

УДК 551.71:550.42:552.323.3

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ДАЦИТ-РИОЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВЕДЛОЗЕРСКО-СЕГОЗЕРСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА (КАРЕЛЬСКИЙ КРАТОН)

М. А. Гоголев

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

Приводятся новые данные по геологическому строению, петрографии и геохимии мезоархейских кислых субвулканических пород центральной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Койкарский домен). В исследованной дацит-риолитовой ассоциации выделяются три петрологически контрастные группы: 1) субвулканические дациты с несколькими генерациями порфировых вкрапленников с повышенным содержанием Cr, Ni, Ti, Nb, тяжелых РЗЭ, с ϵNd (2935 млн лет) от +0,72 до +2,93; 2) риолиты с сильно фракционированным спектром распределения РЗЭ и отрицательными аномалиями по Nb, Sr и Ti и ϵNd (2935 млн лет) от +1,15 до +3,37; 3) дациты и риолиты с фракционированным спектром распределения РЗЭ, отрицательными аномалиями по Nb, Sr, Ti и ϵNd (2935 млн лет) –6,47. Вышеуказанные особенности пород отражают контрастные условия генерации кислых субвулканических пород Койкарского домена и маркируют различные временные этапы развития зеленокаменного пояса.

Ключевые слова: архей; дациты; риолиты; геохимия; зеленокаменный пояс.

M. A. Gogolev. GEOCHEMICAL TYPES OF SUBVOLCANIC DACITE – RHYOLITE COMPLEXES FROM THE CENTRAL PART OF THE VEDLOZERO-SEGOZERO GREENSTONE BELT (KARELIAN CRATON)

The paper presents the results of detailed geological, petrographic and geochemical studies of Archean acidic subvolcanic rocks from the Koikary domain located in the central part of the Vedlozero-Segozero greenstone belt. Three petrologically contrasting groups are clearly distinguished in the investigated dacite-rhyolite association: 1) dacite with high content of Cr, Ni, Ti, Nb, and heavy REE, which are characterized by ϵNd (2935 Ma) from +0.72 to +2.93 and contain porphyritic phenocrysts of several generations; 2) rhyolite with a strongly fractionated REE distribution, negative anomalies in Nb, Sr and Ti, and with ϵNd (2935 Ma) from +1.15 to +3.37; 3) dacite and rhyolite with a moderately fractionated REE distribution, negative anomalies in Nb, Sr and Ti, and with ϵNd (2935 Ma) = –6.47. The above mentioned features of the rocks reflect the contrasting conditions of generation of acidic subvolcanic rocks in the Koikary domain and mark different time stages of the greenstone belt development.

Key words: Mesoproterozoic; dacite; rhyolite; geochemistry; greenstone belt.

Введение

Инициальный этап формирования Карельского кратона отражен в эволюции вещественно-структурных комплексов палео-мезоархейского Водлозерского блока и обрамляющих его с запада, севера и северо-востока зеленокаменных поясов – Водлозерско-Сегозерского, Сумозерско-Кенозерского и Южно-Выгозерского [Puchtel et al., 1999; Лобач-Жученко и др., 2005; Светов, 2005; Slabunov et al., 2006; Arestova et al., 2012]. При этом особый интерес для реконструкции геодинамических режимов образования ранней континентальной коры региона имеют средне-кислые ассоциации, которые ранее детально изучались в отдельных доменах Водлозерско-Сегозерского [Бибилова, Крылов, 1983; Стратиграфия..., 1992; Светов, 2005, 2009; Светов и др., 2012], Сумозерско-Кенозерского [Puchtel et al., 1999; Samsonov et al., 2005] и Южно-Выгозерского [Lobach-Zhuchenko et al., 1999; Myskova et al., 2015] зеленокаменных поясов. В ходе исследований было установлено, что формирование ассоциаций происходило в конвергентных режимах.

Одной из ключевых территорий, на которой могут быть прослежены основные этапы эволюции конвергентной зоны «протоокеан – протоконтинент (Водлозерский блок)», является Койкарский домен, где сохранились стратифицированные разрезы протоокеанического (коматиит-базальтового), окраинно-континентального (андезит-дацитового) комплексов и мощные пачки мезоархейских вулканогенно-терригенных и осадочных пород, крайне информативных для реконструкции утраченных магматических событий в эволюции переходной зоны [Бакаева, 2018]. Ранее широко проявленный в домене кислый магматизм, представленный дайковыми и субвулканическими телами, был недостаточно изучен. Установлено время формирования субвулканического тела, расположенного на юге комплекса, для которого получен возраст 2935 ± 20 млн лет [Бибилова, Крылов, 1983], имеются данные по минеральному составу кислой ассоциации домена [Светова, 1988] и метаморфическим преобразованиям пород [Король, 1994].

В связи с этим в работе ставится задача геологического, петрографического, геохимического и изотопного исследования кислого субвулканического комплекса Койкарского домена с целью изучения его химической однородности и оценки возможных условий его образования.

Геологическое положение объектов исследования. Койкарский домен расположен

в центральной части мезоархейского Водлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (район пос. Гирвас) и представляет собой эрозионное «окно» (30×4 км²) архейских пород в сумийско-сариолийском и ятулийском комплексах пород [Светова, 1988]. В пределах домена, как уже отмечалось, выделено два ключевых стратотектонических комплекса [Стратиграфия..., 1992; Светов, 2005]: коматиит-базальтовый (с возрастом 3,0–2,9 млрд лет) и андезидацитовый (2,86–2,84 млрд лет), с каждым из которых связаны вулканогенно-терригенные образования.

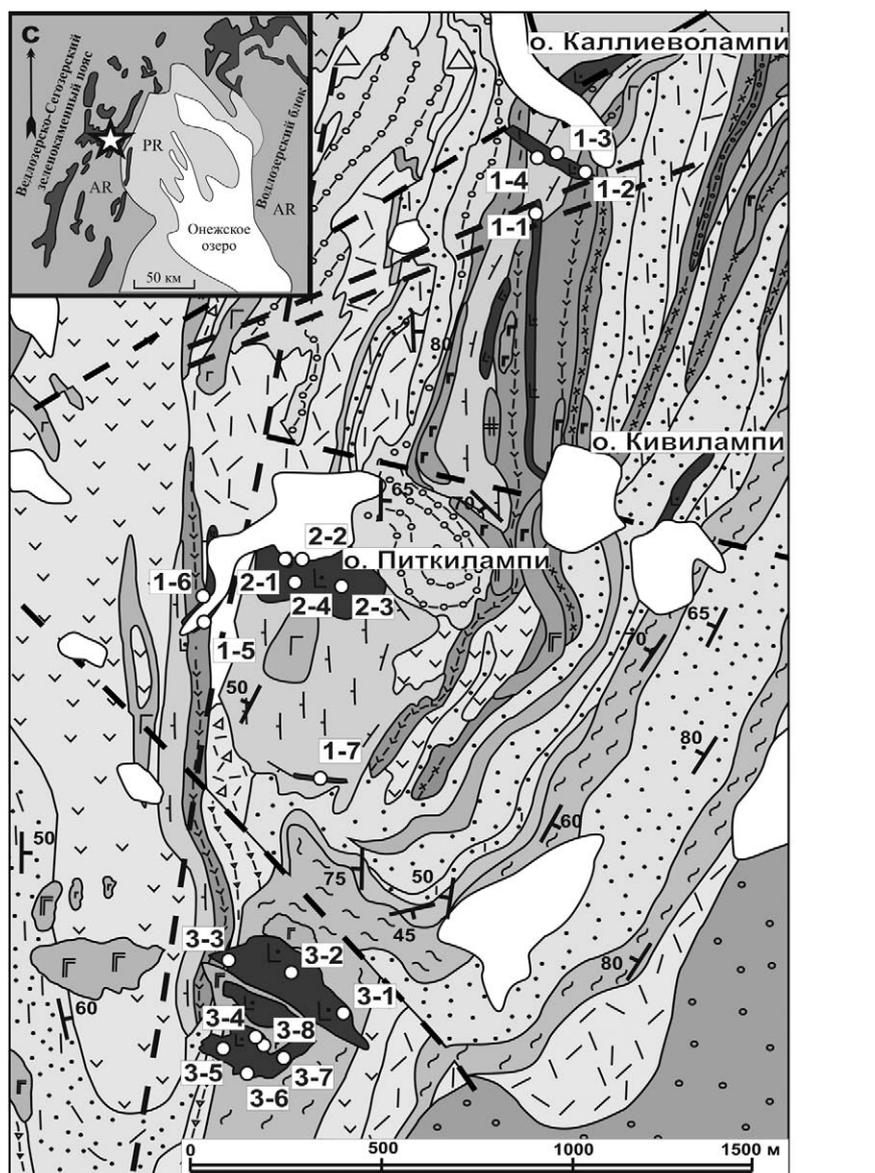
Коматиит-базальтовый комплекс (рис. 1) представлен стратифицированной последовательностью коматиитовых лавовых потоков (массивного, вариолитового, подушечного и дифференцированного строения) с прослоями туфового материала и хемогенных осадков. Она перекрывается лавами базальтов. Общая мощность данного комплекса составляет 1200–1300 м [Светов, 2005]. На кровле коматиит-базальтового комплекса сформирована кора химического выветривания [Бакаева и др., 2017], выше которой залегают продукты ее размыва и переотложения, граувакки с редкими линзами аркоз и гравелитов общей мощностью 200–230 м [Бакаева, 2018]. Последние контактируют с толщей тонкого переслаивания валунно-галечных полимиктовых конгломератов, кислых туфов, туфопесчаников, силицитов, графитистых сланцев с прослоями лититовых и полевошпатовых граувакк и доломитов [Светов, Светова, 2004].

