

УДК 55:550.42:551.7:553.491

Е.Л. Кунаккузин, Т.Б. Баянова, Л.И. Нерович,
Е.С. Борисенко, П.А. Серов, Д.В. Елизаров

Новые Nd-Sr изотопно-геохимические исследования пород палеопротерозойского ЭПГ-содержащего массива Мончетундра (Фенноскандинавский щит)

E.L. Kunakkuzin, T.B. Bayanova, L.I. Nerovich,
E.S. Borisenko, P.A. Serov, D.V. Elizarov

New Nd-Sr isotope-geochemical research of the paleoproterozoic PGE-bearing Monchetundra massif rocks (the Fennoscandian Shield)

Аннотация. Представлены результаты Nd-Sr исследований для пород ЭПГ-содержащего массива Мончетундра. Новые данные свидетельствуют, что разновозрастные комплексы массива имеют различия в изотопно-геохимических характеристиках. Самые древние породы массива – метагаббро (2 520 млн лет) характеризуются широкими вариациями величин $\epsilon_{Nd}(T)$ от +0.02 до -2.23, а также мезо- и палеоархейскими значениями модельных возрастов. Трахитоидные габбронориты (2 500 млн лет) характеризуются значениями величины $\epsilon_{Nd}(T)$ от -1.70 до +1.42, модельные возраста протолитов (T_{DM}) соответствуют диапазону от 3.5 до 2.7 млрд лет. Значения величины $\epsilon_{Nd}(T)$ для массивных габброноритов (2 470 млн лет) изменяются от -3.38 до +2.08, а модельные Sm-Nd возраста протолитов (T_{DM}) находятся в пределах от 3.4 до 2.7 млрд лет. Гнездовые габбро-пегматиты (2 450 млн лет) имеют как пространственную, так и генетическую связь с массивными габброноритами и, соответственно, схожие изотопно-геохимические характеристики. Габбронориты с высокими положительными значениями величины $\epsilon_{Nd}(T)$ от +1.42 до +2.08, а также близкими к 2.7 млрд лет модельными возрастными являются производными деплетированного мантийного источника. В целом, Nd-Sr изотопно-геохимические данные свидетельствуют о формировании основных разновидностей пород массива Мончетундра из обогащенного литофильными элементами мантийного источника. Разброс значений между группами пород, скорее всего, связан с эволюцией мантийного источника в процессе плюм-литосферного взаимодействия.

Abstract. This paper presents results of Nd-Sr research for mafic rocks from the PGE-bearing Monchetundra massif, the Main Ridge. According to the new isotopic data mafic rocks of the massif different in age are characterized by various isotopic and geochemical characteristics. The oldest rocks of the massif (2520 Ma) show a wide range of $\epsilon_{Nd}(T)$ values between +0.02 and -2.23 and Mezo- to Paleo-Archean T_{DM} ages. Trachytoid gabbronorites (2500 Ma) have $\epsilon_{Nd}(T)$ values in the range of -1.70 to +1.42 and T_{DM} ages of 2.7 Ga to 3.5 Ga. The $\epsilon_{Nd}(T)$ values for massive gabbronorites vary between -3.38 and +2.08, and T_{DM} ages for them are in the range from 2.7 Ga to 3.4 Ga. Segregations of gabbro-pegmatites (2450 Ma) are spatially and genetically associated with massive gabbronorites and have similar isotopic and geochemical characteristics. Gabbros with high positive values $\epsilon_{Nd}(T)$ of +1.42 to +2.08 as well as T_{DM} close to 2.7 Ga appear to be derived from a depleted mantle source. In general the Nd-Sr isotopic and geochemical data indicate that the main varieties of Monchetundra rocks have formed from mantle source enriched in large ion lithophile elements. The most likely reason of values scatter is evolution of the mantle source during the plume-lithosphere interaction.

Ключевые слова: изотопная геохимия, Nd-Sr изотопия, U-Pb геохронология, расслоенные интрузии, Фенноскандинавский щит
Key words: isotope geochemistry, Nd-Sr isotope, U-Pb geochronology, layered intrusions, the Fennoscandian Shield

1. Введение

Массив Мончетундра расположен в центральной части Кольского полуострова и является восточным отрогом крупнейшего габбро-анортозитового массива Главного хребта, который относится к палеопротерозойским образованиям Кольского региона. Структурно-тектоническое положение интрузива определяется его приуроченностью к области сочленения Беломорского и Центрально-Кольского мегаблоков с палеорифтогенной Печенга-Имандра-Варзугской структурой. Массив имеет форму вытянутого в северо-западном направлении овала, его протяженность около 30 км, ширина – 2-6 км, общая площадь интрузива – около 120 кв. км. С востока и юго-востока массив отделен от Мончеплутона зоной Мончетундровского разлома, с запада ограничен Витегубско-Сейдозерским разломом (Расслоенные интрузии..., 2004; Нерович и др., 2009). Наряду с такими рудоносными массивами, как Федорово-Панский, гора Генеральская, Мончеплутон, которые содержат месторождения и проявления

Pt-Pd и Cu-Ni руд, массив Мончетундра является перспективным объектом на обнаружение промышленной благородной минерализации (Гроховская и др., 2003; Нерович и др., 2009).

Цель работы – выявить основные изотопно-геохимические особенности, а также возможные источники образования основных пород массива Мончетундра, используя Sm-Nd, U-Pb и Rb-Sr изотопные методы по породам и минералам.

2. Строение массива Мончетундра

В вертикальном разрезе массива разными исследователями выделяется от двух до пяти зон (Шарков и др., 2002; *Расслоенные интрузии...*, 2004; Назимова, Райан, 2008; Нерович и др., 2009). На основании интерпретации изотопных U-Pb возрастных данных в массиве можно выделить четыре разновозрастные группы пород (табл. 1).

Наиболее древние породы массива с возрастными формированиями 2521±8 млн лет и 2516±12 млн лет (табл. 1), полученными по датированию цирконов U-Pb методом, представлены преимущественно крупнозернистыми массивными амфиболизированными габброидами с зонами рассланцевания и бластомилонитизации. Породы сложены главным образом амфиболом и плагиоклазом, который встречается как в виде реликтовых субтаблитчатых зерен, так и в виде более мелких гранулированных.

Трахитоидные мезократовые габбронориты образуют вторую группу пород массива. Возраста их формирования, полученные U-Pb методом по циркону, равны 2505±6 млн лет, 2501±8 млн лет (табл. 1) и близки к U-Pb возрастам по единичным цирконам 2507.5±7.7 млн лет, 2504.4±2.7 млн лет (табл. 1). Породы данной группы дифференцированы и с ними связана ЭПГ минерализация (Нерович и др., 2009).

