков, Светова, 1993; Светов и др., 2005] показало, что обломочный материал представлен следующими породами: 1) мафитами – гальками и мелкими валунами размером до 15 см коматиитов, базальтов, вариолитов, габбро и амфиболитов, доминирующих в нижней части разреза молассоидной толщи; 2) средне-кислыми эффузивными породами, дацитами и риодацитами (известково-щелочной серии), выявленными в виде валунов размером до 25×7 см и галек <3 см; 3) средне-кислыми интрузивными породами, гранитами, плагиогранитами, гранит-порфирами, гранодиоритами, встреченными в наиболее крупных валунах и глыбах, размером до 1×0,5 м. Важно отметить, что детального изучения химического состава матрикса не проводилось.

В данной работе акцент исследования сделан на разрезе молассоидного комплекса в районе оз. Питкилампи, где он перекрывает мафиты. Мощность разреза подстилающей коматиит-базальтовой ассоциации на данном участке составляет 1000–1200 м, причем завершается разрез серией маломощных дифференцированных лавовых потоков, содержащих зоны кумулята, спинифекс-структур и линзы вариолитов [Светов, 2005], перекрываемых туфами коматиитов, по которым сформирована кора выветривания, представленная хлорититами.

Ранее автором проводилось изучение наиболее сохраненного реликта коры выветривания Койкарского домена, показавшее, что данные образования сформированы в результате интенсивного химического выветривания в субэвральном условиях [Бакаева и др., 2017]. Следующая выше коры выветривания пачка терригенных пород образована в результате смешения коматиитового материала и его производных (материала коры выветривания)

с вулканогенно-терригенным мафическим (коматиит-базальтовым) и кислым (андезит-дацитовым) материалом и представлена полимиктовыми конгломератами, сменяющимися на отдельных участках работ (в районе оз. Питкилампи) вулканогенными и мафитовыми граувакками.

Грубообломочные породы молассоидного бассейна формируют толщу мощностью от 80 до 230 м [Рыбаков, Светова, 1993], в которой переслаиваются полимиктовые конгломераты разного генезиса, характеризующиеся контрастным составом цемента и преобладающего кластического материала, в зависимости от типов пород, доминирующих в области эрозии.

Нижние горизонты полимиктовых конгломератов изучаемого участка работ характеризуются угловатыми, слабоокатанными обломками коматиит-базальтового состава, размером от первых сантиметров до 12–15 см, заключенных в базальный цемент, сформированный в результате размыва и разрушения коры выветривания. Выше по разрезу меняется характер обломков и тип цемента. На смену угловатым мафитовым кластам приходят более окатанные обломки основного и кислого состава (размером от 0,8 до 10 см), в то время как цемент меняется по составу от грауваккового песчаника (нижние горизонты разреза) до галечника и аркозового песчаника (в верхних частях разреза).

Методы исследования

Для проведения данной работы было выполнено опробование архейского молассоидного комплекса в районе озера Питкилампи (как кластического материала, так и цемента конгломератов) для петрографических и геохимических исследований. Всего было отобрано 14 проб обломков и 22 пробы цемента. Кроме того, в исследовании использованы петрографические и геохимические данные из ранних работ А. И. Световой [Рыбаков, Светова, 1993; Светова, 1988].

Петрографическое изучение пород осуществлялось с использованием поляризационного микроскопа «ПОЛАМ Р-312».

Определение содержания петрогенных элементов и CO_2 выполнено методом мокрой химии [Пономарев, 1961], концентрации редких и редкоземельных элементов измерялись на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2 (Thermo scientific, США) в Аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН (Петрозаводск) по методике [Светов и др., 2015].

Обсуждение результатов

Петрографическая характеристика цемента. Исследование показало, что в базальной части бассейна осадочные породы представлены мелкогалечной конглобрекцией. Обломки размером до 5–6 см выполнены слабоокатанными коматиитами и базальтами. Цемент конглобрекции состоит из перемытой коры выветривания (пробы 14–1, 14–2, 14–3, 14–4).

Выше по разрезу следует толща мелкогалечных конгломератов со средней степенью окатанности. Среди обломков преобладают породы кислого состава с более редкими гальками мафитов, размер галек варьирует от 2–3 до 8 см. Цемент конгломератов преимущественно базальный, в разрезе меняется от мелкообломочной лититовой граувакки с мелкими гальками дацитов, базальтов и коматиитов (проба 18-5b) к вулканомиктовой мафитовой граувакке с кристаллокластами плагиоклаза и реже кварца (проба 18-5с). Цемент имеет следующий минеральный состав (в об. %): хлорит (30–50), плагиоклаз (20), кварц (20), карбонат (5–10), эпидот, титанит, рудные минералы (1–2), структура (микро) лепидогранобластовая, с отдельными обломками зерен кварца и плагиоклаза размером до 2 мм.

Данную толщу перекрывают валунно-галечные конгломераты с окатанными (реже среднеокатанными) слабовытянутыми гальками магматических (коматиитовых базальтов, базальтов, реже дацитов) и метаморфических пород (амфиболитов и хлоритов) размером от 5 до 9 см. Цемент конгломератов базальный, местами контактовый, представлен вулканомиктовой мафитовой грауваккой с обломками зерен плагиоклаза и кварца. Структура лепидогранобластовая. Минеральный состав (в об. %): хлорит – 30, плагиоклаз – 25, кварц – 25, карбонат – 15, единичные зерна эпидота, титанита, магнетита (хроммагнетита) (пробы 18-2с, 18-2d, 18-2е). В верхней части толщи цемент выполнен лититовой грауваккой с мелкими гальками (до 8 см) основных пород. Структура цемента микролепидогранобластовая, микрофибробластовая (проба 18-2а). Минеральный состав цемента (в об. %): хлорит – 30, плагиоклаз – 25, кварц – 25, карбонат – 15, единичные зерна эпидота, титанита.