Изучаемые в статье субвулканические образования секут породы коматиит-базальтового и терригенно-хемогенного комплексов (рис. 1).

Метаморфические преобразования пород Койкарского домена проходили в несколько этапов, на раннем он соответствовал эпидот-амфиболитовой фации, на позднем – зеленосланцевой [Король, 1994].

Материалы и методы

Петрографическое изучение субвулканических пород Койкарского домена проводилось методами оптической и электронной микроскопии (СЭМ VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments)). Содержание петрогенных элементов определялось методом силикатного анализа по методике [Пономарев, 1961], за исключением Na_2O , K_2O , концентрации которых определялись на атомно-адсорбционном спектрометре AAS-3 (Carl Zeiss). Измерение концентраций редких и редкоземельных элементов



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

| Ятулий | | Мезоархей | | | |
|--------|---------------------------|-----------|------------------------|--|-------------------------|
| | габбро | | дацит-риолиты | | песчаники |
| | кварцевые конгломераты | | туфы дацитов | | граувакки |
| | Сариолий | | графитистые алевролиты | | силициты |
| | полимиктовые конгломераты | | доломиты | | метагаббро |
| | | | толейты | | коматиит-базальты |
| | | | слоистость | | тектонические нарушения |
| | | | | | точки отбора проб |

Рис. 1. Схема геологического строения центральной части Койкарского домена [Светова, 1988, с дополнениями автора]. На врезке показано положение Койкарского домена на Карельском кратоне

Fig. 1. Geological scheme of the central part of the Koikary domain after [Svetova, 1988; with the author's additions]. The insert map shows the position of the Koikary domain on the Karel'ian craton

выполнялось методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2 по описанной ранее методике [Светов и др., 2015]. Данные виды работ проводились в Аналитическом центре ИГ КарНЦ РАН.

Измерение изотопного состава и концентраций Sm и Nd в валовых пробах субвулканитов выполнено на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 в Геологическом институте КНЦ РАН (г. Апатиты) по стандартной

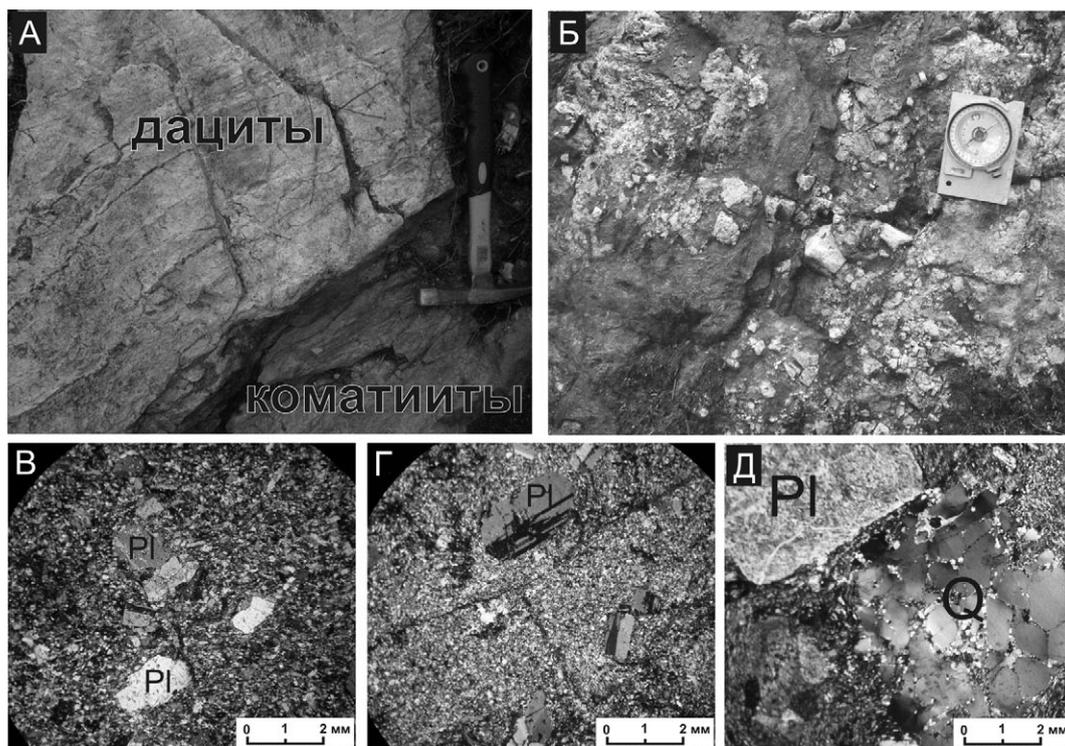


Рис. 2. Фото обнажений: А – контакт риодацитов Центрального субвулканического тела (далее ЦТ) с мезоархейскими коматиитами Койкарского домена, Б – брекчия в зоне контакта ЦТ и коматиитов. Микрофото шлифов пород: В – риодацитов даек, Г – риолитов ЦТ, Д – дацитов Южного субвулканического тела (далее ЮТ)

Fig. 2. Outcrop photos: А – contact between rhyodacites from the Central subvolcanic body and the Mesoarchean komatiites of the Koikary domain, Б – breccia in the contact zone of the Central body and komatiites. Microscope images of the thin sections: В – dykes of riodacite, Г – rhyolites of the Central body and Д – dacites of the Southern subvolcanic body

методике [Серов и др., 2014]. Измеренные изотопные отношения Nd были нормализованы по $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.241570$, а затем пересчитаны на отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте LaJolla = 0.511833. Указанные работы проводились в Лаборатории геохронологии и изотопной геохимии Геологического института КНЦ РАН, г. Апатиты.

Геология и петрография. Субвулканический дацит-риолитовый комплекс Койкарского домена представлен дайковыми (далее – дайки) (рис. 1, пробы 1–1, 1–2, 1–3, 1–4, 1–5, 1–6, 1–7) и крупными субвулканическими телами – Центральным (пробы 2–1, 2–2, 2–3, 2–4 на рис. 1) и Южным (рис. 1, пробы 3–1, 3–2, 3–3, 3–4, 3–5, 3–6, 3–7).

Дайки установлены в центральной и северной частях Койкарского домена, имеют мощность от 5 до 15 м, секут породы коматиит-базальтового комплекса и имеют четкие контакты, позволяющие их трассировать по латерали. Дайковые породы имеют массивную текстуру и микропорфировую структуру (рис. 2, В). Вкрапленники преимущественно выполнены

вторичным альбитом (до 3 мм по длинной оси), развивавшимся по олигоклазу (10–15 % An), реликты которого идентифицируются методом сканирующей электронной микроскопии. Основная масса породы сложена кварцем, альбитом, фенгитом, хлоритом и эпидотом. Акцессорные и рудные минералы представлены апатитом, цирконом, рутилом и монацитом.

Центральное субвулканическое тело (ЦТ), описанное в районе оз. Питкилампи, имеет овальную форму (размер 100 × 300 м) и резкий контакт с вмещающими лавами коматиитов (рис. 1 и 2, А). В зоне контакта на отдельных участках порода превращена в интенсивно рассланцованную брекчию (матрикс отвечает по составу коматиитам, обломки – дацитам) (рис. 2, Б). Субвулканические породы имеют микропорфировую структуру (рис. 2, Г). Вкрапленники выполнены сосюритизированным олигоклазом (размер до 3 мм) и резорбированным кварцем (до 2 мм по длинной оси). Тонкокristаллическая основная масса сложена кварцем, фенгитом, альбитом, хлоритом и эпидотом. Акцессорные минералы

представлены апатитом, цирконом, пиритом, рутилом и магнетитом.