Таблица 1. Изотопные U-Pb данные по циркону, бадделеиту и титаниту для пород массива Мончетундра

№ п/п	Проба	Название породы	U-Pb возраст, млн лет
1	MT-5 ¹	Метагаббро	2521±8 (zr)
2	17/106 ²	Метагаббро	2516±12 (zr)
3	M55 ³	Трахитоидный габбронорит	2505±6 (zr)
4	M6 ³	Трахитоидный габбронорит	2501±8 (zr)
5	B20/111 ⁴	Трахитоидный габбронорит	2507.5±7.7 (zr)
6	B19/111 ⁴	Трахитоидный габбронорит	2504.4±2.7 (zd)
7	7/106 ¹	Массивный габбронорит-анортозит	2476±17 (bd)
8	1/106 ¹	Массивный лейкогаббронорит	2471±9 (bd)
9	B13/111 ⁴	Массивное лейкогаббро	2471±2 (zr)
10	MT-4 ¹	Массивный крупнозернистый габбро-анортозит	2456±5 (bd)
11	ГХ-1-90 ⁵	Массивный крупнозернистый габбро-анортозит	2453±4 (zr)
12	43/205 ²	Жила габбро-пегматита	2445.1±1.7 (zr)
13	3/306 ²	Жила аплита	1900±9 (ttn)

Примечание. В скобках указаны минералы, по которым проводились измерения: zr – циркон, bd – бадделеит, ttn – титанит. Цифры в верхнем правом индексе соответствуют следующим литературным источникам: ¹Баянова и др., 2010; ²Нерович и др., 2014; ³*Расслоенные интрузии...*, 2004; ⁴Борисенко и др., 2013; ⁵Митрофанов и др., 1993.

Третья группа пород массива представлена массивными лейкогабброноритами и лейкогаббро. Изотопные U-Pb-возраста, полученные по циркону и бадделеиту, для данных пород составляют 2471±9 млн лет, 2476±17 млн лет и 2471±2 млн лет (табл. 1). Породы данной группы в целом характеризуются хорошей сохранностью первично-магматических минералов и структур. Метаморфические преобразования обычно выражены амфиболовыми, гранат-амфиболовыми и эпидот-амфиболовыми келифитовыми каймами, развитыми на контакте магматических плагиоклаза и пироксенов. Иногда амфибол развивается непосредственно по пироксену. Плагиоклаз часто слабо катаклазирован с образованием блоковой и пятнистой деформационной зональности. По краям зерен иногда отмечается грануляция минерала. Наиболее измененные разновидности данной группы пород характеризуются значительной грануляцией плагиоклаза, сопровождаемой интенсивной сосюритизацией и развитием скаполита; первичные темноцветные минералы (пироксены) либо представлены реликтами, либо полностью замещены светло-зеленым амфиболом. Кроме того, при амфиболизации магматический титаномагнетит преобразуется в магнетит и ильменит.

На заключительном четвертом этапе формировались анортозитовые пегматоидные породы и сингенетичные гнездовые габбро-пегматиты, образующие тела субизометричной формы, мощностью 1-1.5 м, переходящие или без явных контактов в массивные крупнозернистые лейкогаббро и габбро-анортозиты. Наиболее крупные гнезда сопровождаются ответвлениями маломощных жил с титаномагнетитовой и ильменитовой вкрапленностью. Изотопный U-Pb возраст формирования по бадделеиту этих пород равен 2456±5 млн лет, он близок U-Pb возрасту по цирконам 2453±4 млн лет (табл. 1). Согласно последним исследованиям, существуют более молодые жилы габбро-пегматитов с возрастом формирования по цирконам 2445.1±1.7 млн лет, который совпадает с возрастом формирования аналогичных

пород в Имандровском лополите и интрузии г. Островская (Нерович и др., 2014). Жильный тип габбро-пегматитов характеризуется отчетливыми, даже резкими контактами с вмещающими породами.

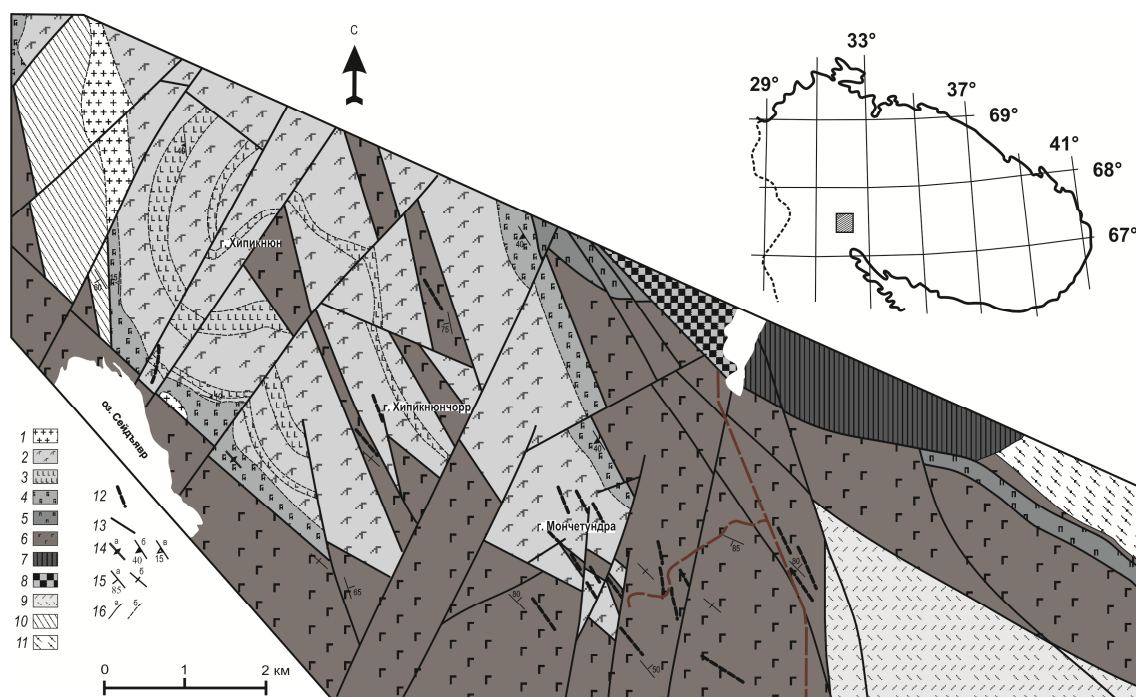


Рис. 1. Схема геологического строения центральной и юго-восточной частей массива Мончетундра (Нерович и др., 2014)

1 – плагиомикроклиновые гранито-гнейсы (пералюминиевые с проявлениями молибденита); 2-5 – Расслоенный комплекс Мончетундровского массива: 2 – лейкократовые габбронориты и нориты, габбронорит-анортозиты, лейкогаббро, габбро-анортозиты верхней зоны. Массивные, крупнозернистые и средне-крупнозернистые; 3 – оливковые лейконориты, лейкогаббронориты, норит-анортозиты верхней зоны, (на СЗ фланге с прослоями плагиоперидотитов). Массивные, крупнозернистые и средне-крупнозернистые; 4 – габбронориты средней зоны (на СЗ фланге с прослоями оливковых габброноритов, троктолитов, анортозитов). Преимущественно трахитоидные, среднезернистые, крупно-среднезернистые; 5 – нориты, пироксениты, габбронориты, реже гарцбургиты и оливиниты нижней зоны; 6 – метагабброиды ранней габбровой серии (мезократовые и мезо-лейкократовые амфибол-плагиоклазовые, реже плагиоклаз – амфиболовые породы. Преимущественно массивные, неравнозернистые с зонами и участками рассланцевания и бластомилонитизации); 7 – Мончеплутон (ортопироксениты горы Сопча); 8 – Дунитовый блок; 9 – метавулканы пялочной, арваренской и кукшинской свит; 10 – преимущественно биотитовые, гранат-биотитовые и гранат-амфибол-биотитовые, реже мусковит-биотитовые гнейсы с линзами и блоками гранат-эпидот-хлоритовых сланцев и амфиболизированных габброидов; 11 – граниты и гранито-гнейсы архейского комплекса; 12 – дайки долеритов; 13 – разрывные нарушения; 14 – первичные горизонтальная (а) и наклонные расслоенность (б) и трахитоидность (в); 15 – метаморфические сланцеватость и полосчатость в зонах рассланцевания и бластомилонитизации: наклонная (а) и вертикальная (б); 16 – границы распространения пород: достоверные (а), предполагаемые и неустановленного генезиса (б).