Вышезалегающие последовательности пород представлены мелко-среднегалечными рассланцованными конгломератами «лахарового типа». Гальки имеют вытянутую форму (размер 5–6 см), ориентированы по сланцеватости, состоят из основных и кислых пород.

Состав цемента неоднороден, представлен чередованием «слоев» грауваккового песчаника (проба 22-1а, 22-2b), вулканомиктовой мафитовой граувакки (проба 22-1с) и завершается лититовой грауваккой с обломками основных и кислых пород (пробы 22–3, 22–4). Основная масса цемента выполнена плагиоклаз-кварц-хлоритовым минеральным парагенезом и кристаллокластами плагиоклаза, кварца. Структура цемента лепидогранобластовая. Текстура сланцеватая, частично слоистая.

Таким образом, в результате петрографического изучения матрикса конгломератов по разрезу молассоидного комплекса установлено, что цемент имеет неоднородный состав: в разрезе выделяются три сменяющихся по вертикали типа цементирующего грауваккового материала – граувакковый песчаник, лититовая граувакка и вулканомиктовая мафитовая граувакка.

Петрохимическая характеристика. Классические архейские граувакки (архейские граувакки Канады, по: [Петтиджон, 1981]) характеризуются следующим уровнем содержания петрогенных компонентов (в мас. %): Al_2O_3 – 11–15, FeO – 1,5–7,6, MgO – 1,2–3,4, Na_2O – 1,6–4,9, при этом в породах отмечается преобладание Na_2O над K_2O , MgO над CaO, FeO над Fe_2O_3 .

Анализ содержания петрогенных элементов в граувакковом цементе полимиктовых конгломератов Койкарского домена (участок оз. Питкилампи) (рис. 1) показал, что концентрации SiO_2 и Al_2O_3 в породах изменяются несущественно (среднее значение $53,35 \pm 1,95$ и $16,42 \pm 1,32$ мас. % соответственно). Концентрация MgO варьирует от 7,63 до 11,16 (среднее значение $9,13 \pm 1,03$ мас. %), что свидетельствует о наличии мафического компонента в цементе конгломератов. Содержание Na_2O изменяется от 2,54 до 4,57 мас. % (Na_2O среднее = $3,44 \pm 0,62$ мас. %). Также отмечается, что содержание $Na_2O > K_2O$, MgO > CaO, FeO > Fe_2O_3 . Концентрация CaO в матриксе варьирует от 1,24 до 7,01 мас. % (среднее значение CaO – $4,23 \pm 1,78$ мас. %) (табл.).

Установлено, что содержание Al_2O_3 и MgO в изучаемых породах выше значений, характеризующих средний состав архейских граувак Канады [Петтиджон, 1981], при сохранении общей закономерности распределения петрогенных окислов, что, вероятно, маркирует в нашем случае преобладание мафитового (коматиитового) компонента, формирующего цемент и галечный материал конгломератов, за счет спецификации эродированных пород.