Южное субвулканическое тело (ЮТ), обнаженное в районе оз. Митрийлампи, имеет неправильную в плане форму, сечет породы коматиит-базальтового комплекса и терригенную толщу Койкарского домена, имеет размеры около 300 × 400 м. Слагающие его породы характеризуются порфировой структурой, особенностью которой является наличие двух генераций вкрапленников – крупных (0,5–1,0 см по длинной оси) и мелких (до 3 мм) (рис. 2, Д). Крупные вкрапленники представлены таблитчатым олигоклазом и кварцем в соотношении 3:1. Мелкие вкрапленники – это овальные зерна плагиоклаза и кварца в соотношении 1:1.

Матрикс породы выполнен альбитом, кварцем, хлоритом и эпидотом. По плагиоклазу наблюдается развитие фенгита (до 50 мкм), эпидота и кальцита. Акцессорные минералы выполнены цирконом, сфалеритом, пиритом и гематитом.

Геохимическая характеристика субвулканических пород и обсуждение результатов. С целью геохимического сопоставления дайковых тел с субвулканическими телами Койкарского домена был проведен анализ вариации содержания петрогенных элементов и элементов-примесей.

На диаграмме TAS (рис. 3, А) дайковые породы располагаются в поле риодацитов, породы Центрального субвулканического тела – в поле риодацитов и риолитов, а Южного – в области дацитов. По содержанию калия (0,4–2,71 мас. %) все субвулканические породы могут быть отнесены к умеренно-калиевой серии (табл. 1). Важно отметить, что в рассматриваемой выборке часть проб (№ 1–6, 1–7, 2–1, 2–3, 3–1) имеют очень низкое содержание калия (0,05–0,1 мас. %), которое коррелируется также с низким содержанием Rb (1–2 г/т) и Ba (20–120 г/т). Как известно, данные элементы являются наиболее подвижными в ранних и поздних геологических процессах, сопровождающихся присутствием флюида [Wilson, 1989], а вариации их концентраций являются результатом наложенных преобразований. Данный процесс в Койкарском домене может быть результатом формирования крупной неархейской сдвиговой зоны (протяженность более 30 км) с СВ простиранием, расположенной на 250–300 м восточнее изучаемой площади [Светов и др., 2016].

Для всей ассоциации субвулканических пород характерна высокая магнезиальность (0,43–0,75) (рис. 3, Б) и глиноземистость

(13–15 мас. %) (рис. 3, Г). При этом дациты ЮТ отличаются от остальных субвулканических пород более высоким содержанием FeO* (4,5–5,7 мас. %), TiO₂ (0,4–0,6 мас. %) и Cr (52–75 г/т) (рис. 3, В, Д, Е; табл. 1).

Тренд распределения редких элементов (рис. 4) в породах дацит-риолитовой ассоциации имеет фракционированный характер, образуя две группы на спайдерграмме: риодациты даек ((La/Yb)_n = 24–56) и субвулканицы ЦТ и ЮТ ((La/Yb)_n = 8–21)).

На спайдерграммах (рис. 4) отчетливо проявлены отрицательные аномалии по Ti, Nb и положительные по Hf и Zr. Важно отметить, что подобные характеристики имеют ключевые вулканические кислые ассоциации Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (рис. 4), которые ранее были разделены на две серии: 1) адакитовая серия, представленная андезибазальтами-дацитами с возрастом 2958,7 ± 6 млн лет [Светов и др., 2012], что в нашем случае выступает химическим аналогом пород дайкового комплекса; 2) андезит-дацит-риолитовая серия с возрастом 2866 ± 11 млн лет [Светов и др., 2010], в большей степени подобная по составу субвулканическим дацитам и риолитам ЦТ и ЮТ. Важно подчеркнуть, что дациты ЮТ имеют относительно высокое содержание Nb (6,4–9,1 г/т), типичное для Nb-обогащенных серий по: [Martin et al., 2005].

В системе Sr/Y-Y и La/Yb-Yb разделяются составы средне-кислых пород, принадлежащих к адакитовой и дифференцированной андезит-дацит-риолитовой сериям (рис. 5), что принципиально для понимания условий их генерации. На данных диаграммах фигуративные точки дацитов ЮТ располагаются в области эталонных островодужных расплавов, в то время как риодацит-риолиты ЦТ – в переходной, а риодациты дайкового комплекса – в поле адакитовых магм, что может маркировать их генерацию в различных областях конвергентной системы. В случае такой интерпретации дайковый комплекс (подобный по составу адакитам) мог формироваться непосредственно в ходе плавления субдуцируемого базальтового слэба (эта модель была ранее предложена для вулканических ассоциаций Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса [Светов, 2005, 2009]), в то время как породы ЮТ формировались из вещества метасоматизированного мантийного клина, а составы ЦТ могли быть гибридными магмами, маркирующими взаимодействие островодужных расплавов с материалом континентальной коры.

Имеющиеся в нашем распоряжении геологические и геохронологические данные

Таблица 1. Химический состав архейской дацит-риолитовой ассоциации Койкарского домена (содержание главных элементов дано в мас. %, редких – в г/т)

Table 1. Chemical composition of the Archaean dacite-rhyolite association of the Koikary domain (the content of the main elements is given in wt %, rare – in ppm)

| Проба Sample | 1-1 | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 1-5 | 1-6 | 1-7 | 2-1 | 2-2 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|
| | Д | Д | Д | Д | Д | Д | Д | ЦТ | ЦТ |
| SiO ₂ | 70,4 | 70,0 | 69,4 | 70,0 | 70,5 | 73,4 | 71,0 | 68,3 | 72,3 |
| TiO ₂ | 0,24 | 0,26 | 0,25 | 0,26 | 0,23 | 0,24 | 0,23 | 0,20 | 0,20 |
| Al ₂ O ₃ | 14,8 | 14,7 | 15,2 | 15,7 | 15,0 | 13,5 | 15,0 | 14,8 | 15,3 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,29 | 0,50 | 0,51 | 0,52 | 0,39 | 0,27 | 0,19 | 0,71 | 0,36 |
| FeO | 1,58 | 1,36 | 0,93 | 1,29 | 1,22 | 1,15 | 1,22 | 3,45 | 1,44 |
| MnO | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,02 |
| MgO | 1,50 | 1,30 | 1,51 | 2,03 | 0,93 | 0,71 | 2,40 | 3,15 | 0,98 |
| CaO | 1,80 | 2,20 | 2,10 | 0,94 | 1,89 | 1,74 | 0,60 | 0,36 | 0,36 |
| Na ₂ O | 5,29 | 5,13 | 5,54 | 5,86 | 5,37 | 6,81 | 8,2 | 6,44 | 7,04 |
| K ₂ O | 1,68 | 1,84 | 1,97 | 1,71 | 1,74 | 0,32 | 0,10 | 0,10 | 0,76 |
| P ₂ O ₅ | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 |
| H ₂ O | 0,03 | 0,11 | 0,16 | 0,05 | 0,01 | 0,05 | 0,06 | 0,10 | 0,10 |
| LOI | 2,30 | 2,52 | 2,20 | 1,60 | 2,47 | 1,70 | 0,90 | 2,18 | 1,00 |
| Cr | - | 10,1 | 12,8 | 13,1 | 12,0 | - | 14,3 | 27,2 | - |
| Ni | 8,61 | 12,6 | 7,34 | 7,41 | 7,37 | 7,19 | 8,10 | 73,0 | 8,24 |
| Co | 4,19 | 6,16 | 3,07 | 3,87 | 5,99 | 2,61 | 5,82 | 18,4 | 3,89 |
| V | 22,7 | 23,1 | 22,8 | - | 18,2 | 15,6 | 21,5 | 40,5 | 19,5 |
| Pb | 1,52 | 5,08 | 2,61 | 1,70 | 3,55 | 2,41 | 2,89 | 2,41 | 2,61 |
| Rb | 29,5 | 31,8 | 43,6 | 35,2 | 29,6 | 3,59 | 1,20 | 1,77 | 17,0 |
| Ba | 402 | 452 | 541 | 556 | 423 | 57,0 | 19,0 | 120 | 320 |
| Sr | 98,0 | 92,0 | 145 | 82,0 | 163 | 109 | 98,0 | 119 | 89,0 |
| Nb | 2,84 | 2,29 | 2,15 | 1,84 | 2,94 | 2,37 | 2,14 | 5,62 | 5,74 |
| Zr | 165 | 157 | 170 | 167 | 146 | 109 | 162 | 180 | 181 |
| Ti | 1790 | 1550 | 1350 | 992 | 1520 | 1370 | 1230 | 1420 | 1410 |
| Y | 2,14 | 2,21 | 2,80 | 2,12 | 2,38 | 1,88 | 1,83 | 5,86 | 5,22 |
| Th | 2,01 | 2,07 | 2,19 | 2,70 | 1,86 | 1,45 | 2,01 | 7,96 | 8,84 |
| Cu | 3,69 | 88,5 | 9,37 | 2,45 | 3,86 | 10,92 | 6,60 | 22,40 | 5,18 |
| Zn | 29 | 1077 | 23 | 29 | 19 | 15 | 14 | 40 | 17 |
| La | 12,5 | 10,2 | 15,5 | 13,0 | 6,45 | 6,51 | 6,54 | 15,18 | 5,45 |
| Ce | 16,3 | 13,8 | 20,7 | 18,5 | 9,85 | 9,25 | 10,5 | 22,5 | 10,5 |
| Pr | 1,60 | 1,37 | 1,96 | 1,81 | 1,03 | 0,99 | 0,92 | 2,08 | 1,27 |
| Nd | 8,33 | 7,25 | 10,3 | 9,40 | 5,46 | 5,34 | 4,60 | 12,2 | 7,73 |
| Sm | 1,48 | 1,43 | 1,98 | 1,64 | 1,20 | 0,97 | 0,77 | 2,43 | 1,55 |
| Eu | 0,39 | 0,47 | 0,54 | 0,46 | 0,36 | 0,30 | 0,15 | 0,67 | 0,42 |
| Gd | 1,07 | 1,00 | 1,42 | 1,01 | 0,89 | 0,76 | 0,53 | 1,75 | 1,15 |
| Tb | 0,12 | 0,11 | 0,14 | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,20 | 0,16 |
| Dy | 0,46 | 0,49 | 0,69 | 0,49 | 0,52 | - | - | 1,04 | 0,93 |
| Ho | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,20 | 0,17 |
| Er | 0,20 | 0,21 | 0,25 | 0,21 | 0,22 | 0,17 | 0,19 | 0,61 | 0,48 |
| Tm | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,08 | 0,06 |
| Yb | 0,17 | 0,15 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,15 | 0,18 | 0,56 | 0,40 |
| Lu | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | - | 0,02 | 0,08 | 0,06 |
| U | 0,41 | 0,46 | 0,67 | 0,73 | 0,57 | 0,38 | 0,51 | 1,46 | 2,16 |
| Hf | 3,50 | 3,39 | 3,73 | 3,94 | 3,48 | 2,78 | 3,55 | 4,25 | 4,34 |
| Ta | 0,44 | 0,38 | 0,36 | 0,30 | 0,51 | 0,35 | - | 1,08 | 1,12 |
| Eu/Eu* | 0,94 | 1,22 | 0,98 | 1,1 | 1,06 | 1,06 | 0,72 | 0,99 | 0,96 |