Наиболее поздние магматические события в пределах массива связаны с формированием аплитовых жил с возрастом $1\,900 \pm 9$ млн лет во время свекофенского орогенеза (Нерович и др., 2014).

В Мончетундровском массиве широко развиты дайковые тела долеритов, габбродолеритов различной мощности и протяженности (Нерович и др., 2009; Нерович и др., 2014) и в пределах юго-восточной части массива – меланократовых троктолитов-гарризитов (Чистяков, Кудряшова, 2010). Базитовые дайки имеют северо-западное простирание и вертикальное и субвертикальное падение. Подробные исследования дайковых комплексов и природы их мантийных источников приведены в работе (Нерович и др., 2014).

В целом, основные породы массива неравномерно метаморфизованы до амфиболитовой фации, с образованием граната, роговой обманки и др. Степень метаморфических преобразований пород увеличивается вблизи разломов, крупнейшим из которых является Мончетундровский разлом, отделяющий изучаемый массив от Мончеплутона. Время заложения данного разлома датируется около 1.9-2.0 млрд лет назад по данным Sm-Nd и Rb-Sr минеральных изохрон для минералов из метагаббро-анортозитов скважины М1 (Шарков и др., 2006). Возраст метаморфических преобразований пород был определен по минералам метаморфического генезиса (гранат, ильменит, измененный плагиоклаз) Sm-Nd методом для трахитоидных габброноритов и составляет 2020 ± 50 млн лет и 2017 ± 38 млн лет (Кунаккузин и др., 2014), что близко ко времени заложения Мончетундровского разлома.

3. Методика Sm-Nd и Rb-Sr изотопно-геохимических исследований

Для Sm-Nd исследований химическое разложение минералов было выполнено из навески массой 50-100 мг, к которой добавлялось соответствующее количество раствора смешанного трассера ^{149}Sm - ^{150}Nd .

Затем навеску обрабатывали концентрированной плавиковой кислотой (5-10 мл) и выдерживали 1.5-2 ч при комнатной температуре. Далее навеску помещали в тefлоновый вкладыш автоклава и проводили разложение в сушильном шкафу при температуре 170 °С в течение нескольких часов. После разложения выпаривали досуха HF и образовавшиеся фториды переводили в хлориды путем упаривания образца 2-3 раза в 4.5-6N HCl. Сухой остаток растворяли в 1мл 2.3N HCl и загружали на первую хроматографическую колонку с катионитом Dowex 50W-8 (200-400 меш). Эта колонка используется для выделения суммы РЗЭ с применением ступенчатого элюирования 2.3 и 4.5N HCl. Выделенную фракцию РЗЭ выпаривали досуха, растворяли в 0.1N HCl и загружали на вторую колонку с ионитом HDEHP на твердом носителе KEL-F. Отобранные фракции Sm и Nd выпаривали, после чего они уже были готовы для последующего масс-спектрометрического анализа.

Измерения изотопного состава неодама и концентраций Sm и Nd проводились на 7-канальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) в статическом двухленточном режиме с использованием ренийевых и танталовых лент. Среднее значение отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте La Jolla за период измерений составило 0.511835 ± 18 (N = 15). Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ соотношениях составляет 0.3 % (2σ) – среднее значение из 7 измерений в стандарте BCR. Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе не превышала 0.005 %. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd равно 0.3 нг и по Sm равно 0.06 нг. Точность определения концентраций Sm и Nd ± 0.5 %. Изотопные отношения были нормализованы по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$, а затем пересчитаны на принятое отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте La Jolla = 0.511860. При расчете величин $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ и модельных возрастов $T_{(\text{DM})}$ использованы современные значения CHUR по (Bouvier *et al.*, 2008) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512630$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1960$) и DM по (Goldstein, Jacobsen, 1988) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2136$).

При Rb-Sr исследованиях для разложения образцов и минералов использовали перегранные кислоты HCl, HF, HNO₃ и H₂O (бидистиллят). Разложение минералов анализируемых образцов (20-100 мг – в зависимости от содержания Rb и Sr и 200 мг породы) проводили в 4 мл смеси HF и HNO₃ (соотношение 5 : 1) в закрытых тefлоновых бюксах в термостате при температуре ~ 200 °С в течение суток. Выделение Rb и Sr проводили методом элюентной хроматографии на смоле "Dowex" 50×8 (200-400 меш). В качестве элюента использовали 1.5N и 2.3N HCl. Объем смолы в использованных колонках ~ 7 см³ и ~ 4 см³. Выделенные фракции Rb и Sr упаривали досуха, а затем обрабатывали несколькими каплями HNO₃. Изотопный состав Sr и определение содержаний Rb и Sr проводили на масс-спектрометре MI-1201-T в одноленточном режиме на танталовых лентах. На ленты подготовленные пробы наносились в нитратной форме. Изотопный состав Sr во всех измеренных образцах был нормализован к величине, рекомендованной NIST SRM-987, равной 0.71034 ± 0.00026 . Погрешности изотопного состава (95 %-й доверительный интервал) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ не превышают ± 0.04 %, определения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ отношений ± 1.0 %. Точность определения концентраций Rb и Sr ± 1.0 %. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Rb равно 2.5 нг и по Sr- 1.2 нг. В расчете возрастов использовались принятые величины констант распада рубидия (Steiger and Jäger, 1977).

4. Новые изотопно-геохимические Sm-Nd данные для базитов массива Мончетундра

Для изучения и интерпретации изотопно-геохимических Sm-Nd данных основных пород массива Мончетундра было выбрано 37 анализов проб главных разновидностей пород из средней и юго-восточной частей массива, отобранных в 2011-2013 гг. во время полевых исследований, проведенных Геологическим институтом Кольского научного центра РАН, а также из литературных источников (Нерович и др., 2009; Баянова и др., 2010). Измеренные Sm-Nd изотопные данные, а также значения величины ϵ_{Nd} и T_{DM} отражены в табл. 2.

Таблица 2. Изотопные Sm-Nd данные для пород массива Мончетундра

Наименование образца	Порода	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	$T(\text{DM})$
Метагабброиды (2.52 млрд лет)							
B17/111	Метагаббро	1.35	6.00	0.1363	0.511635 ± 13	0.02	2969
34/306 ¹	Амфиболитизированное и эпидотитизированное габбро	0.45	1.57	0.1719	0.512206 ± 21	-0.40	3429
37/106 ¹	Эпидот-амфибол-плагиоклазовая порода	0.98	4.00	0.1482	0.511731 ± 27	-1.98	3284
17/106 ¹	Амфибол-плагиоклазовая порода	0.98	5.49	0.1082	0.511053 ± 17	-2.23	3012
ЛН-31/105 ¹	Биотит-эпидот-амфибол-плагиоклазовая порода по габбро	1.55	6.70	0.1395	0.511538 ± 24	-2.93	3292