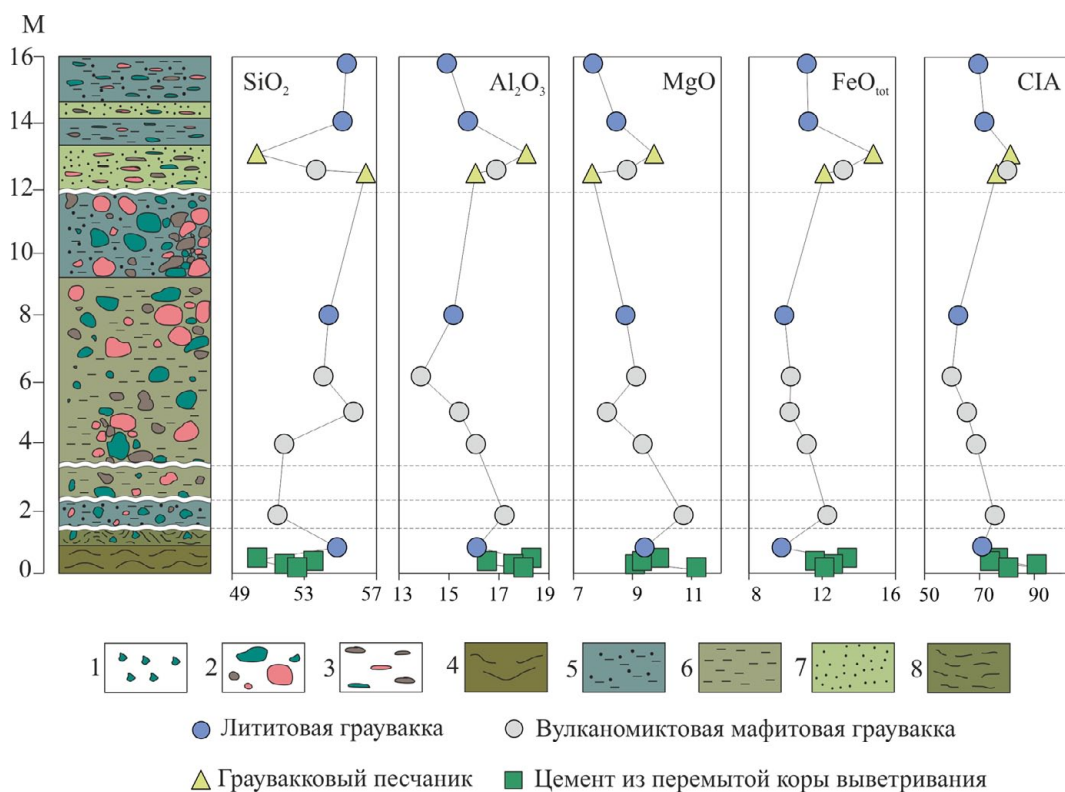


Рис. 1. Вариации распределения петрогенных элементов (окислы в массовых %) в граувакковом цементе полимиктовых конгломератов Койкарского домена и изменение индекса химического выветривания CIA. Значение CIA рассчитывалось по формуле (в молекулярных количествах) $Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$, содержание CaO^* учитывается только для силикатных минералов [Nesbitt, Young, 1982]

Условные обозначения к колонке: характеристика галек (1–3): 1 – мелкогалечная конглобрекция, 2 – валунно-галечный полимиктовый конгломерат, 3 – полимиктовые конгломераты «лахарового» типа; характеристика цемента (4–8): 4 – кора выветривания, 5 – литовая граувакка, 6 – вулканомиктовая мафитовая граувакка, 7 – граувакковый песчаник, 8 – цемент из перемытой коры выветривания

Fig. 1. Variations in the distribution of petrogenic elements (oxides in wt. %) in graywacke cement of polymictic conglomerates of the Koikary domain and the chemical weathering index (CIA). The value of CIA was calculated by the formula (in molecular quantities) of $Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$ [Nesbitt, Young, 1982]; CaO^* content is taken into account only for silicate minerals

Legend: characteristics of the pebbles (1–3): 1 – small conglobreccia, 2 – boulder-pebble polymictic conglomerate, 3 – polymictic conglomerates of "lahar" type; characteristics of cement (4–8): 4 – weathering crust, 5 – lithium graywacke, 6 – volcanomictic mafic graywacke, 7 – graywacke sandstone, 8 – cement from the resedimented weathering crust

Результаты петрографического и петрохимического изучения матрикса конгломератов позволяют отнести породы цемента к грауваккам, что подтверждается вариациями отношений Na_2O/K_2O и $\log (Na_2O/K_2O) / \log (SiO_2/Al_2O_3)$ (рис. 2).

Топология спектров распределения РЗЭ в цементе конгломератов во многом подобна спектрам распределения РЗЭ в туфах коматиитов (рис. 3), подстилающих молассоидный комплекс [Бакаева и др., 2017]. Это может быть результатом преобладания в цементе разрушенного вещества мафитового комплекса (коматиитов, туфов коматиитов) и продуктов их выветривания (хлорититов), что согласуется

с петрографическими наблюдениями. Вместе с тем общий повышенный уровень содержания РЭ и РЗЭ и таких маркерных элементов, как Zr, Sr, Rb и Ba, отражает существенный привнос кислого материала в бассейн осадконакопления.

Для цемента конгломератов был рассчитан индекс химического выветривания CIA (табл.; рис. 1), характеризующий суммарный процесс преобразования цемента конгломератов. Индекс CIA в цементе молассоидного комплекса Койкарского домена варьирует от 59,83 до 90,85 (при среднем значении 73,59), увеличиваясь синхронно с уменьшением зернистости цементирующего материала (в гравелитовом

Содержание петрогенных (мас. %), редких и редкоземельных элементов (ppm) в цементе полимиктовых конгломератов молассоидного комплекса Койкарского домена

Content of petrogenic oxides (wt %), rare and rare-earth elements (ppm) in the cement of polymictic conglomerates of the molassoid complex of the Koikary domain