Окончание табл. 1

Table 1 (continued)

| Проба Sample | 2-3 | 2-4 | 3-1 | 3-2 | 3-3 | 3-4 | 3-5 | 3-6 | 3-7 | 3-8 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | ЦТ | ЦТ | ЮТ |
| SiO ₂ | 76,0 | 72,8 | 66,2 | 65,9 | 65,2 | 65,9 | 65,4 | 64,9 | 65,8 | 67,1 |
| TiO ₂ | 0,08 | 0,22 | 0,44 | 0,47 | 0,48 | 0,59 | 0,60 | 0,50 | 0,33 | 0,54 |
| Al ₂ O ₃ | 13,0 | 14,6 | 13,1 | 13,8 | 13,7 | 14,6 | 14,8 | 15,1 | 15,0 | 14,7 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,34 | 0,73 | 0,50 | 0,76 | 1,00 | 1,53 | 1,21 | 0,68 | 1,46 | 1,75 |
| FeO | 1,36 | 1,36 | 4,31 | 3,73 | 3,3 | 2,94 | 4,16 | 3,88 | 3,73 | 2,72 |
| MnO | 0,03 | 0,02 | 0,07 | 0,08 | 0,07 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,04 |
| MgO | 0,72 | 1,96 | 3,85 | 4,29 | 3,6 | 2,72 | 3,33 | 3,22 | 2,85 | 2,81 |
| CaO | 0,29 | 0,58 | 2,9 | 2,1 | 3,1 | 2,42 | 1,69 | 2,48 | 1,75 | 1,02 |
| Na ₂ O | 7,20 | 5,11 | 4,96 | 4,97 | 4,00 | 3,92 | 4,73 | 4,21 | 5,31 | 6,04 |
| K ₂ O | 0,10 | 0,63 | 0,05 | 0,38 | 1,72 | 2,71 | 1,15 | 1,05 | 1,13 | 1,18 |
| P ₂ O ₅ | 0,07 | 0,1 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,16 | 0,16 |
| H ₂ O | 0,06 | 0,11 | 0,04 | 0,15 | 0,09 | 0,18 | 0,17 | 0,12 | 0,14 | 0,12 |
| LOI | 0,72 | 1,58 | 3,4 | 3,12 | 3,51 | 2,33 | 2,52 | 3,61 | 2,24 | 1,74 |
| Cr | - | 37,8 | 60,9 | 62,0 | 56,8 | 74,5 | 52,1 | 69,3 | 51,6 | 60,1 |
| Ni | 4,21 | 12,1 | 24,0 | 30,1 | 25,8 | 34,1 | 23,1 | 38,5 | 21,7 | 23,9 |
| Co | 4,08 | 4,58 | 16,5 | 14,5 | 12,8 | 10,1 | 15,3 | 11,5 | 13,6 | 9,25 |
| V | - | 42,9 | 73,6 | 76,3 | 76,6 | 56,4 | 58,8 | 56,5 | 65,3 | 74,3 |
| Pb | 3,11 | 4,22 | 3,3 | 25,2 | 2,42 | 19,1 | 2,16 | 1,85 | 2,71 | 2,92 |
| Rb | 1,15 | 18,1 | 1,37 | 9,76 | 34,9 | 49,8 | 14,4 | 22,6 | 18,7 | 14,5 |
| Ba | 100 | 203 | 15,0 | 169 | 559 | 494 | 248 | 261 | 258 | 245 |
| Sr | 76,0 | 125 | 146 | 145 | 95,0 | 135 | 110 | 117 | 120 | 107 |
| Nb | 5,99 | 4,23 | 7,67 | 9,12 | 8,60 | 6,50 | 6,77 | 6,39 | 7,02 | 7,20 |
| Zr | 88,0 | 181 | 204 | 213 | 197 | 140 | 130 | 124 | 145 | 157 |
| Ti | 479 | 2200 | 3130 | 3660 | 3450 | 3650 | 3950 | 3720 | 4070 | 4190 |
| Y | 4,79 | 7,57 | 16,9 | 16,9 | 14,6 | 13,4 | 12,7 | 13,3 | 14,3 | 7,87 |
| Th | 9,95 | 2,85 | 8,39 | 8,21 | 8,18 | 6,80 | 6,75 | 6,59 | 6,93 | 4,57 |
| Cu | 7,58 | 3,50 | 8,78 | 11,7 | 38,5 | 11,9 | 8,18 | 6,14 | 7,55 | 3,66 |
| Zn | 21,0 | 45,0 | 153 | 135 | 68,0 | 84,0 | 65,0 | 71,0 | 62,0 | 60,0 |
| La | 9,36 | 15,6 | 42,0 | 24,0 | 28,9 | 24,7 | 21,4 | 24,7 | 21,8 | 3,70 |
| Ce | 14,5 | 26,4 | 64,6 | 36,9 | 41,2 | 47,6 | 43,9 | 48,0 | 45,7 | 11,8 |
| Pr | 1,18 | 2,96 | 6,49 | 3,64 | 4,02 | 5,33 | 5,03 | 5,51 | 5,29 | 1,23 |
| Nd | 6,07 | 10,9 | 33,8 | 19,9 | 21,6 | 19,7 | 18,9 | 20,1 | 19,7 | 4,73 |
| Sm | 1,12 | 2,01 | 5,33 | 3,75 | 4,08 | 3,33 | 3,31 | 3,42 | 3,48 | 1,14 |
| Eu | 0,29 | 1,24 | 2,35 | 1,04 | 0,92 | 0,83 | 0,66 | 0,87 | 0,82 | 0,31 |
| Gd | 0,97 | 1,94 | 4,53 | 3,34 | 3,23 | 3,28 | 3,09 | 3,38 | 3,37 | 1,41 |
| Tb | 0,12 | 0,24 | 0,62 | 0,53 | 0,5 | 0,45 | 0,45 | 0,48 | 0,49 | 0,23 |
| Dy | 0,7 | 1,33 | 3,22 | 2,87 | 2,59 | 2,46 | 2,44 | 2,47 | 2,72 | 1,46 |
| Ho | 0,16 | 0,25 | 0,62 | 0,58 | 0,53 | 0,49 | 0,5 | 0,5 | 0,54 | 0,32 |
| Er | 0,51 | 0,59 | 1,76 | 1,73 | 1,57 | 1,43 | 1,43 | 1,46 | 1,61 | 1,05 |
| Tm | 0,07 | 0,08 | 0,25 | 0,25 | 0,23 | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 0,23 | 0,16 |
| Yb | 0,48 | 0,52 | 1,65 | 1,67 | 1,58 | 1,42 | 1,45 | 1,32 | 1,53 | 1,11 |
| Lu | 0,07 | 0,08 | 0,41 | 0,25 | 0,23 | 0,19 | 0,21 | 0,20 | 0,23 | 0,17 |
| U | 1,95 | 1,66 | 2,16 | 1,43 | 1,75 | 1,44 | 1,24 | 1,03 | 1,28 | 0,83 |
| Hf | 2,8 | 3,57 | 4,37 | 4,46 | 4,27 | 3,19 | 3,23 | 2,93 | 3,56 | 3,66 |
| Ta | 1,12 | 0,46 | - | - | - | 0,52 | 0,56 | 0,48 | 0,54 | 0,57 |
| Eu/Eu* | 0,85 | 1,92 | 1,46 | 0,89 | 0,77 | 0,76 | 0,63 | 0,78 | 0,73 | 0,74 |