Трахитоидные габбронориты (2.50 млрд лет)							
A-76/212	Средне-крупнозернистый трахитоидный габбронорит	0.80	2.92	0.1653	0.512128±16	0.14	3207
A-71/212	Средне-крупнозернистый трахитоидный габбронорит	1.02	3.61	0.1714	0.512187±19	-0.67	3455
B20/111	Трахитоидный габбронорит	0.87	3.65	0.1441	0.511794±7	0.44	2958
B19/111	Трахитоидный габбронорит	0.46	1.72	0.1629	0.512049±18	-0.61	3285
ЛН-15/205 ¹	Габбронорит	0.24	1.31	0.1123	0.511319±43	1.42	2740
ЛН-15/105 ¹	Габбронорит	0.58	2.02	0.1744	0.512313±32	0.84	3234
ЛН-14/105 ¹	Габбронорит	0.61	2.19	0.1693	0.51213±26	-1.10	3483
61/106 ¹	Габбронорит	0.50	1.80	0.1689	0.512174±28	-0.12	3309
M5 ²	Трахитоидное габбро	0.94	3.54	0.1595	0.511963±5	-1.21	3320
Массивные габбронориты (2.47 млрд лет)							
A-25/112	Массивный крупнозернистый лейкогаббронорит	0.91	3.53	0.1565	0.511916±18	-1.33	3273
A-30/112	Массивный крупнозернистый лейкогаббронорит	1.25	5.57	0.1355	0.511748±19	2.08	2724
12/6	Оливиновый габбронорит	0.65	2.17	0.1800	0.512393±32	0.54	3407
13/1	Средне-крупнозернистый массивный габбронорит	0.42	1.76	0.1454	0.511795±7	-0.14	3009
B16/111	Массивный габбронорит	0.59	2.45	0.1467	0.511791±20	-0.65	3079
B26/111	Массивный габбронорит	0.31	1.30	0.1427	0.511842±21	1.63	2798
B13/111	Массивный габбронорит	1.00	4.39	0.1379	0.511686±19	0.10	2932
41/106 ¹	Габбронорит-анортзит	0.91	3.71	0.1483	0.511786±29	-1.24	3161
1/106 ¹	Лейкогаббронорит	0.97	3.95	0.1485	0.511749±23	-2.06	3260
23/106 ¹	Габбронорит-анортзит	0.86	3.49	0.1499	0.511769±24	-2.08	3279
7/106 ¹	Габбронорит-анортзит	0.02	0.09	0.1051	0.511028±22	-2.32	2963
7/206 ¹	Габбро-анортзит	0.83	3.52	0.1424	0.51166±33	-1.84	3169
МТ-6 ¹	Лейкогаббронорит	0.48	1.91	0.1527	0.511939±33	0.35	3013
60/106 ¹	Лейкогаббронорит	0.50	2.05	0.1486	0.511682±34	-3.38	3416
50/106 ¹	Габбронорит-анортзит	0.54	2.03	0.1595	0.511972±19	-1.18	3296
ЛН-50/105 ¹	Оливиновый лейконорит	0.54	2.19	0.1499	0.511914±24	0.76	2940
ЛН-58/105 ¹	Лейкогаббронорит	0.34	0.13	0.1451	0.511902±14	2.06	2761
ЛН-55/105 ¹	Оливиновый лейкогаббронорит	0.37	1.62	0.1398	0.511611±28	-1.98	3159
ЛН-41/105 ¹	Оливиновый норит	0.32	1.21	0.1602	0.51201±33	-0.67	3235
ЛН-38/105 ¹	Лейкогаббронорит	0.60	2.46	0.1464	0.511736±20	-1.67	3188
Гнездовые габбро-пегматиты (2.45 млрд лет)							
B57/111	Габбро-пегматит	0.79	3.21	0.1482	0.511774±11	-1.58	3185
60/306 ¹	Пегматоидный лейкогаббронорит	0.68	2.92	0.1405	0.511658±24	-1.41	3091
1/206 ¹	Пегматоидный габбронорит-анортзит	1.65	7.26	0.1374	0.511628±25	-1.02	3026

Примечание. В скобках указано время формирования пород, курсивом – предполагаемое время формирования пород, на который проводился расчет значения ϵ_{Nd} . Цифрами обозначены данные, полученные из: 1 – Нерович и др., 2009, 2 – Баянова и др., 2010.

Можно отметить, что большинство пород массива характеризуются высокими $^{147}Sm/^{144}Nd$ отношениями больше 0.12. Поскольку при таких значениях в породах достоверность использования величины T_{DM} как характеристики времени отделения протолита от мантийного источника ставится под сомнение (Виноградов, 2004), интерпретация значений T_{DM} по одностадийной модели в данной работе носит исключительно сравнительный характер. Самые древние породы массива – метагабброиды, имеют различные, слабо коррелирующиеся между собой Sm-Nd изотопные отношения. Данные породы характеризуются широкими вариациями величин $\epsilon_{Nd}(T)$ от -2.23 до +0.02, а также мезо- и палеоархейскими значениями модельных возрастов (табл. 2, рис. 2). Разброс значений, по всей видимости, связан с наложенными процессами метаморфизма (Шарков и др., 2006) во время заложения Мончегундровского разлома либо с гетерогенностью исходного мантийного резервуара.

На диаграмме $^{144}Nd/^{143}Nd - ^{147}Sm/^{144}Nd$ (рис. 2) показано, что трахитоидные габбронориты в среднем характеризуются более радиогенным изотопным составом Nd по сравнению с другими породами массива. Значения величины ϵ_{Nd} варьируют в данных породах от -1.70 до +1.42, модельные возраста соответствуют диапазону от 3.5 до 2.7 млрд лет (табл. 2, рис. 3).

Значения величины ϵ_{Nd} для массивных габброноритов изменяются от -3.38 до $+2.08$, а модельные Sm-Nd возраста находятся в пределах от 3.4 до 2.7 млрд лет (табл. 2, рис. 3).

Гнездовые габбро-пегматиты характеризуются стабильными отрицательными величинами $\epsilon_{Nd}(T)$ от -1.26 до -0.63 и Sm-Nd модельными Sm-Nd возрастами протолитов от 3.2 до 3.0 млрд лет. Габбропегматиты, имеющие как пространственную, так и генетическую связь с массивными габброноритами, имеют схожие изотопно-геохимические характеристики с последними (табл. 2, рис. 3).

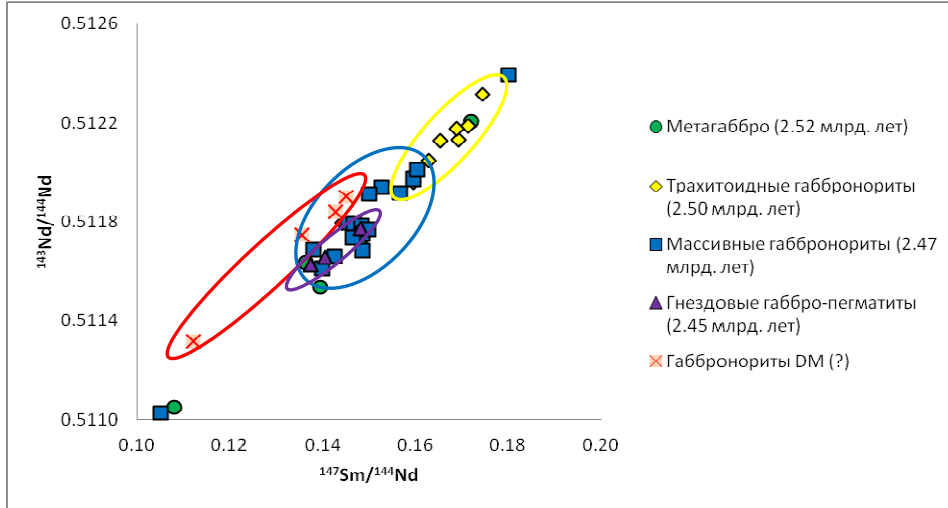


Рис. 2. Диаграмма $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ для габброидов массива Мончетундра. Все изотопные Sm-Nd данные для изучаемых пород приведены в табл. 1