Проба Sample	18-2a	18-2c	18-2d	18-2e	18-5c	22-1a	22-1c	22-2b	22-3	22-4	14-1	14-2	14-3	14-4
SiO ₂	54.35	54.06	55.72	51.89	51.52	56.41	53.65	50.37	55.13	55.36	50.39	51.91	53.51	52.61
TiO ₂	0.85	0.77	0.87	1.07	1.10	1.00	1.06	1.18	0.97	0.86	1.13	0.98	0.90	1.08
Al ₂ O ₃	15.18	13.88	15.40	16.07	17.22	16.06	16.89	18.10	15.76	14.91	18.29	17.57	16.52	17.97
FeO	9.15	9.04	8.52	9.50	11.16	10.71	11.35	12.95	9.64	9.10	11.99	10.69	9.93	10.55
Fe ₂ O ₃	0.87	1.39	1.88	1.83	1.24	1.56	1.98	2.03	1.77	2.27	1.51	2.10	1.85	1.74
MnO	0.19	0.22	0.19	0.22	0.21	0.22	0.22	0.25	0.21	0.21	0.20	0.19	0.20	0.18
MgO	8.76	9.12	8.13	9.34	10.73	7.63	8.81	9.73	8.45	7.66	9.90	9.08	9.32	11.16
CaO	6.07	7.01	4.21	6.01	3.62	3.10	2.88	2.42	5.17	6.97	2.57	3.59	4.38	1.24
Na ₂ O	4.37	4.15	4.53	3.53	3.05	3.20	2.94	2.83	2.78	2.54	3.88	3.76	3.28	3.35
K ₂ O	0.10	0.20	0.46	0.43	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.02	0.03
P ₂ O ₅	0.11	0.16	0.09	0.11	0.12	0.11	0.21	0.13	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09
Сумма Sum	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Rb	3.08	8.38	23.31	20.63	<P. O.	<P. O.	<P. O.	<P. O.	<P. O.	<P. O.	4.85	1.54	0.15	6.40
Ba	28.58	40.01	78.09	82.62	39.86	16.16	30.62	19.19	35.52	35.27	55.88	52.32	45.57	37.49
Th	0.44	0.41	0.45	0.52	0.54	0.42	0.41	0.40	0.39	0.43	0.39	0.43	0.33	0.39
U	0.14	0.13	0.14	0.15	0.20	0.12	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11	0.10	0.13
Nb	2.06	1.72	2.06	2.69	3.07	2.45	2.57	2.70	2.42	2.12	3.13	2.57	2.40	3.16
La	3.35	1.27	2.78	3.06	3.02	2.90	2.86	3.15	4.70	3.65	2.23	3.13	1.58	1.37
Ce	7.68	3.38	6.33	7.25	8.08	7.48	7.38	7.97	11.00	8.78	6.58	7.69	4.45	4.61
Pb	2.12	2.40	2.28	2.15	1.34	1.29	1.11	1.37	1.57	1.79	1.62	2.42	5.85	5.23
Pr	1.25	0.56	1.02	1.12	1.32	1.24	1.24	1.32	1.77	1.44	1.14	1.30	0.75	0.84
Sr	73.23	76.30	65.38	74.59	33.69	43.77	44.73	44.27	105.50	98.00	32.64	42.64	43.04	19.30
Nd	5.88	2.78	4.76	5.65	7.09	6.29	6.18	6.70	8.72	6.85	5.93	6.72	4.37	4.61
Sm	2.12	1.46	1.59	2.13	2.79	2.45	2.45	2.69	2.88	2.28	2.25	2.52	1.74	1.97
Zr	27.46	31.64	30.39	37.07	62.94	27.67	25.81	28.31	16.31	16.46	51.68	44.63	47.50	66.73
Hf	1.03	1.01	1.15	1.29	1.89	0.87	0.75	0.78	0.56	0.67	1.55	1.39	1.38	1.78
Eu	0.60	0.47	0.48	0.63	0.97	0.81	0.78	0.90	0.90	0.61	0.64	0.58	0.63	0.81
Ti	5255	4445	5155	6198	7614	6215	6491	7042	6075	4971	7652	6465	5781	7747
Gd	2.75	2.24	2.51	3.36	3.88	3.40	3.48	3.71	3.47	3.15	3.28	3.28	2.44	2.97
Tb	0.50	0.43	0.42	0.58	0.68	0.62	0.61	0.69	0.58	0.53	0.59	0.58	0.45	0.54
Dy	3.16	2.89	3.20	3.85	4.57	4.13	4.20	4.74	3.95	3.44	4.40	3.92	3.14	4.03
Y	16.30	14.29	16.53	20.37	24.36	21.83	22.94	25.77	20.70	18.80	23.68	21.35	16.79	21.56
Ho	0.71	0.60	0.68	0.80	0.93	0.84	0.91	1.02	0.82	0.73	0.93	0.82	0.64	0.87
Er	2.16	1.90	2.11	2.51	2.95	2.63	2.88	3.10	2.49	2.37	2.85	2.55	2.02	2.6
Tm	0.30	0.27	0.29	0.37	0.41	0.37	0.38	0.43	0.35	0.29	0.40	0.35	0.31	0.37
Yb	2.03	1.88	1.96	2.31	2.70	2.55	2.55	3.02	2.17	2.14	2.61	2.38	1.98	2.53
Lu	0.29	0.31	0.26	0.34	0.39	0.34	0.35	0.41	0.32	0.30	0.37	0.34	0.30	0.38
CIA	62.22	59.83	65.40	68.75	75.62	76.25	80.12	81.29	71.8	69.54	76.79	90.85	73.83	80.56

Примечание. Содержание петрогенных элементов пересчитано на безводный остаток. Коэффициент CIA = Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO* + Na₂O + K₂O) × 100 рассчитан по молекулярным количествам петрогенных окислов [Nesbitt, Young, 1982], содержание CaO* учитывается только для силикатных минералов. <P. O. – меньше предела обнаружения.

Note. Content of petrogenic elements is recalculated into an anhydrous residue. The coefficient CIA = Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO* + Na₂O + K₂O) * 100 is calculated from the molecular amounts of petrogenic oxides [Nesbitt, Young, 1982], the CaO* content is taken into account only for silicate minerals. <P. O – lower limit of detection.