Примечание. Д – дайковые тела, ЦТ и ЮТ – Центральное и Южное субвулканическое тело соответственно.

Note. D – dyke bodies, ЦТ – Central body and ЮТ – Southern subvolcanic body.

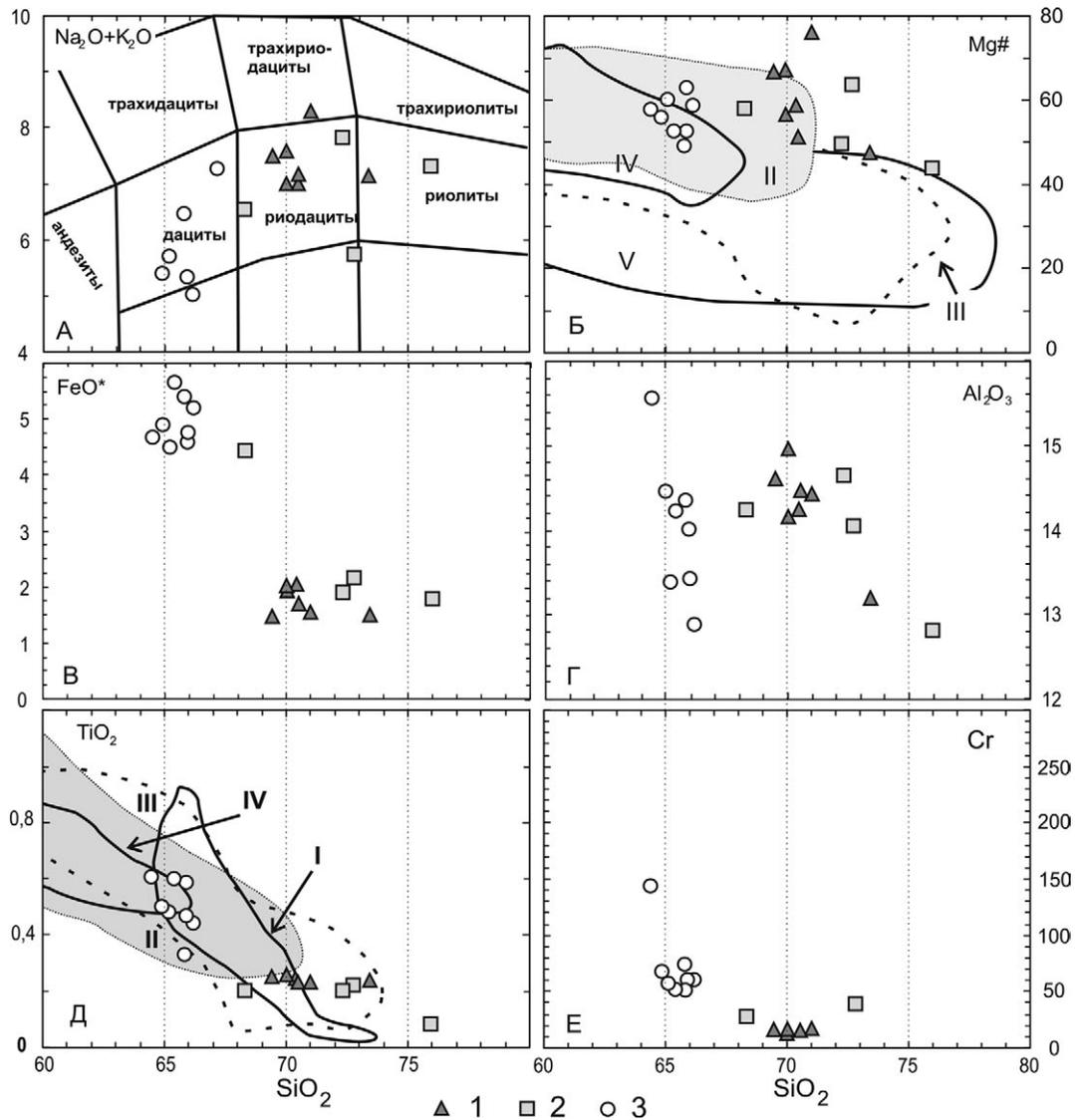


Рис. 3. Бинарные диаграммы $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, FeO^* , TiO_2 , Al_2O_3 (мас. %), Mg\# (атомное отношение $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$), Cr (г/т) для субвулканической дацит-риолитовой ассоциации Койкарского домена: 1 – дайки, 2 – ЦТ, 3 – ЮТ. Для сопоставления показаны поля составов фанерозойских адакитов (I, II), континентальных адакитов С-типа (III) и экспериментальных данных по плавлению метабазальтов и эклогитов (IV) по: [Eyuboglu et al., 2012]

Fig. 3. Binary diagrams of $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, FeO^* , TiO_2 , Al_2O_3 (wt. %), Mg\# (atomic ratio of $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg})$), Cr (ppm) for the subvolcanic dacite-rhyolite association of the Koikary domain: 1 – dykes, 2 – Central body, 3 – Southern body. The composition fields of the Phanerozoic adakites (I, II), C-type continental adakites (III), and the experimental data on the melting of metabasalts and eclogites (IV) are shown after [Eyuboglu et al., 2012] for comparison

позволяют ориентировочно оценить время образования дайкового комплекса и внедрение крупных субвулканических тел в Койкарском домене в интервале 2,95–2,90 млрд лет. В таком случае составные части данного комплекса могут быть связаны с динамической эволюцией конвергентной системы, отражая смену режимов магмогенерации и глубины заложения источников первичных расплавов.

Изучение Sm-Nd изотопной системы кислых субвулканических Койкарского домена показало,

что породы дайкового комплекса и ЮТ имеют значения ϵNd (2935 млн лет) = $+2,23 \pm 1,53$, близкие к характеристике деплетированной мантии, а субвулканические ЦТ – ϵNd (2935 млн лет) = $-6,47$ (рис. 6; табл. 2), что соответствует коровому источнику первичного материала.

Расчет модельного возраста источника вещества (T_{DM} , табл. 2) риодацитов дайкового комплекса и дацитов Южного субвулканического тела, по модели: [De Paolo et al., 1991], составляет 3036 ± 109 млн лет, в то время как