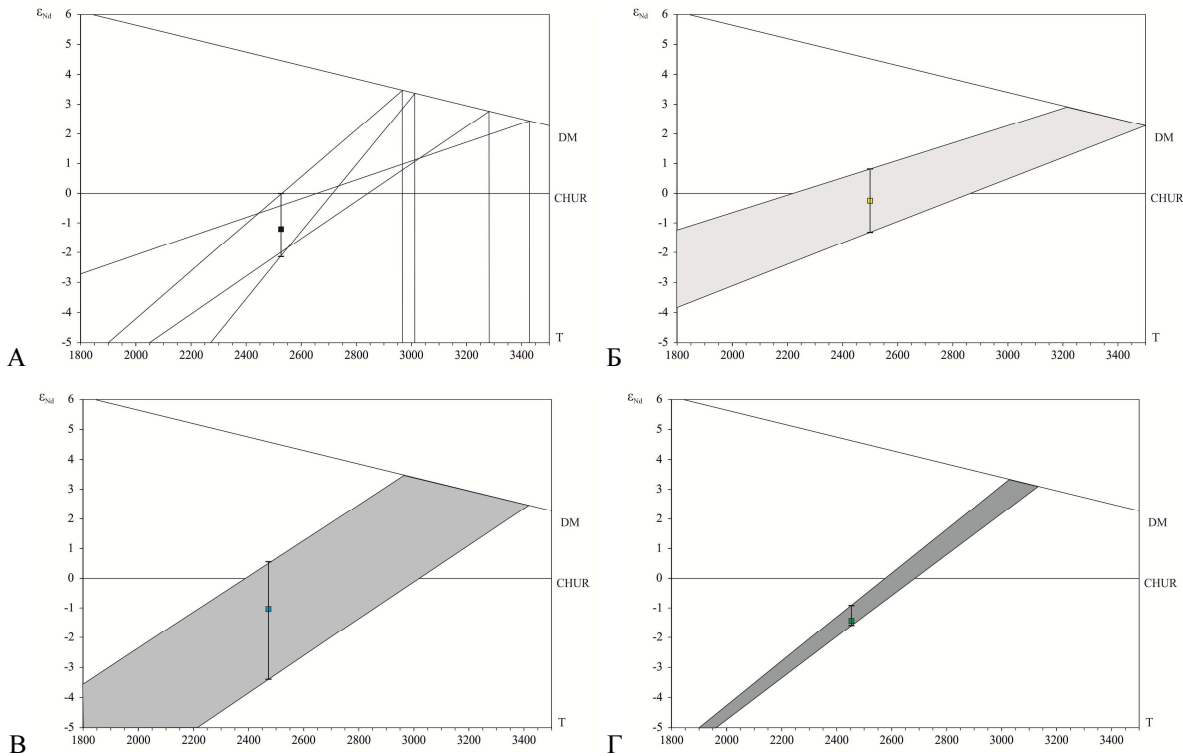


Рис. 3. Диаграммы $\epsilon_{Nd} - T$ для габброидов массива Мончетундра. А – метагабброиды; Б – трахитоидные габбронориты; В – массивные габбронориты; Г – габбропегматиты. Квадратами указаны средние значения ϵ_{Nd} для каждой из групп пород.

Все изотопные Sm-Nd данные для изучаемых пород приведены в табл. 2

Полученные новые Sm-Nd изотопные данные для основных разновидностей пород массива Мончетундра свидетельствуют о том, что большая часть пород с отрицательными величинами ϵ_{Nd} имеют значения T_{DM} от 3.4 до 3.1 млрд лет, а большинство габброидов с положительными величинами ϵ_{Nd} имеют

более молодые значения T_{DM} от 3.0 до 2.7 млрд лет. Особый интерес представляют габбронориты с высокими положительными значениями величины ϵ_{Nd} , а также близкими к 2.7 млрд лет Sm-Nd модельными возрастами (табл. 2, рис. 3), которые являются отличными от пород массива. Данные породы характеризуются отсутствием пространственной связи, как между собой, так и с дайковыми комплексами, имеющими схожие изотопные характеристики (Нерович и др., 2014). Изотопные Nd данные свидетельствуют о том, что породы являются производными деплетированного мантийного источника.

5. Новые изотопные Rb-Sr данные для пород массива Мончетундра

Для интерпретации изотопно-геохимических Rb-Sr данных для пород массива Мончетундра было выбрано 12 анализов из двух групп габброноритов средней и юго-восточной частей массива. Измеренные Rb-Sr концентрации и изотопные отношения, а также значения величины ϵ_{Sr} отражены в табл. 3.

Таблица 3. Изотопные Rb-Sr данные для пород массива Мончетундра

Наименование образца	Порода	Содержание		Изотопные отношения		Первичное отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ (ISr)
		Rb	Sr	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	
Трахитоидные габбронориты (2.50 млрд лет)						
ЛН-14/105	Габбронорит	3,24	177,4	0,0529	0,70404	0,70213±8
ЛН-15/105	Габбронорит	8,42	176,5	0,1380	0,70508	0,70009±8
В14-111	Габбронорит	2,59	228,6	0,0320	0,70527	0,70411±15
В19-111	Габбронорит	2,91	218,8	0,0375	0,70484	0,70348±14
А76-212	Габбронорит	2,70	177,9	0,0428	0,70416	0,70261±15
Массивные габбронориты (2.47 млрд лет)						
1/106	Лейкогаббронорит	3,14	255,7	0,0355	0,70434	0,70306±8
7/106	Габбронорит-анортозит	2,67	192,6	0,0401	0,70408	0,70263±8
ЛН-50/105	Оливиновый лейконорит	1,63	261,5	0,0180	0,70310	0,70245±5
ЛН-55/105	Оливиновый лейкогаббронорит	2,57	265,0	0,0280	0,70362	0,70261±9
В16-111	Габбронорит	2,32	279,7	0,0234	0,70329	0,70244±15
А25-112	Габбронорит	4,00	220,9	0,0511	0,70452	0,70267±16
А19-112	Габбронорит	4,94	195,3	0,0714	0,70415	0,70157±16

Примечание. Значение величины первичного отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ (ISr) рассчитано на возраст формирования пород, согласно U-Pb геохронологическим данным (табл. 1).