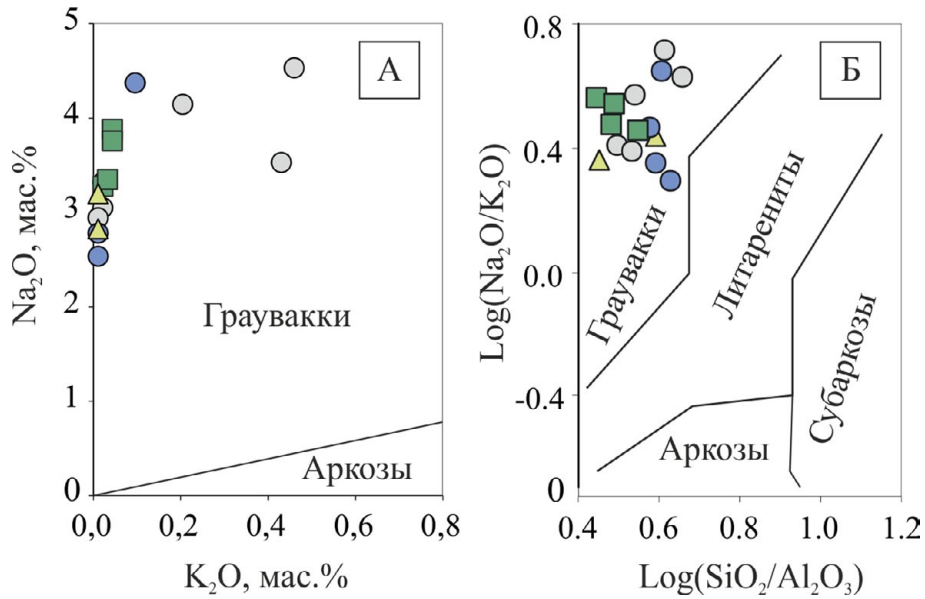


Рис. 2. Состав цемента неоархейских полимиктовых конгломератов молассоидного комплекса Койкарского домена (района оз. Питкилампи) на классификационных диаграммах: А) диаграмма Ф. Петтиджона для разделения аркозов и граувакк по концентрации Na_2O - K_2O , мас. % [Петтиджон, 1981]; Б) геохимическая классификация терригенных пород в системе $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) - \text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [Петтиджон, 1981]. Условные обозначения соответствуют рис. 1

Fig. 2. Composition of cement of Neoarchaeon polymictic conglomerates of the molassoid complex of the Koikary domain (Lake Pitkalampi area) on the classification diagrams: A) diagram for separation of arkoses and graywackes according to Na_2O - K_2O concentration, wt.% [Pettijohn, 1981]; Б) geochemical classification diagram of terrigenous rocks in the system $\text{Log}(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) - \text{Log}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [Pettijohn, 1981]. See Fig. 1 for the legend.

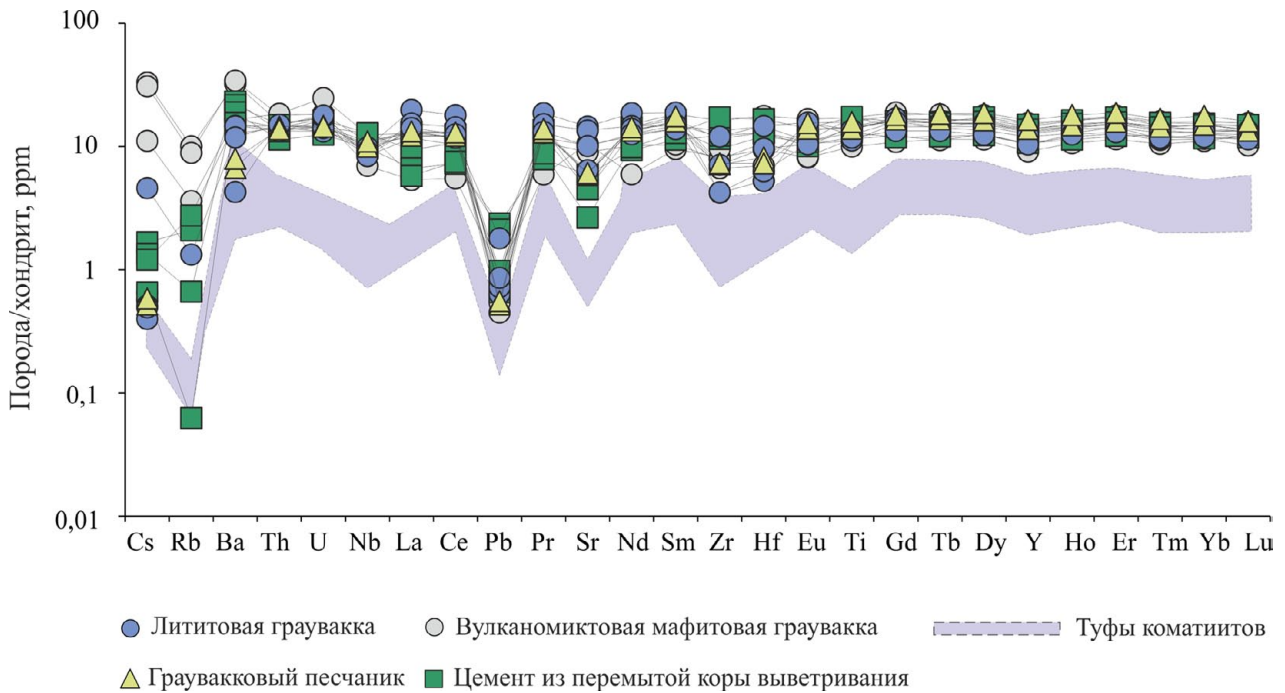


Рис. 3. Распределение редкоземельных элементов в цементе полимиктовых конгломератов молассоидного комплекса Койкарского домена. Нормировано на хондрит C1 [McDonough, Sun, 1995]

Fig. 3. Distribution of rare-earth elements in the cement of polymictic conglomerates of the molassoid complex of the Koikary domain. The REE contents are normalized to chondrite [McDonough, Sun, 1995]