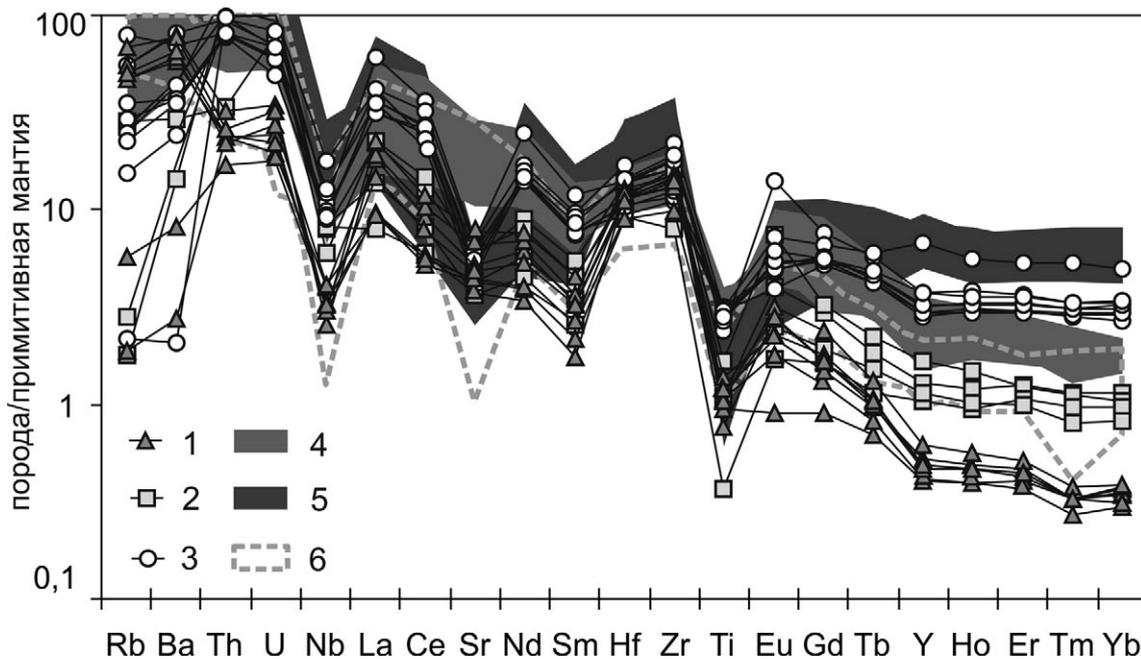


Рис. 4. Распределение редких и редкоземельных элементов в субвулканической дацит-риолитовой ассоциации Койкарского домена (1 – дайки, 2 – ЦТ, 3 – ЮТ), а также адакитовой (4) и дацит-риолитовой (5) серий Ведлозерско-Сегозерского [Светов, 2009] и адакитовой (6) Сумозерско-Кенозерского зеленокаменного пояса по: [Samsonov et al., 2005]. Нормировано по примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989]

Fig. 4. Distribution of rare and rare-earth elements in the subvolcanic dacite-rhyolite association of the Koikary domain (1 – dykes, 2 – Central body, 3 – Southern body), as well as adakite series (4) and dacite-rhyolite series (5) of the Vedlozero-Segozero greenstone belt [Svetov, 2009], and adakite series (6) of the Sumozero-Kenozero greenstone belt after [Samsonov et al., 2005]. The REE contents are normalized to primitive mantle [Sun, McDonough, 1989]

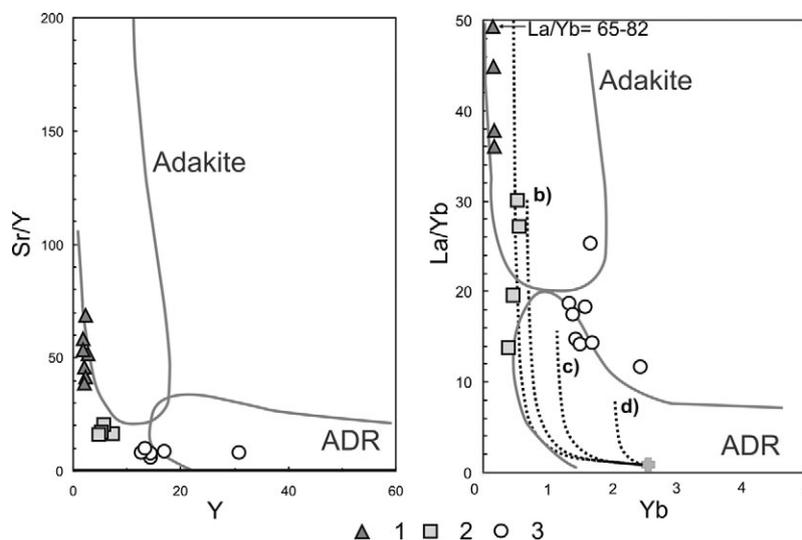


Рис. 5. Бинарные диаграммы Sr/Y-Y (г/г) и La/Yb-Yb (г/г) для мезоархейской субвулканической дацит-риолитовой ассоциации Койкарского домена (1 – дайки, 2 – ЦТ, 3 – ЮТ). Для сравнения показаны поля адакитовой и АДР-серий фанерозойского возраста по: [Castillo, 2012]. Пунктирными линиями показаны тренды частичного плавления: а) эклогита (50:50 Px: Grt); б) 25 % Grt-амфиболита; в) 10 % Grt-амфиболита; д) амфиболита [Castillo, 2012]

Fig. 5. Binary diagrams of Sr/Y-Y (ppm) and La/Yb-Yb (ppm) for the Mesoarchean subvolcanic dacite-rhyolite association of the Koikary domain (1 – dykes, 2 – Central body, 3 – Southern body). The fields of adakite and ADR-series of the Phanerozoic age are shown after [Castillo, 2012]. Dashed lines show the trends of partial melting of: a) eclogite (50:50 Px: Grt); b) 25 % Grt-amphibolite; c) 10 % Grt-amphibolite; d) amphibolite [Castillo, 2012]

Таблица 2. Результаты Sm-Nd-анализа пород дацит-риолитовой ассоциации Койкарского домена

Table 2. Results of Sm-Nd analysis of the dacite-rhyolite association rocks of the Koikary domain

| Проба Sample | Порода Rock | Sm, ppm | Nd, ppm | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | ϵNd | T_{DM} |
|-----------------|------------------------|---------|---------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------|
| 1-2 | Риодацит Rhyodacite | 1.21 | 7.34 | 0.099356 | 0.510810 | 1.15 | 3102 |
| 1-4 | Риодацит Rhyodacite | 1.32 | 8.21 | 0.097132 | 0.510771 | 1.23 | 3093 |
| 1-5 | Риодацит Rhyodacite | 1,01 | 5,88 | 0,104031 | 0,510931 | 1.75 | 3067 |
| 1-7 | Риодацит Rhyodacite | 0,80 | 5,21 | 0,092998 | 0,510820 | 3.77 | 2927 |
| 2-3 | Риолит Rhyolite | 1,37 | 7,54 | 0,109915 | 0,510627 | -6.47 | 3678 |
| 3-1 | Дациит Dacite | 4,57 | 29,6 | 0,093432 | 0,510786 | 2.93 | 2980 |
| 3-3 | Дациит Dacite | 3,68 | 20,8 | 0,106943 | 0,510935 | 0.72 | 3145 |

Примечание. ϵNd (2935 млн лет) и T_{DM} рассчитаны по модели: [De Paolo et al., 1991].

Note. ϵNd (2935 Ma) and T_{DM} were calculated by the model after [De Paolo et al., 1991].

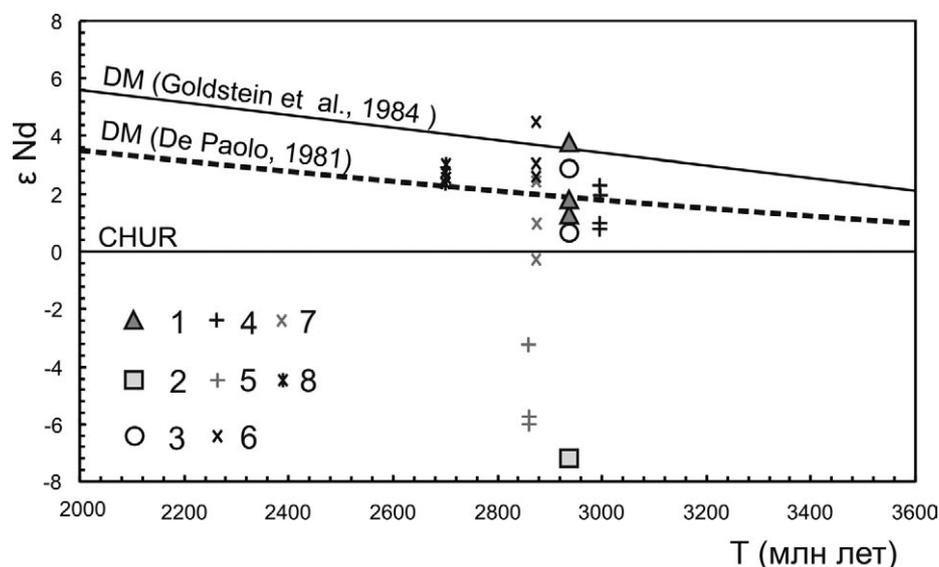


Рис. 6. Диаграмма $\epsilon\text{Nd} - T$ для мезоархейской субвулканической дацит-риолитовой ассоциации Койкарского домена (1 – дайки, 2 – ЦТ, 3 – ЮТ). Для сравнения показаны данные по мезо-неоархейским комплексам Ведлозерско-Сегозерского (4 – адакиты, 5 – островодужные дацит-риолиты) и Сумозерско-Кенозерского (6 – адакиты, 7 – островодужные дацит-риолиты) зеленокаменных поясов Карельского кратона [Puchtel et al., 1999; Светов, 2009] и провинции Супериор (8 – адакиты), Канадский щит [Polat, Munker, 2004]. Линиями на диаграмме показаны тренды изменения Sm-Nd-отношения во времени для деплетированной мантии (DM) по: [Goldstein et al., 1984; De Paolo et al., 1991] и однородного хондритового резервуара (CHUR)

Fig. 6. $\epsilon\text{Nd} - T$ diagram for the Mesoarchean subvolcanic dacite-rhyolite association of the Koikary domain (1 – dykes, 2 – Central body, 3 – Southern body). Data on the Meso-Neoarchean complexes of the Velozero-Segozero greenstone belt (4 – adakites, 5 – island-arc dacite-rhyolites) and the Sumozero-Kenozero greenstone belt (6 – adakites, 7 – island-arc dacite-rhyolites) of the Karelian craton [Puchtel et al., 1999; Svetov, 2009], and the Superior province (8 – Adakites), Canadian Shield [Polat, Munker, 2004] are given for comparison. The lines in the diagram show evolution trends of the Sm-Nd ratio over time for depleted mantle (DM) after [Goldstein et al., 1984; De Paolo et al., 1991] and a homogeneous chondritic reservoir (CHUR)

расчетные значения для риолитов Центрального субвулканического тела существенно древнее – 3678 млн лет.