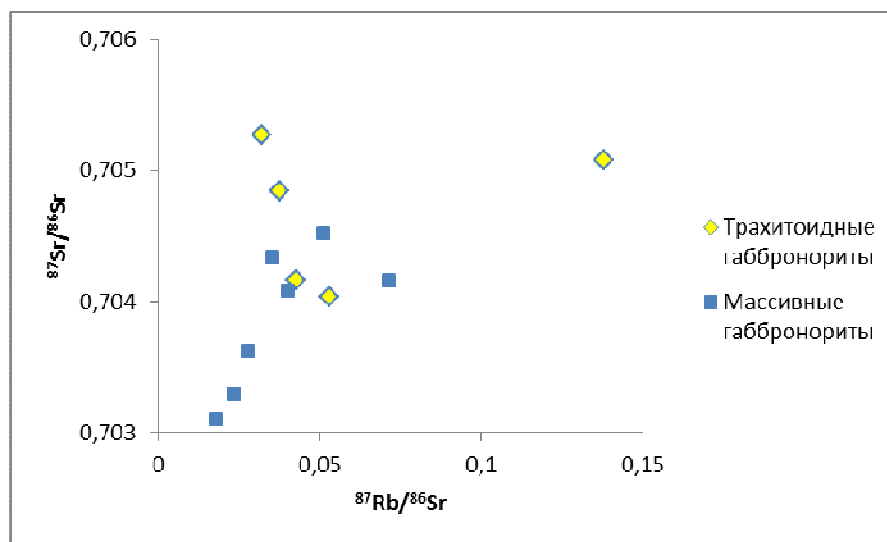


Рис. 4. Диаграмма $^{87}Sr/^{86}Sr - ^{87}Rb/^{86}Sr$ для габброидов массива Мончетундра. Все изотопные Rb-Sr данные приведены в табл. 3

В целом, габбронориты массива Мончетундра характеризуются низкими первичными $^{87}Sr/^{86}Sr$ отношениями, характерными для мантийных пород. По своим Rb-Sr изотопным характеристикам габброиды массива Мончетундра имеют различия между собой. Массивные габбронориты имеют в среднем более высокие содержания Sr и более выдержанные содержания Rb. В трахитоидных габброноритах отмечаются anomalously повышенные для данного типа пород содержания Rb и на диаграмме в изохронных

координатах такие образцы выпадают из поля составов трахитоидных габброноритов. В общем трахитоидные габбронориты характеризуются более радиогенными отношениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ относительно массивных габброноритов (табл. 3, рис. 4).

6. Обсуждение результатов

Формирование пород массива Мончетундра, наряду с аналогичными базит-гипербазитовыми интрузиями Фенноскандинавского щита, такими как Федорово-Панский, массив горы Генеральская, Мончеплутон, Олангская группа, Портимо-Пеникат-Кеми и другие, связано с действием долгоживущего нижнемантийного плюма в интервале 2.52-2.39 млрд лет (Баянова, Митрофанов, 2012; Митрофанов и др., 2013).

На диаграмме (рис. 5) массивные габбронориты массива Мончетундра характеризуются менее радиогенными значениями Nd и Sr относительно трахитоидных габброноритов. Данное различие между породами, скорее всего, заключается в эволюции долгоживущего мантийного резервуара. Вероятно, в процессе воздействия плюма на нижнюю кору он подплавлял последнюю, следовательно, более молодые породы принимали менее радиогенные значения, что отражено в изотопном составе Nd. Но в данном случае контаминация нижней корой должна была отразиться на изотопном составе Sr, что на диаграмме (рис. 5) не наблюдается, следовательно, вклад коровой компоненты в формирование более молодых пород массива Мончетундра можно считать незначительным.

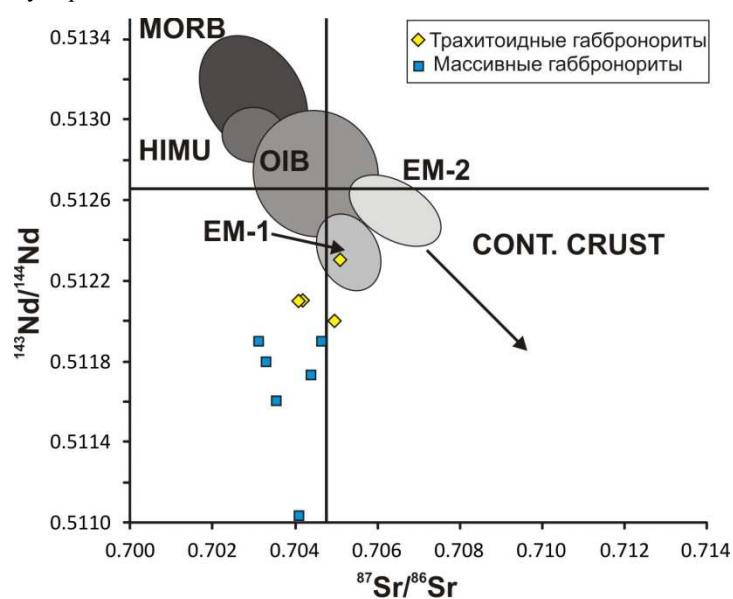


Рис. 5. Зависимость между изотопным составом Nd и Sr для габброноритов массива Мончетундра (данные приведены в табл. 1, 2). Поля MORB, OIB, HIMU, EM-1, EM-2 – по (Hoffman, 1997)

Совокупность Nd и Sr изотопных данных для основных разновидностей пород расслоенных интрузий Фенноскандинавского щита может свидетельствовать о том, что их формирование происходило из мантийного источника обогащенного литофильными элементами типа EM-1 (Bayanova et al., 2009). Однако следует отметить, что среди авторов работы нет полного согласия в вопросе о характере источника. Согласно данным по РЗЭ, породы массива Мончетундра характеризуются очень низкими содержаниями большинства редких элементов. Также преимущественно низкие Nb/U отношения (< 10) не согласуются с источником типа EM-1. Наличие же, хотя и не резкого, но отчетливо выраженного Nb-Ta минимума скорее свидетельствуют в пользу коровой контаминации источника пород (Нерович и др., 2009; Нерович и др., 2014). Но объемы ее для данного массива, по-видимому, невелики. В то же время, в некоторых образцах пород расслоенного комплекса массива Мончетундра отмечаются повышенные значения Nb/U отношения (до 44) при низком содержании самих элементов. Причины этого пока не ясны, но, учитывая результаты изотопных исследований, могут определяться локальным влиянием источника EM-1.

6. Заключение

Результаты изотопно-геохимических Nd-Sr исследований основных пород массива Мончетундра свидетельствуют, что разновозрастные комплексы массива имеют различия в изотопно-геохимических характеристиках.

Самые древние породы массива – метагабброиды характеризуются широкими вариациями величин $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ от +0.02 до -2.23, а также мезо- и палеоархейскими значениями модельных возрастов (табл. 2, рис. 2). Данный разброс значений, по всей видимости, связан с наложенными процессами

метаморфизма во время заложения Мончетундровского разлома (Шарков и др., 2006) либо с гетерогенностью исходного мантийного резервуара.

Трахитоидные габбронориты характеризуются более радиогенным изотопным составом Nd и Sr по сравнению с другими породами массива. Значения величины ϵ_{Nd} варьируют от -1.70 до $+1.42$, модельные возраста протолитов (T_{DM}) соответствуют диапазону от 2.7 до 3.5 млрд лет (табл. 2, рис. 3).

Значения величины ϵ_{Nd} для массивных габброноритов изменяются в широких пределах от -3.38 до $+2.08$, а модельные Sm-Nd возраста протолитов (T_{DM}) находятся в пределах от 3.4 до 2.7 млрд лет (табл. 2, рис. 3).

Гнездовые габбро-пегматиты характеризуются стабильными отрицательными величинами $\epsilon_{Nd}(T)$ от -1.26 до -0.63 и Sm-Nd модельными возрастными протолитов (T_{DM}) от 3.2 до 3.0 млрд лет. Гнездовые габбропегматиты, имеющие как пространственную, так и генетическую связь с массивными габброноритами, имеют схожие изотопно-геохимические характеристики с последними (табл. 2, рис. 3).