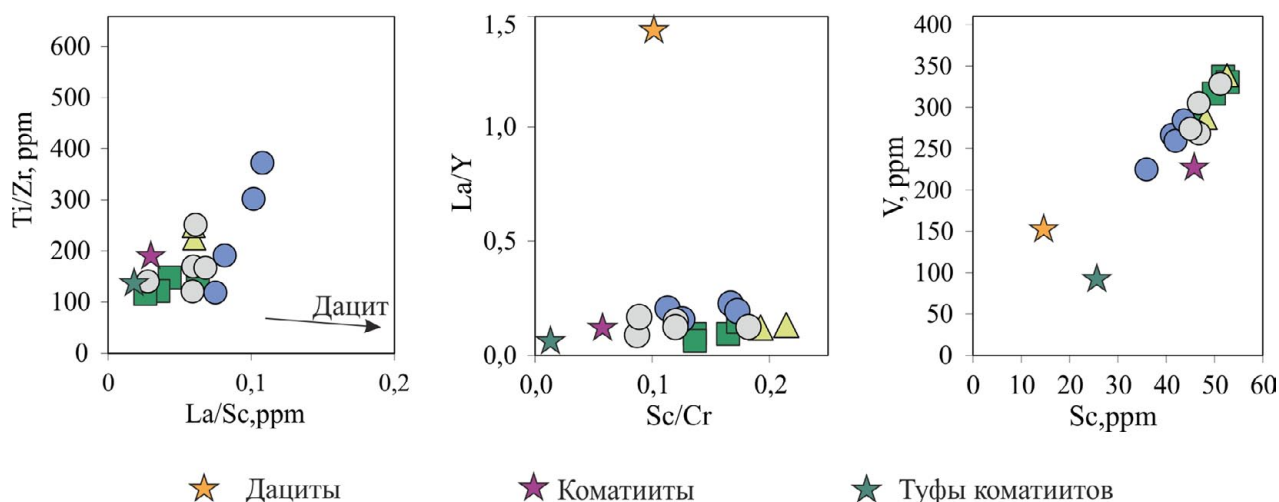


Рис. 4. Вариации индикаторных отношений (La/Sc, Ti/Zr, Sc/Cr, La/Y) в цементе полимиктовых конгломератов молассоидного комплекса Койкарского домена [Bhatia, Crook, 1986]. Условные обозначения соответствуют рис. 1.

Fig. 4. Variations of the indicator ratios (La/Sc, Ti/Zr, Sc/Cr, La/Y) in cement of polymictic conglomerates of the molassoid complex of the Koikary domain [Bhatia, Crook, 1986]. See Fig. 1 for the legend

цементе CIA – 55–56, в граувакковом – 54–73). Полученные значения свидетельствуют о существенном химическом преобразовании пород. Скорее всего, существовало несколько циклов химического выветривания: ранний происходил при изменении вещества – источника терригенного материала, а поздний цикл мог затрагивать уже отложенный молассоидный комплекс, причем, вероятнее всего, преобразования происходили в условиях теплого гумидного климата [Nesbitt, Young, 1982].

Анализ петрогенетических отношений (La/Y, Sc/Cr, Ti/Zr, La/Sc) грауваккового цемента конгломератов (рис. 4) и сопоставление их с доминирующими на данной территории породными ассоциациями (коматиитами, туфами коматиитов, дацитами (рис. 4, звездочки)) позволяет предположить, в результате эрозии каких потенциальных источников и в каких тектонических обстановках произошло формирование матрикса конгломератов на изучаемом участке.

На графике Ti/Zr-La/Sc отражено, что для цемента конгломератов характерны значения $Ti/Zr > 40$ и $La/Sc < 1$, являющиеся обычными для пород океанических обстановок, в частности островных дуг [Bhatia, Crook, 1986]. Низкие значения $La/Y < 0,5$ и $Sc/Cr > 0,6$ на графике La/Y-Sc/Cr также соответствуют океаническим обстановкам, а именно условиям океанических островов [Bhatia, Crook, 1986]. Отношение V-Sc, являющихся элементами, концентрирующимися в основном в мафитовой составляющей пород, демонстрирует обогащение цемента мафитовыми компонентами в основании разреза, что также согласуется с повышенными концентрациями

MgO (рис. 1). Сопоставление вариаций отношений La/Y, Sc/Cr, Ti/Zr и La/Sc матрикса конгломератов со средними значениями в коматиитах, туфах коматиитов и дацитах (рис. 4, звездочки), широко представленных в пределах ВСЗП и изучаемой территории в частности, позволяют предполагать, что именно продукты эрозии коматиитов и их туфов преимущественно формируют граувакковый цемент. Вместе с тем установлен тренд существующего смешения полимодальных источников материала, где к мафитовой «основе» добавлялась примесь андезидацитового компонента. Стоит отметить, что ранние исследования установили геодинамическую приуроченность мафитов (коматиитов и высокомагнезиальных базальтов Койкарского домена) к задуговым протоокеаническим обстановкам [Светов, 2015], и это согласуется с полученными нами выводами.

Выводы

Изучение архейских осадочных пород занимает особое место в современной геологии, поскольку является дополнительным источником информации о происхождении ранней континентальной коры, ее развитии и последующей эволюции, что позволяет корректировать и дополнять существующие геодинамические модели формирования отдельных регионов. Традиционно для уточнения условий образования родительского материала докембрийских осадочных комплексов используют геохимические данные, а именно вариации маломобильных микроэлементов (Ti, Zr, Th и др.),

отражающих происхождение и тектонические обстановки формирования пород [Bhatia, Crook, 1986].

В связи с тем, что формирование молассоидного комплекса Койкарского домена является самым молодым неоархейским событием в Ведлозерско-Сегозерском зеленокаменном поясе, его изучение позволяет накопить материал для характеристики завершающего этапа эволюции зеленокаменных структур Карельского кратона.

