

Вариации изотопного состава неодима вблизи магматических контактов

Калашников А.О., Серов П.А., Михайлова Ю.А., Яковенчук В.Н.

Геологический институт КНЦ РАН, kalashnikov@geoksc.apatity.ru

Аннотация. Обнаружено, что $\epsilon\text{Nd}(T)$ демонстрирует значительные вариации (вплоть до смены знака) вблизи магматических контактов. Это наблюдалось в двух принципиально разных магматических комплексах: в Ловозерском ультращелочном массиве и габброноритовом массиве Нюд (Мурманская область). Можно предположить, что эти вариации вызваны фракционированием самария и неодима и/или изотопов неодима из-за термодиффузии в поле температурного градиента вблизи магматических контактов.

Ключевые слова: Ловозерский массив, массив Нюд, Sm-Nd изотопия.

Variations of neodymium isotope compositions near magmatic contacts

Kalashnikov A.O., Serov P.A., Mikhailova J.A., Yakovenchuk V.N.

Geological Institute of the Kola Science Centre RAS, kalashnikov@geoksc.apatity.ru

Abstract. We have revealed that $\epsilon\text{Nd}(T)$ significantly changes from positive to negative near magmatic contacts. It was observed in two critically different magmatic complexes, i.e. in the Lovozero peralkaline massif and Nyud gabbro-norite massif (Murmansk region). We suppose that these variations are caused by fractionation of samarium and/or neodymium isotopes due to the thermal diffusion in the field of temperature gradient near magmatic contacts.

Keywords: Lovozero massif, Nyud massif, Sm-Nd isotope geochemistry.

Ловозерский ультращелочной массив (Кольский полуостров) состоит из двух субгоризонтально залегающих комплексов: Расслоенного (нижняя часть) и Эвдиалитового (верхняя часть). Расслоенный комплекс представляет собой набор так называемых ритмов (рис. 1 а) – «магматостратиграфических единиц», демонстрирующих закономерную расслоенность (сверху вниз): малиньит,

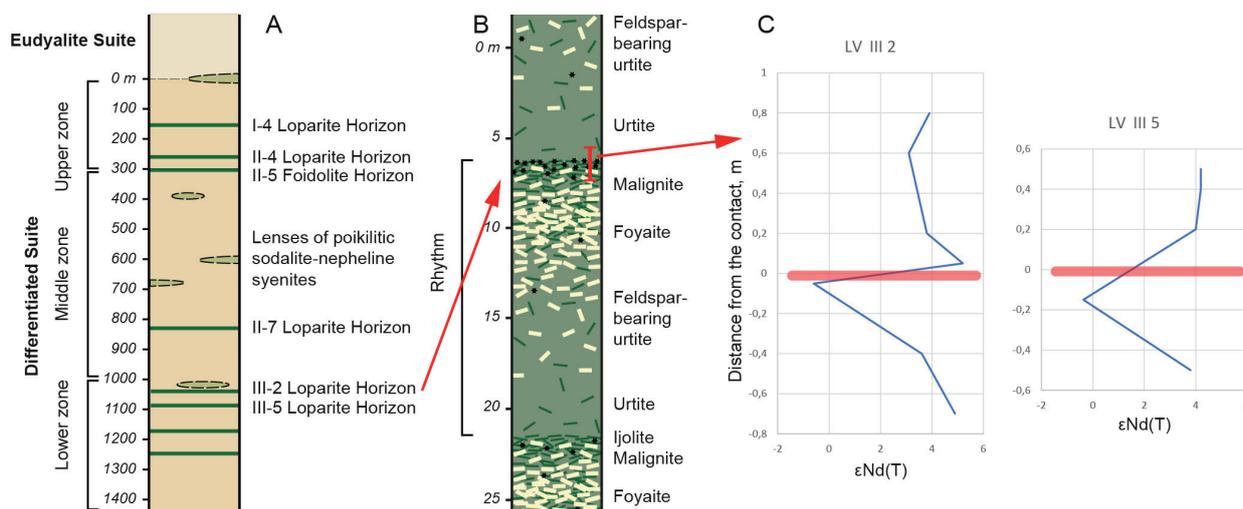


Рис. 1. Ловозерский ультращелочной массив: а – магматостратиграфическая колонка Расслоенного комплекса; б – схема принципиального строения ритма Расслоенного комплекса (Kalashnikov et al., 2016; Буссен and Сахаров, 1972; Герасимовский et al., 1966); в – вариации $\epsilon\text{Nd}(T)$ по разрезу через лопаритовые горизонты III-2 и III-5. $T = 362$ млн. лет (Kramm et al., 1993). Красная линия – контакт между ритмами.