Полученные новые Sm-Nd изотопные данные для основных разновидностей пород массива Мончетундра свидетельствуют о том, что большая часть пород с отрицательными величинами ϵ_{Nd} имеют значения T_{DM} от 3.4 до 3.1 млрд лет, а большинство габброидов с положительными величинами ϵ_{Nd} имеют более молодые значения T_{DM} от 3.0 до 2.7 млрд лет.

Особый интерес представляют габбронориты с высокими положительными значениями величины ϵ_{Nd} от $+1.42$ до $+2.08$, а также близкими к 2.7 млрд лет модельными возрастными (табл. 2, рис. 3), которые являются нетипичными для пород массива. Изотопные Nd данные свидетельствуют о том, что данные породы являются производными деплетированного мантийного источника.

В целом, Nd-Sr изотопно-геохимические данные свидетельствуют о формировании основных разновидностей пород массива Мончетундра из обогащенного литофильными элементами мантийного источника. Вариации значений между группами пород скорее всего связаны с эволюцией мантийного источника в процессе плюм-литосферного взаимодействия.

Благодарности. Академику РАН Митрофанову Ф.П. – за постановку научной проблемы, организацию и финансирование полевых работ в период с 2005 по 2013 г.; Коваль Л.И. – за дробление и истирание проб для Sm-Nd, Rb-Sr; Шерстенниковой О.Г. и Шерстобитовой Г.М. – за химико-аналитические и хроматографические выделения Sm, Nd, Rb и Sr; Дьякову С.Н. – за проведение Sm-Nd измерений. Исследования проводятся при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-05-00493, 15-35-20501, ОФИ-М 13-05-12055.

Литература

- Bayanova T., Ludden J., Mitrofanof F.** Timing and duration of Paleoproterozoic events producing ore-bearing layered intrusions of the Baltic Shield: metallogenic, petrological and geodynamic implications. Geological Society, London, Special Publication. 2009. V. 323. P. 165-198.
- Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J.** The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 273 (1-2). P. 48-57.
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B.** Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material implications for crystal evolution. Earth Plan. Sci. Letters. 1988. V. 87. P. 249-265.
- Hoffman A.W.** Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. Nature. 1997. V. 385. P. 219-229.
- Steiger R., Jäger E.** Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. Earth Planet. Sci. Lett. 1977. V. 36, N 3. P. 359-362.
- Баянова Т.Б., Митрофанов Ф.П.** Важнейшие результаты и значение изотопно-геохимических исследований для целей региональной геологии Фенноскандинавского щита. Вестник КНЦ РАН. 2012. № 1. С. 22-31.
- Баянова Т.Б., Нерович Л.И., Митрофанов Ф.П. и др.** Мончетундровский базитовый массив Кольского региона: новые геологические и изотопно-возрастные данные. Доклады академии наук. 2010. Т. 431, № 2. С. 216-222.
- Борисенко Е.С., Баянова Т.Б., Серов П.А.** Структурно-возрастные взаимоотношения трахитоидных габброноритов (II фаза образования) и массивных лейкогаббро (III фаза) массива Мончетундра // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северо-Запада России. Труды XXIV молодежной науч. конф., посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца. Апатиты, 7-10 октября 2013 г. / ред. Ф.П. Митрофанов. Апатиты, Изд-во К & М, 2013. С. 80-82.
- Виноградов В.И.** Значение модельного Sm-Nd возраста в расшифровке геологической истории планеты. Геотектоника. 2004. № 1. С. 87-94.
- Гроховская Т.Л., Бакаев Г.Ф., Шолохнев В.В. и др.** Рудная платинометальная минерализация в расслоенном Мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия). Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 4. С. 329-352.

- Кунаккузин Е.Л., Серов П.А., Баянова Т.Б., Борисенко Е.С.** Время метаморфических преобразований основных пород палеопротерозойского ЭПГ-содержащего массива Мончетундра (Кольский полуостров) // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Труды XXV Молодежной науч. конф., посвященной 100-летию чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца, г. Санкт-Петербург, 13-15 октября 2014 г. СПб., 2014. С. 119-124.
- Митрофанов Ф.П., Балаганский В.В., Балашов Ю.А. и др.** U-Pb возраст габбро-анортозитов Кольского полуострова. ДАН. 1993. Т. 331, № 1. С. 95-98.
- Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У. и др.** Восточно-скандинавская и Норильская плюмовые базитовые обширные изверженные провинции Pt-Pd руд: геологическое и металлогеническое сопоставление. Геология рудных месторождений. Т. 55, № 5, 2013. С. 357-373.
- Назимова Ю.В., Райан Г.Дж.** Геологоразведочные работы на платиноиды компании "Евразия Майнинг" на Кольском полуострове // Сборник мат. проекта Интерраг-Тасис: Стратегические минеральные ресурсы Лапландии – основа устойчивого развития Севера. Апатиты, КНЦ РАН. 2009. С. 79-88.
- Нерович Л.И., Баянова Т.Б., Савченко Е.Э. и др.** Новые данные по геологии, петрографии, изотопной геохимии и ЭПГ минерализации Мончетундровского массива. Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 3. С. 461-477.
- Нерович Л.И., Баянова Т.Б., Серов П.А., Елизаров Д.В.** Магматические источники даек и жил Мончетундровского массива (Балтийский щит): результаты изотопно-геохронологических и геохимических исследований. Геохимия. 2014. № 7. С. 1-21.
- Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение : в 2 ч. / под ред. Митрофанова Ф.П., Смолькина В.Ф. Апатиты, КНЦ РАН, 2004. 2 т.
- Чистяков А.В., Кудряшова Е.А.** Гарризиты – заключительная интрузивная фаза формирования мончегорского ультрамафит-мафитового комплекса (Кольский полуостров). Известия вузов. Геология и разведка. 2010. № 6. С. 16-21.
- Шарков Е.В., Смолькин В.Ф., Беляцкий В.Б. и др.** Время формирования Мончетундровского разлома (Кольский полуостров) на основе изотопных Sm-Nd и Rb-Sr анализов метаморфических парагенезисов. Геохимия. 2006. № 4. С. 355-364.
- Шарков Е.В., Смолькин В.Ф., Чистяков А.В. и др.** Геология и металлогения Мончегорского расслоенного рудоносного комплекса // Д.А. Додин, В.С. Сурков (ред.). Российская Арктика. Геологическая история. Минералогия. Геоэкология. СПб., ВНИИОкеангеология, 2002. С. 485-494.