Таким образом, анализ геохимических данных и Sm-Nd-системы субвулканических пород Койкарского домена показал существенную гетерогенность изучаемого комплекса (ранее считавшегося однородным), который мог формироваться в разноглубинных условиях и имел контрастный химический и «возрастной» состав источников расплава.

Следует подчеркнуть, что полученные данные хорошо коррелируются с результатами изучения адакитовых и дацит-риолитовых серий, сформированных в зеленокаменных комплексах обрамления Водлозерского блока [Puchtel et al., 1999; Светов, 2009], и укладываются в существующие модели формирования субвулканических провинции Супериор [Polat, Munker, 2004] (рис. 6).

Заключение

В ходе геологического, минералогического и геохимического изучения субвулканического комплекса Койкарского домена получены следующие результаты:

- 1) Установлена геохимическая гетерогенность субвулканического комплекса, что проявлено в содержании как петрогенных элементов, так и элементов-примесей.
- 2) Петрографическое изучение пород показало, что геохимические группы субвулканических пород могут быть диагностированы по различиям в их минеральном составе, в частности, по морфологии и составу порфировых вкрапленников.
- 3) В изучаемом комплексе выделены породы, характеризующиеся существенным выносом K, Rb, Ba, что, возможно, связано с формированием региональной сдвиговой зоны.
- 4) Предложены модели формирования субвулканического комплекса. Так, дайковый комплекс (подобный по составу адакитам, имеющим фракционированное распределение РЗЭ и отрицательные аномалии по Nb, Sr и Ti) мог формироваться непосредственно в ходе плавления субдуцируемого базальтового слэба, в то время как породы Южного субвулканического тела (имеющие высокое содержание Sr, Ni, Ti, Nb и тяжелых РЗЭ) генерировались из вещества метасоматизированного мантийного клина, а составы Центрального субвулканического тела могли быть гибридными магмами, отражающими взаимодействие островодужных расплавов с материалом континентальной коры.

- 5) Sm-Nd-систематика субвулканических пород дацит-риолитовых серий подтверждает существование контрастных составов мантийных источников для дайкового комплекса и пород Южного и Центрального субвулканических тел.

Таким образом, накопленная минералогическая и геохимическая характеристика дацит-риолитовой субвулканической ассоциации позволяет проводить типизацию пород в пределах всего Водлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса и может стать надежной основой для продолжения геохронологических исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке темы НИР ИГ КарНЦ РАН № АААА-А18-118020290085-4 «Общие закономерности развития тектоносферы и биосферы Земли в раннем докембрии (на примере Восточной Фенноскандии): анализ магматических, метаморфических систем, их металлогении и ранней жизни».

Автор благодарит С. А. Светова, В. Ф. Смолькина, А. В. Самсонова, А. В. Степанову и С. Ю. Чаженину за детальное и во многом критическое обсуждение полученных результатов, что позволило проанализировать и интерпретировать весь накопленный материал. Автор особо признателен Т. Б. Баяновой, руководителю Лаборатории геохронологии и изотопной геохимии Геологического института КНЦ РАН, г. Апатиты, за содействие в проведении Sm-Nd-анализа пород, без которого завершение работы было бы невозможно, а также всем сотрудникам аналитических лабораторий ИГ КарНЦ РАН и ГИ КНЦ РАН.

Литература

- Бакаева А. В.* Матрикс полимиктовых конгломератов неархейского молассоидного бассейна Койкарского домена: геохимическая характеристика, источники материала // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 2. С. 111–121. doi: 10.17076/geo766
- Бакаева А. В., Чаженина С. Ю., Светов С. А.* Реликт мезоархейской коры выветривания коматитов Койкарской структуры (Центральная Карелия) // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2017. Т. 62, вып. 2. С. 119–140.
- Бибикова Е. В., Крылов И. Н.* Изотопный возраст кислых вулканических пород докембрия Карелии // ДАН СССР. 1983. Т. 268, № 5. С. 189–191.
- Король Н. Е.* Метаморфизм лопийских образований Койкарской структуры // Минералогия магматических и метаморфических пород докембрия Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. С. 120–135.
- Лобач-Жученко С. Б., Арестова Н. А., Коваленко А. В., Крылов И. Н.* Фенно-Карельская гранит-зеленокаменная область. Водлозерский

домен // Ранний докембрий Балтийского щита / Ред. В. А. Глебовицкий. СПб.: Наука, 2005. С. 290–343.

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

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

Светов С. А. Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 115 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. РЗЭ систематика верхнеархейских осадочных парагенезов Центральной Карелии // ДАН. 2004. Т. 394, № 3. С. 393–398.

Светов С. А., Гоголев М. А., Светова А. И., Назарова Т. Н. Ксенолиты и автолиты в древнейшей адакитовой серии Фенноскандинавского щита // Труды КарНЦ РАН. 2012. № 3. С. 122–136.

Светов С. А., Иващенко В. И., Рыбникова З. П., Гоголев М. А., Назарова Т. Н. Неорхейская (2,60 млрд лет) реактивация сдвиговых зон и орогенных золоторудных систем в западном сегменте водлозерского террейна // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 10. С. 63–80. doi: 10.17076/geo360

Светов С. А., Светова А. И., Назарова Т. Н. Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс Центральной Карелии – новые геохронологические данные и интерпретация результатов // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. Вып. 13. С. 5–12.

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-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

Серов П. А., Екимова Н. А., Баянова Т. Б., Митрофанов Ф. П. Сульфидные минералы – новые геохронометры при Sm-Nd датировании рудогенеза слоенных мафит-ультрамафитовых интрузивов Балтийского щита // Литосфера. 2014. № 4. С. 11–21.

Стратиграфия докембрия Карелии. Опорные разрезы верхнеархейских отложений / Ред. С. И. Рыбаков. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 191 с.

Arestova N. A., Chekulaev V. P., Matveeva L. V., Kucherovskii G. A., Lepikhina E. N., Sergeev S. A. New Age Data on the Archean Rocks of the Vodlozero Domain, Baltic Shield, and Their Significance for Geodynamic Reconstructions // Doklady Earth Sciences. 2012. Vol. 442, part 1. P. 1–7.

Castillo P. R. Adakite petrogenesis // Lithos. 2012. Vol. 134–135. P. 304–316. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.013

De Paolo D. J., Linn A. M., Schubert G. The continental crustal age distribution: methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data

and application to the cordilleran Southwestern United States // J. Geophys. 1991. Res. 96. P. 2071–2088.

Eyuboglu Y., Santosh M., Keewook Y., Bektaş O., Kwon S. Discovery of Miocene adakitic dacite from the Eastern Pontides Belt (NE Turkey) and a revised geodynamic model for the late Cenozoic evolution of the Eastern Mediterranean region // Lithos. 2012. Vol. 146–147. P. 218–232. doi: 10.1016/j.lithos.2012.04.034

Goldstein S. L., Onions R. K., Hamilton P. J. A. Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems // Earth and Planetary Science Letters. 1984. Vol. 70(2). P. 221–236.

Lobach-Zhuchenko S. B., Arestova N. A., Chekulaev V. P., Levchenkov O. A., Krylov I. N., Levsky L. K., Bogomolov E. S., Kovalenko A. V. Evolution of the Yuzhno-Vygozero Greenstone Belt, Karelia // Petrology. 1999. Vol. 7, no. 2. P. 160–176.