Fig. 1. The Lovozero peralkaline massif: a – scheme of magmatic stratigraphy of the Layered Complex of the Lovozero massif; b – general structure of a ‘rhythm’ (layered lithounit) of the Layered Complex (Gerasimovsky et al., 1966; Busen and Sakharov, 1972; Kalashnikov et al., 2016); c – variations of $\epsilon\text{Nd}(T)$ along the transections across the Loparite Horizons LV-III-2 and LV-III-5. $T = 362$ Ma (Kramm et al., 1993). Red line – contact between rhythms.

± фоййит, уртит (рис. 1 б) (Буссен and Сахаров, 1972; Герасимовский et al., 1966). На границе между ритмами наблюдается обогащение лопаритом и другими минералами редких металлов, вплоть до формирования экономически значимых концентраций (так называемые лопаритовые горизонты).

Выполнен Sm-Nd анализ по двум разрезам, проходящим через лопаритовые горизонты III-2 и III-5 (рудник Кедыквырпахк Ловозерского лопаритового месторождения), ранее изученные Г.Ю. Иванюком, В.Н. Яковенчуком и Я.А. Пахомовским (Ivanyuk et al., 2015; Pakhomovsky et al., 2014). В среднем, ϵNd для Ловозерского массива положительный (Kramm and Kogarko, 1994). Однако, вдоль изученных профилей неожиданно обнаружилась отрицательная аномалия ϵNd вблизи контактов ритма, примерно в 10–20 см ниже лопаритовых горизонтов (рис. 1 с).

Чтобы понять, насколько такое поведение воспроизводимо, было выполнено такое же исследование в другом плутоне – габроноритовом массиве Нюд (Мурманская область). В разрезе массива, примерно на границе меланократовых оливиновых норитов и лейко-мезократовых норитов, согласно залегает тело норитов, существенно обогащенных сульфидами – так называемый Критический горизонт (рис. 2 а). Были пройдены два профиля вкост нижнего контакта Критического горизонта, по которым также были измерены значения $\epsilon Nd(T)$, при $T = 2500$ млн. лет. Как видно на рисунке 2 б, $\epsilon Nd(2500)$ также меняет знак вблизи контакта.

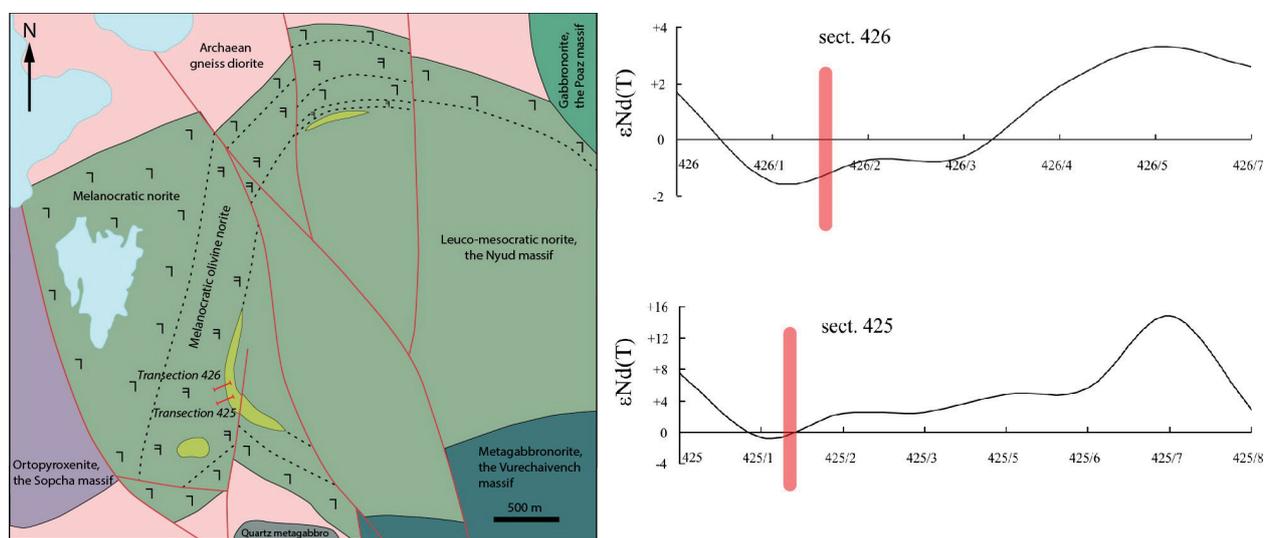


Рис. 2. Габроноритовый массив Нюд: а – геологическая схема, по (Chashchin et al., 2016), красные линии – профили, показанные на рисунке 2 б; б – вариации $\epsilon Nd(T)$ вдоль профилей вкост нижнего контакта (красные линии) Критического горизонта, $T = 2500$ млн. лет.

Fig. 2. The Nyud gabbro-norite massif: а – geological scheme, after (Chashchin et al., 2016); red lines are transections showed in Figure 2b; б – variations of $\epsilon Nd(T)$ along the transections across the bottom contact (red lines) of the Critical Horizon, $T = 2500$ Ma.