References

- Bayanova T.B., Mitrofanov F.P.** Vazhneyshie rezultaty i znachenie izotopno-geohimicheskikh issledovaniy dlya tseley regionalnoy geologii Fennoskandinavskogo schita [The most important results and the value of isotopic and geochemical research for regional geology of Fennoscandian Shield]. Vestnik KNTs RAN. 2012. N 1. P. 22-31.
- Bayanova T.B., Nerovich L.I., Mitrofanov F.P. i dr.** Monchetundrovskiy bazitovyy massiv Kolskogo regiona: novyye geologicheskie i izotopno-voznastnyye dannyye [Monchetundra mafic massif of the Kola region: New geological and isotope-age data]. Doklady akademii nauk. 2010. T. 431, N 2. P. 216-222.
- Borisenko E.S., Bayanova T.B., Serov P.A.** Strukturno-voznastnyye vzaimootnosheniya trahitoidnykh gabbronoritov (II faza obrazovaniya) i massivnykh leykogabbro (III faza) massiva Monchetundra [Structural-age relationships between Monchetundra massif trachytoid gabbro-norite (II forming phase) and massive leucogabbro (III phase)]// Aktualnyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severo-Zapada Rossii. Trudy XXIV molodezhnoy nauch. konf., posvyaschennoy pamyati chl.-korr. AN SSSR K.O. Krattsa. Apatity, 7-10 oktyabrya 2013 g. / red. F.P. Mitrofanov. Apatity, Izd-vo K & M, 2013. P. 80-82.
- Vinogradov V.I.** Znachenie modelnogo Sm-Nd vozrasta v rasshifrovke geologicheskoy istorii planety [The value of Sm-Nd model ages in deciphering the geological history of the planet]. Geotektonika. 2004. N 1. P. 87-94.
- Grohovskaya T.L., Bakaev G.F., Sholohnev V.V. i dr.** Rudnaya platinometalnaya mineralizatsiya v rassloennom Monchegorskom magmaticheskom komplekse (Kolskiy poluostrov, Rossiya) [PGE-mineralization in the layered Monchegorsk magmatic complex (Kola Peninsula, Russia)]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 2003. T. 45, N 4. P. 329-352.
- Kunakkuzin E.L., Serov P.A., Bayanova T.B., Borisenko E.S.** Vremya metamorficheskikh preobrazovaniy osnovnykh porod paleoproterozoyskogo EPG-soderzhashego massiva Monchetundra (Kolskiy poluostrov) [The time of the metamorphic changes Paleoproterozoic PGE-bearing massif Monchetundra mafic rocks (Kola Peninsula)] // Aktualnyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii. Trudy XXV Molodezhnoy nauch. konf., posvyaschennoy 100-letiyu chl.-korr. AN SSSR K.O. Krattsa, g. Sankt-Peterburg, 13-15 oktyabrya 2014 g. SPb., 2014. P. 119-124.
- Mitrofanov F.P., Balaganskiy V.V., Balashov Yu.A. i dr.** U-Pb vozrast gabbro-anortozitov Kolskogo poluostrova [The U-Pb age of the Kola peninsula gabbro-anortosites]. DAN. 1993. T. 331, N 1. P. 95-98.

- Mitrofanov F.P., Bayanova T.B., Korchagin A.U. i dr.** Vostochno-skandinavskaya i Noril'skaya plyumovyye bazitovyye obshirnyye izverzhennyye provintsii Pt-Pd rud: geologicheskoye i metallogenicheskoye sopostavlenie [East-Scaninavian and Noril'sk large plume mafic igneous provinces of Pt-Pd ores: geological and metallogenical comparisons]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2013. T. 55, N 5. P. 357-373.
- Nazimova Yu.V., Rayan G.Dzh.** Geologorazvedochnyye raboty na platinoidy kompanii "Evraziya Mayning" na Kolskom poluostrove ["Eurasia mining" geological prospecting of the PGE ores on the Kola Peninsula] // *Sbornik mat. proekta Interrag-Tasis: Strategicheskyye mineralnyye resursy Laplandii – osnova ustoychivogo razvitiya Severa. Apatity, KNTs RAN, 2009. P. 79-88.*
- Nerovich L.I., Bayanova T.B., Savchenko E.E. i dr.** Novyye dannyye po geologii, petrografii, izotopnoy geohimii i EPG mineralizatsii Monchetundrovskogo massiva [New geological, petrography, isotope-geochemistry and PGE-mineralization of the Monchetundra massif]. *Vestnik MGTU*. 2009. T. 12, N 3. P. 461-477.
- Nerovich L.I., Bayanova T.B., Serov P.A., Elizarov D.V.** Magmaticheskiye istochniki daek i zhil Monchetundrovskogo massiva (Baltiyskiy schit): rezultaty izotopno-geohronologicheskikh i geohimicheskikh issledovaniy [Magmatic sources of Monchetundra massif dykes and veins: isotope-geochronology and geochemistry studies]. *Geohimiya*. 2014. N 7. P. 1-21.
- Rassloennyye intruzii Monchegorskogo rudnogo rayona: petrologiya, orudnenie, izotopiya, glubinnoye stroenie [Layered intrusions Monchegorsk ore area: petrology, mineralization, isotopes, deep structure]: v 2 ch. / pod red. Mitrofanova F.P., Smolkina V.F. Apatity, KNTs RAN, 2004. 2 t.
- Chistyakov A.V., Kudryashova E.A.** Garrizity – zaklyuchitel'naya intruzivnaya faza formirovaniya monchegorskogo ultramafit-mafitovogo kompleksa (Kolskiy poluostrov) [Harrisites – the final intrusive phase of Monchegorsk ultramafic-mafic complex forming]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2010. N 6. P. 16-21.
- Sharkov E.V., Smolkin V.F., Belyatskiy V.B. i dr.** Vremya formirovaniya Monchetundrovskogo razloma (Kolskiy poluostrov) na osnove izotopnykh Sm-Nd i Rb-Sr analizov metamorficheskikh paragenezisov [Age of the Moncha Tundra fault, Kola Peninsula: evidence from the Sm-Nd and Rb-Sr isotopic systematic of the metamorphic assemblages]. *Geohimiya*. 2006. N 4. P. 355-364.
- Sharkov E.V., Smolkin V.F., Chistyakov A.V. i dr.** Geologiya i metallogeniya Monchegorskogo rassloennogo rudonosnogo kompleksa [Geology and metallogeny of the layered Monchegorsk ore complex] // D.A. Dodin, V.S. Surkov (red.). *Rossiyskaya Arktika. Geologicheskaya istoriya. Minerageniya. Geoekologiya*. SPb., VNIIOkeangeologiya, 2002. P. 485-494.

Информация об авторах

Кунаккузин Евгений Леонидович – Геологический институт КНЦ РАН, ст. инженер, e-mail: kunakkuzin@geoksc.apatity.ru

Kunakkuzin E.L. – Geological Institute KSC RAS, Engineer, e-mail: kunakkuzin@geoksc.apatity.ru

Баянова Тамара Борисовна – Геологический институт КНЦ РАН, зав. лабораторией, д-р геол.-мин. наук, e-mail: tamara@geoksc.apatity.ru

Bayanova T.B. – Geological Institute KSC RAS, Head of Laboratory, Dr of Geol.-Min. Sci., e-mail: tamara@geoksc.apatity.ru

Нерович Людмила Ивановна – Геологический институт КНЦ РАН, науч. сотрудник, e-mail: nerovich@geoksc.apatity.ru

Nerovich L.I. – Geological Institute KSC RAS, Research Officer, e-mail: nerovich@geoksc.apatity.ru

Борисенко Елена Сергеевна – Геологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник, e-mail: elena.s.borisenko@gmail.com

Borisenko E.S. – Geological Institute KSC RAS, Junior Scientist, e-mail: elena.s.borisenko@gmail.com

Серов Павел Александрович – Геологический институт КНЦ РАН, ст. науч. сотрудник, e-mail: mozay@nm.ru

Serov P.A. – Geological Institute KSC RAS, Senior Researcher, e-mail: mozay@nm.ru

Элизаров Дмитрий Владимирович – Геологический институт КНЦ РАН, ст. инженер, e-mail: elizarov@geoksc.apatity.ru

Elizarov D.V. – Geological Institute KSC RAS, Senior Researcher, e-mail: elizarov@geoksc.apatity.ru