Martin H., Smithies R. H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationship and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. Vol. 79. P. 1–24. doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.048

Myskova T. A., Zhitnikova I. A., L'vov P. A. Late Archean intermediate-felsic magmatism of the South Vygozersky and Kamennozersky greenstone structures of Central Karelia // Stratigraphy and Geological Correlation. 2015. Vol. 23(4). P. 351–374. doi: 10.1134/S0869593815040061

Polat A., Munker C. Hf-Nd isotope evidence for contemporaneous subduction processes in the source of late Archean arc lavas from the Superior Province, Canada // Chemical Geology. 2004. Vol. 213. P. 403–429. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.08.016

Puchtel I. S., Hofmann A. W., Amelin Y. V., Garbeschönberg C.-D., Samsonov A. V., Shchipansky A. A. Combined mantle plume-island arc model for the formation of the 2.9 Ga Sumozero-Kenozero greenstone belt, SE Baltic Shield: isotope and trace element constraints // Geochim. Cosmochim. Acta. 1999. Vol. 63. P. 3579–3595.

Samsonov A. V., Bogina M. M., Bibikova E. V., Petrova A. Y., Shchipansky A. A. The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: implications for the tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield // Lithos. 2005. Vol. 79. P. 83–106. doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.051

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Balagansky V. V., Sorjonen-Ward P., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean of the Baltic Shield: geology, geochronology, and geodynamic settings // Geotectonics. 2006. Vol. 40, no. 6. P. 409–433. doi: 10.1134/S001685210606001X

Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes // A. D. Saunders, M. J. Norry (eds.). Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. Vol. 42. P. 313–345.

Wilson M. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. London, 1989. 466 p.

Поступила в редакцию 10.01.2018

References

Bakaeva A. V. Matriks polimiktovykh konglomeratov neoarkheiskogo molassoidnogo basseina Koikarskogo domena: geokhimicheskaya kharakteristika, istochniki materiala [Matrix-supported polymictic conglomerates of the Neoarchean molassoid basin of the Koikary domain: geochemical characteristics, sources of material]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 2. P. 111–121. doi: 10.17076/geo766

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 Sankt-Petersburgskogo universiteta* [Vestnik SPbSU]. 2017. Vol. 62, iss. 2. P. 119–140.

Bibikova E. V., Krylov I. N. Izotopnyi vozrast kisl'ykh vulkanitov Karelii [Isotopic dating of acid volcanites in Karelia]. *DAN SSSR* [Proceed. USSR AS]. 1983. Vol. 268, no. 5. P. 189–191.

Korol' N. E. Metamorfizm lopiiskikh obrazovaniy Koikarskoi struktury [Metamorphism of the Lopian units of the Koikary structure]. *Mineralogiya magmaticheskikh i metamorficheskikh porod dokembriya Karelii* [Mineral. of Magmatic and Metamorphic Rocks of the Precambrian in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1994. P. 120–135.

Lobach-Zhuchenko S. B., Arestova N. A., Kovalenko A. V., Krylov I. N. Fenno-Karel'skaya granit-zelenokamennaya oblast'. Vodlozerskii domen [Fenno-Karelian granite-greenstone region. Vodlozero domain]. *Rannii dokembrii Baltiiskogo shchita* [Early Precambrian Baltic Shield]. St. Petersburg: Nauka, 2005. P. 290–343.

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

Serov P. A., Ekimova N. A., Bayanova T. B., Mitrofanov F. P. Sul'fidnye mineraly – novye geokhronometry pri Sm-Nd datirovaniy rudogeneza rassloennykh mafitul'tramafitovykh intruzivov Baltiiskogo shchita [Sulphide minerals as new Sm-Nd geochronometers for ore genesis dating of mafic-ultramafic layered intrusions of the Baltic Shield]. *Litosfera* [Lithosphere]. 2014. No. 4. P. 11–21.

Stratigrafiya dokembriya Karelii. Opornye razrezy verkhnearkheiskikh otlozhenii [Stratigraphy of the Precambrian of Karelia. Reference sections of the Upper Archaean deposits]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1992. 190 p.

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

Svetov S. A. Drevneishie adakity Fennoskandinavskogo shchita [The oldest adakites of the Fennoscandian Shield]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2009. 115 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. RZE sistematika verkhnearkheiskikh osadochnykh paragenezov Tsentral'noi Karelii [The REE systematics of Upper Archean sedimentary assemblages in Central Karelia]. *DAN* [Dokl. Earth Sci.]. 2004. Vol. 394, no. 3. P. 393–398.

Svetov S. A., Gogolev M. A., Svetova A. I., Nazarova T. N. Ksenolity i avtolity v drevneishei adakitovoi serii Fennoskandinavskogo shchita [Xenoliths and autoliths in the ancient adakite series of the Fennoscandian Shield]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2012. No. 3. P. 122–136.

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 [Neoarchaeon (2.60 Ga) reactivation of shear zones and orogenic gold systems in the Western segment of the Vodlozero terrane]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 10. P. 63–80. doi: 10.17076/geo360

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Rybnikova Z. P., Mikhailova A. I., Paramonov A. S., Utitsyna V. L., Ekhoval M. V., Kolodei V. S. Pretsizionnyi (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornykh 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. No. 7. P. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Svetov S. A., Svetova A. I., Nazarova T. N. Vedlozersko-Segozerskii zelenokamennyi poyas Tsentral'noi Karelii – novye geokhronologicheskie dannye i interpretatsiya rezul'tatov [Vodlozero-Segozero greenstone belt, Central Karelia: new geochronological data and interpretation of results]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2010. Iss. 13. P. 5–12.

Arestova N. A., Chekulaev V. P., Matveeva L. V., Kucherovskii G. A., Lepekhina E. N., Sergeev S. A. New Age Data on the Archean Rocks of the Vodlozero Domain, Baltic Shield, and Their Significance for Geodynamic Reconstructions. *Doklady Earth Sciences*. 2012. Vol. 442, part 1. P. 1–7.

Castillo P. R. Adakite petrogenesis. *Lithos*. 2012. Vol. 134–135. P. 304–316. doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.013

De Paolo D. J., Linn A. M., Schubert G. The continental crustal age distribution: methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and application to the cordilleran Southwestern United States. *J. Geophys.* 1991. Res. 96. P. 2071–2088.

Eyuboglu Y., Santosh M., Keewook Y., Bektaş O., Kwon S. Discovery of Miocene adakitic dacite from the Eastern Pontides Belt (NE Turkey) and a revised geodynamic model for the late Cenozoic evolution of the Eastern Mediterranean region. *Lithos*. 2012. Vol. 146–147. P. 218–232. doi: 10.1016/j.lithos.2012.04.034

Goldstein S. L., Onions R. K., Hamilton P. J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth and Planetary Science Letters*. 1984. Vol. 70(2). P. 221–236.

Lobach-Zhuchenko S. B., Arestova N. A., Chekulaev V. P., Levchenkov O. A., Krylov I. N., Levskii L., Bogomolov E. S., Kovalenko A. V. Evolution of the Yuzhno-Vygozero Greenstone Belt, Karelia. *Petrology*. 1999. Vol. 7, no. 2. P. 160–176.

Martin H., Smithies R. H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationship and some implications for crustal evolution. *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 1–24. doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.048

Myskova T. A., Zhitnikova I. A., L'vov P. A. Late Archean intermediate-felsic magmatism of the South Vygozersky and Kamennozersky greenstone structures of Central Karelia. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2015. Vol. 23(4). P. 351–374. doi: 10.1134/S0869593815040061

Polat A., Munker C. Hf–Nd isotope evidence for contemporaneous subduction processes in the source of late Archean arc lavas from the Superior Province, Canada. *Chemical Geology*. 2004. Vol. 213. P. 403–429. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.08.016

Puchtel I. S., Hofmann A. W., Amelin Y. V., Garbeschönberg C.-D., Samsonov A. V., Shchipansky A. A. Combined mantle plume-island arc model for the formation of the 2.9 Ga Sumozero-Kenozero greenstone

belt, SE Baltic Shield: isotope and trace element constraints. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1999. Vol. 63. P. 3579–3595.

Samsonov A. V., Bogina M. M., Bibikova E. V., Petrova A. Y., Shchipansky A. A. The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: implications for the tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield. *Lithos*. 2005. Vol. 79. P. 83–106. doi: 10.1016/j.lithos.2004.04.051

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Balagansky V. V., Sorjonen-Ward P., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archean of the Baltic Shield: geology, geochronology, and geodynamic settings. *Geotectonics*. 2006. Vol. 40, no. 6. P. 409–433. doi: 10.1134/S001685210606001X

Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. Vol. 42. P. 313–345.

Wilson M. Igneous petrogenesis: a global tectonic approach. London, 1989. 466 p.

Received January 10, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Гоголев Максим Александрович

младший научный сотрудник
Институт геологии Карельского научного центра РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: mag-333@mail.ru
тел.: (8142) 782753

CONTRIBUTOR:

Gogolev, Maxim

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: mag-333@mail.ru
tel.: (8142) 782753