В последнее время было установлено фракционирование изотопов различных элементов в магматических и постмагматических условиях. Например, в качестве геохимических инструментов было предложено использовать показатели фракционирования изотопов лития (Marks et al., 2007), кислорода (Baumgartner and Valley, 2001), магния (Teng et al., 2011), кремния (Savage et al., 2011) и железа (Schuessler et al., 2009). Также упоминалось о фракционировании изотопов стронция на магматической стадии в результате полимеризации силикатного расплава (Morse, 1983). Чем легче элемент, тем больше относительная разница масс его изотопов и, следовательно, тем проще разделить эти изотопы. Например, разница масс ${}^7\text{Li}$ – ${}^6\text{Li}$ (14.3 %) на порядок больше, чем ${}^{144}\text{Nd}$ – ${}^{143}\text{Nd}$ (0.7 %). Наиболее близкая разница масс у изотопов ${}^{57}\text{Fe}$ – ${}^{56}\text{Fe}$ (1.8 %), и это в 2.5 раза больше, чем ${}^{144}\text{Nd}$ – ${}^{143}\text{Nd}$. Таким образом, разделение тяжелых изотопов в магматических–постмагматических условиях не ожидается.

Одной из возможных причин разделения изотопов неодима и/или самария и неодима может являться термодиффузия в поле температурного градиента. Работами К. Лундстрема с коллегами по-

казано, что наблюдается существенное фракционирование элементов (Fe, Ti, Mg, Ca, Na, Al, K, Si) и изотопов Mg и Fe вдоль термального градиента (Huang et al., 2009). Эти исследователи сделали вывод, что термодиффузия является ключевым механизмом фракционирования элементов и изотопов в таких условиях (Huang et al., 2009; Lacks et al., 2012; Lundstrom, 2016).

В настоящее время, в целом, существует консенсус, что большие плутоны кристаллизовались не из больших магматических камер (концепция ‘Big magmatic tanks’), а формировались как амальгамация последовательных малых интрузий (Annen et al., 2015; Bartley et al., 2006). Мы предполагаем, что ритмы Ловозерского массива также являются набором последовательно внедрившихся силлов (Féménias et al., 2005; Mikhailova et al., 2021), т. е. Ловозерский массив является амальгамированным плутоном. Таким образом, при внедрении последующего силла на контакте с ранее внедрившимися, раскристаллизованными «холодными» силлами имел место термальный градиент, который вызывал термодиффузию и, следовательно, фракционирование элементов и, возможно, их изотопов, что могло затронуть и Sm-Nd изотопную систему. Похожая ситуация, видимо, имела место и в пределах габброноритового массива Нюд, если предположить, что породы Критического горизонта внедрились как силл между меланократовыми оливиновыми норитами и лейко-мезократовыми норитами.

Таким образом, могут быть сделаны следующие выводы и предположения.

1. Обнаружено, что значения $\epsilon\text{Nd}(T)$ меняются с положительных на отрицательные на магматических контактах, в двух расслоенных плутонах: Ловозерском ультращелочном массиве и габброноритовом массиве Нюд.

2. Сделано предположение, что эти «инверсии» могли быть вызваны фракционированием самария и неодима и/или изотопов неодима путем термодиффузии, возникающей в поле термального градиента вблизи магматических контактов последовательно внедряющихся («инкрементных») силлов.

3. Если это предположение верно, то вариации $\epsilon\text{Nd}(T)$ могут быть инструментом декомпозиции амальгамированных плутонов.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного Фонда № 21-47-09010 (изотопный анализ), а также поддержано Министерством науки и высшего образования, НИР 0226-2019-0051 (полевые работы).