Проведенные исследования показали, что матрикс неоархейских полимиктовых конгломератов в районе оз. Питкилампи Койкарского домена представлен неоднородным по составу и структуре граувакковым материалом, меняющимся в разрезе от продуктов перемыыва коры выветривания коматиитов до грауваккового песчаника, лититовой граувакки и вулканомиктовой мафитовой граувакки. Петрохимическая характеристика цемента, согласно [Петтиджон, 1981], демонстрирует обогащение пород Al_2O_3 и MgO , что, вероятно, обусловлено преобладанием коматиитовой составляющей в области эрозии. Данное заключение подтверждается распределением РЗЭ, топология спектра которых подобна спектру распределения РЗЭ в коматиитах. По отношениям La/Y , Sc/Cr , Ti/Zr и La/Sc установлено, что потенциальными источниками, разрушение которых привело к формированию цемента конгломератов, стали коматииты, туфы коматиитов и андезидацитовые составы.

Формирование несогласных молассоидных бассейнов в пределах изучаемой площади контролируется разломами ССЗ простираения, приуроченными к главной тектонической зоне. Их образование проходило в ребольский тектонометаморфический цикл и было инициировано заложением системы линейных складок СВ ориентировки. Последующая стадия формирования бассейнов проходила в режиме левосдвиговой деформации, асимметричных складок и продольно-магистральных сдвигов, сочетание которых отражает существовавшую на этот момент обстановку транспрессионного сжатия [Колодяжный, 2004]. Последующие геодинамические события развиваются по транс-тензионному сценарию, приводя к образованию системы пулл-апарт бассейнов [Леонов и др., 2001].

Время формирования пулл-апарт структур вероятнее всего соответствует интервалу 2,7–2,6 млрд лет, именно в этот период происходит образование подобных систем в Большеозерском домене [Леонов и др., 2001].

Следует отметить, что формирование молассоидных бассейнов, возможно, сопровождалось

внедрением интрузивов (\pm вулканитов) субщелочного или известково-щелочного типа. На территории Ведлозерского террейна существуют гранитоидные комплексы этой возрастной группы, представленные серией интрузий субщелочных гранитоидов, сиенитов, кварцевых сиенитов и кварцевых монзонитов с возрастом 2,72–2,70–2,65 млрд лет [Чекулаев, 1996].

Автор благодарит С. А. Светова, З. П. Рыбникову, М. А. Гоголеву за помощь в организации полевых работ и за предоставление данных по средним составам коматиитов и дацитов Койкарского домена, Т. Н. Назарову за помощь в анализе литературных данных, С. Ю. Чаженгину за консультирование и рекомендации в проведенном исследовании.

Исследования выполнены в рамках темы НИР Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ КарНЦ РАН «Общие закономерности развития тектоносферы и биосферы Земли в раннем докембрии (на примере Восточной Фенноскандии): анализ магматических, метаморфических систем, их металлогении и ранней жизни», аналитические исследования проводились при частичной поддержке РФФИ, гранты 16-35-00268, 17-55-45005.

Литература

- 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, вып. 2. С. 119–140. doi: 10.21638/11701/spbu07.2017.201
- Колодяжный С. Ю. Структурно-кинематическая эволюция Карельского массива и Беломорско-Лапландского пояса в палеопротерозое (Балтийский щит): Дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2004. 305 с.
- Леонов М. Г., Колодяжный С. Ю., Зыков Д. С., Лишневецкий Э. Н., Сомин М. Л. Очерки постархейской геодинамики Карельского массива. М.: ГЕОС, 2001. 120 с.
- Петтиджон Ф. Дж. Осадочные породы. М.: Недра, 1981. 751 с.
- Пономарев А. И. Методы химического анализа силикатных и карбонатных горных пород. М.: АН СССР, 1961. 414 с.
- Рыбаков С. И., Светова А. И. Верхнеархейский Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс Карелии. Геологические экскурсии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1993. 87 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., Светова А. И., Назарова Т. Н., Антропова Е. А. Неоархейские пулл-апарт бассейны

Центрально-Карельского террейна: породные последовательности и литогеохимическая характеристика // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. Вып. 8. С. 5–17.

Светов С. А., Степанова А. В., Чаженина 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-ICPMS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН. 2015. Т. 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Светов С. А. Мезоархейские коматиит-базальтовые комплексы: литогеохимические типы и их роль в архитектуре ранней континентальной коры // Материалы XII Всероссийского петрографического совещания, ИГ КарНЦ РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 26–29.

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

Светова А. И. Архейский вулканизм Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карелии. Петрозаводск: Кар. фил. АН СССР, 1988. 148 с.

Чекулаев В. П. Архейские гранитоиды Карелии и их роль в формировании континентальной коры Балтийского щита: Дис. ... докт. геол.-минер. наук. СПб., 1996. 298 с.

Armijo R., Meyer B., Navarro S., King G., Barka A. Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: A clue to propagation processes of the North

Anatolian Fault // Terra Nova. 2002. Vol. 14, no. 2. P. 80–86.

Bhatia M. R., Crook K. A. W. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1986. Vol. 92. P. 181–193. doi: 10.1007/BF00375292

Bertoluzza L., Perotti C. R. A finite-element model of the stress field in strike-slip basins: Implications for the Permian tectonics of the Southern Alps (Italy) // Tectonophysics. 1997. Vol. 280. P. 185–197.

Burchfiel B. C., Stewart J. H. "Pull-apart" origin of the central segment of Death Valley, California // Geol. Soc. Am. Bull. 1966. Vol. 77. P. 439–442.

Floyd P. A. Tectonic environment of the Devonian mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // J. Geol. Soc. London. 1987. Vol. 144. P. 531–542.