Литература

1. Annen C., Blundy J.D., Leuthold J. & Sparks R.S.J. Construction and evolution of igneous bodies: Towards an integrated perspective of crustal magmatism. *Lithos*. 2015. V. 230. P. 206–221. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.008>.
2. Bartley J.M., Coleman D.S. & Glazner A.F. Incremental pluton emplacement by magmatic crack-seal. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*. 2006. V. 97(04). P. 383–396. <https://doi.org/10.1017/S0263593300001528>.
3. Baumgartner L.P. & Valley J.W. Stable Isotope Transport and Contact Metamorphic Fluid Flow. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2001. V. 43(1). P. 415–467. <https://doi.org/10.2138/gsrmg.43.1.415>.
4. Chashchin V.V., Bayanova T.B., Mitrofanov F.P. & Serov P.A. Low-Sulfide PGE ores in paleoproterozoic Monchegorsk pluton and massifs of its southern framing, Kola Peninsula, Russia: Geological characteristic and isotopic geochronological evidence of polychronous ore–magmatic systems. *Geology of Ore Deposits*. 2016. V. 58(1). P. 37–57. <https://doi.org/10.1134/S1075701516010025>.
5. Féménias O., Coussaert N., Brassinnes S. & Demaiffe D. Emplacement processes and cooling history of layered cyclic unit II-7 from the Lovozero alkaline massif (Kola Peninsula, Russia). *Lithos*. 2005. V. 83(3–4). P. 371–393. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.03.012>.
6. Huang F., Lundstrom C.C., Glessner J., Ianno A., Boudreau A., Li J. et al. Chemical and isotopic fractionation of wet andesite in a temperature gradient: Experiments and models suggesting a new mechanism of magma differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. V. 73(3). P. 729–749. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.012>.
7. Ivanyuk G.Y., Pakhomovsky Y.A. & Yakovenchuk V.N. Eudialyte-group minerals in rocks of Lovozero layered complex at Mt. Karnasurt and Mt. Kedykvyrpakhhk. *Geology of Ore Deposits*. 2015. V. 57(7). P. 600–613. <https://doi.org/10.1134/S1075701515070053>.

8. Kalashnikov A.O., Konopleva N.G., Pakhomovsky Y.A. & Ivanyuk G.Y. Rare Earth Deposits of the Murmansk Region, Russia—A Review. *Economic Geology*. 2016. V. 111(7). P. 1529–1559. <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.7.1529>.
9. Kramm U. & Kogarko L.N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina and Lovozero agpaitic centres, Kola Alkaline province, Russia. *Lithos*. 1994. V. 32(3–4). P. 225–242. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0024-4937(94)90041-8).
10. Kramm U., Kogarko L.N., Kononova V.A. & Vartiainen H. The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb–Sr ages define 380–360 Ma age range for all magmatism. *Lithos*. 1993. V. 30(1). P. 33–44. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(93\)90004-V](https://doi.org/10.1016/0024-4937(93)90004-V).
11. Lacks D.J., Goel G., Bopp C.J., Van Orman J.A., Leshner C.E. & Lundstrom C.C. Isotope Fractionation by Thermal Diffusion in Silicate Melts. *Physical Review Letters*. 2012. V. 108(6). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.065901>.
12. Lundstrom C.C. The role of thermal migration and low-temperature melt in granitoid formation: Can granite form without rhyolitic melt? *International Geology Review*. 2016. V. 58(3). P. 371–388. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1092098>.
13. Marks M.A.W., Rudnick R.L., McCammon C., Vennemann T. & Markl G. Arrested kinetic Li isotope fractionation at the margin of the Ilímaussaq complex, South Greenland: Evidence for open-system processes during final cooling of peralkaline igneous rocks. *Chemical Geology*. 2007. V. 246(3–4). P. 207–230. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.001>.
14. Mikhailova J.A., Pakhomovsky Y.A., Kalashnikov A.O. & Yakovenchuk V.N. Formation of layering of the Lovozero peralkaline intrusion (Kola Peninsula, Russia): new data. In N. Y. Groshev (Ed.), *ARLIN – Online Workshop 1*. 2021. V. 1. P. 24–27. Apatity: KOLARCTIC. <https://doi.org/10.31241/ARLIN.2021.006>.
15. Morse S.A. Strontium Isotope Fractionation in the Kiglapait Intrusion. *Science*. 1983. V. 220(4593). P. 193–195. <https://doi.org/10.1126/science.220.4593.193>.
16. Pakhomovsky Y.A., Ivanyuk G.Y. & Yakovenchuk V.N. Loparite-(Ce) in rocks of the Lovozero layered complex at Mt. Karnasurt and Mt. Kedykvyrpakhk. *Geology of Ore Deposits*. 2014. V. 56(8). P. 685–698. <https://doi.org/10.1134/S1075701514080054>.
17. Savage P.S., Georg R.B., Williams H.M., Burton K.W. & Halliday A.N. Silicon isotope fractionation during magmatic differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. V. 75(20). P. 6124–6139. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.043>.
18. Schuessler J.A., Schoenberg R. & Sigmarsson O. Iron and lithium isotope systematics of the Hekla volcano, Iceland — Evidence for Fe isotope fractionation during magma differentiation. *Chemical Geology*. 2009. V. 258(1–2). P. 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.021>.
19. Teng F.-Z., Dauphas N., Helz R.T., Gao S. & Huang S. Diffusion-driven magnesium and iron isotope fractionation in Hawaiian olivine. *Earth and Planetary Science Letters*. 2011. V. 308(3–4). P. 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.06.003>.
20. Буссен И.В., Сахаров А.С. Петрология Ловозерского щелочного массива. 1972. Л. Изд-во: Наука.
21. Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Сапрыкина Т.В., Балашов Ю.А. Геохимия Ловозёрского щелочного массива. 1966. М. Изд-во: Наука.