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

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

Smirnova Yu. N., Popoko L. I., Sorokin A. A. Age, geochemistry, and sources of Clastic Materials and Accumulation Settings of the Glubokin Formation (Eastern Transbaikalia) // Russian Journal of Pacific Geology. 2017. Vol. 11, no. 3. P. 163–177.

Поступила в редакцию 26.01.2018

References

Bakaeva A. V., Chazhengina S. Yu., Svetov S. A. Relikt mezoarkhejskoi kory vyvetrivaniya komatiitov Koikarskoi struktury Tsentral'naya Kareliya [Relict of Meso-Archean paleosol developed on the komatiites from Koikary Area, Central Karelia]. *Vestnik SPbSU. Earth Sciences*. 2017. Vol. 62, iss. 2. P. 119–140. doi: 10.21638/11701/spbu07.2017.201

Chekulaev V. P. Arkhejskie granitoidy Karelii i ikh rol' v formirovanii kontinental'noi kory Baltijskogo shchita [The Archean granitoids of Karelia and their role in the formation of the continental crust of the Baltic Shield]: DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. St. Petersburg, 1996. 298 p.

Kolodyazhnyi S. Yu. Strukturno-kinematicheskaya evolyutsiya Karel'skogo massiva i Belomorsko-Laplandskogo poyasa v paleoproterozoe (Baltiiskii shchit) [Structural-kinematic evolution of the Karelian Massif and Belomorian – Lapland Belt in the Paleoproterozoic, Baltic Shield]. DSc (Dr. of Geol.-Miner.) thesis. Moscow, 2004. 305 p.

Leonov M. G., Kolodyazhnyi S. Yu., Zykov D. S., Lishnevskii E. N., Somin M. L. Ocherki postarkhejskoi geodinamiki Karel'skogo massiva [Essays on the Post-archean geodynamics of the Karelian Massif]. Moscow: GEOS, 2001. 120 p.

Pettijohn F. J. Osadochnye porody [Sedimentary rocks]. Moscow: Nedra, 1981. 751 p.

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

Rybakov S. I., Svetova A. I. Verkhnearkhejskii Vedlozersko-Segozerskii zelenokamennyi poyas Karelii [The Upper Archean Vedlozero-Segozero greenstone belt of Karelia]. *Geologicheskie ekskursii* [Geol. Excursions]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1993. 87 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 Archean of the eastern part of the Fennoscandian Shield]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. 230 p.

Svetov S. A., Svetova A. I., Nazarova T. N., Antropova E. A. Neoarkhejskie pull-apart basseiny Tsentral'no-Karel'skogo terreyna: porodnye posledovatel'nosti i litogeoхимическая характеристика [The Neoproterozoic pull-apart basins of the Central Karelian terrain: rock sequences and lithogeochemical characteristics]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. Minerals Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2005. Vol. 8. P. 5–17.

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhailova A. I., Paramonov A. S., Utitsina V. L., Ekhoва 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 [Precision geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock and mineral composition: the method and accuracy estimation in the case study of Early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2015. Vol. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Svetov S. A. Mezoarkheiskie komatiit-bazal'tovye komplekсы: litogeokhimicheskie tipy i ikh rol' v arkhitekture rannei kontinental'noi kory [The Mesoarchean komatiite-basalt complexes: lithochemical types and their role in the architecture of the early continental crust]. *Materialy XII Vseros. petrografich. soveshch* [Mat. the XII All-Russ. Petrographic Meeting]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 26–29.

Svetova A. I., Rybakov S. I. Arkheiskaya kora vyvetrivaniya v osadochno-vulkanogennykh kompleksakh Koikarskoi struktury (Tsentral'naya Kareliya) [The Archean paleosol of volcanogenic sedimentary structures of the Koikary area (Central Karelia)]. *Geologiya i petrologiya* [Geol. Petrol.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1987. P. 10–15.

Svetova A. I. Arkheiskii vulkanizm Vedlozersko-Segozerskogo zelenokamennogo poyasa Karelii [The Archean volcanism in the Vedlozero-Segozero greenstone belt of Karelia]. Petrozavodsk: Kar. fil. AN SSSR, 1988. 148 p.

Armijo R., Meyer B., Navarro S., King G., Barka A. Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: A clue to propagation processes of the North Anatolian Fault, *Terra Nova*, 14(2), 2002. P. 80–86.

Bhatia M. R., Crook K. A. W. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92, 1986. P. 181–193. doi: 10.1007/BF00375292

Bertoluzza L., Perotti C. R. A finite-element model of the stress field in strike-slip basins: Implications for the Permian tectonics of the Southern Alps (Italy), *Tectonophysics*, 280, 1997. P. 185–197.

Burchfiel B. C., Stewart J. H. "Pull-apart" origin of the central segment of Death Valley, California. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1966. Vol. 77. P. 439–442.

Floyd P. A. Tectonic environment of the Devonian mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *J. Geol. Soc. London*. 1987. Vol. 144. P. 531–542.

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

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

Smirnova Yu. N., Popeko L. I., Sorokin A. A. Age, geochemistry, and sources of Clastic Materials and Accumulation Settings of the Glubokin Formation (Eastern Transbaikalia). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2017. Vol. 11, no. 3. P. 163–177.

Received January 26, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Бакаева Александра Владимировна

аспирант
Институт геологии Карельского научного центра РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: sashе-ku@yandex.ru
тел.: +79637443302

CONTRIBUTOR:

Bakaeva, Alexandra

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: sashе-ku@yandex.ru
tel.: +79637443302