

Формирование расслоенности Ловозерского щелочного массива (Кольский полуостров, Россия): новые данные

Михайлова Ю.А., Пахомовский Я.А., Калашников А.О., Яковенчук В.Н.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, mikhailova@geoksc.apatity.ru; pakhom@geoksc.apatity.ru; kalashnikov@geoksc.apatity.ru; yakovenchuk@geoksc.apatity.ru

Аннотация. Ловозерский массив (Кольский полуостров, Россия) уникален не только масштабами проявления щелочных пород и минеральным разнообразием, но и геологическим строением – это расслоенный интрузив. Каждый из многочисленных слоев (или ритмов), формирующих массив, представляет собой последовательность пород (сверху вниз): меланократовый нефелиновый сиенит (луяврит) – лейкократовый нефелиновый сиенит (фойяит) – фойдолит (уртит). Изучение составов сквозных минералов, таких как щелочные пироксены и амфиболы, минералы группы эвдиалита, показало, что луйавриты являются самыми ранними породами в ритме, а уртиты – наиболее дифференцированными и поздними. Эти данные вместе с геологическими наблюдениями позволяют предположить, что каждый ритм сформировался в результате кристаллизации отдельной порции щелочного расплава.

Ключевые слова: Ловозерский массив, щелочные породы, расслоенность.

Formation of layering of the Lovozero peralkaline intrusion (Kola Peninsula, Russia): new data

Mikhailova J.A., Pakhomovsky Y.A., Kalashnikov A.O., Yakovenchuk V.N.

Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia, mikhailova@geoksc.apatity.ru; pakhom@geoksc.apatity.ru; kalashnikov@geoksc.apatity.ru; yakovenchuk@geoksc.apatity.ru

Abstract. The Lovozero massif (Kola Peninsula, Russia) is unique not only in the scale of appearance of alkaline rocks and mineral diversity, but also in its geological structure. This is a layered pluton. Each of the numerous layers (or rhythms) that form the massif is a sequence of rocks: melanocratic nepheline syenite (lujavrite) – leucocratic nepheline syenite (foyaite) – foidolite. The study of the compositions of rock-forming minerals, such as alkaline pyroxenes and amphiboles, minerals of the eudialyte group, showed that lujavrite is the earliest rocks in each rhythm, and urtite is the most evolved and latest. These data, together with geological observations, suggest that each rhythm was formed as a result of the crystallization of a separate portion of the alkaline melt.

Keywords: Lovozero massif, alkaline rocks, layered intrusion.

Введение

Ловозерский щелочной массив внедрился в архейские гранито-гнейсы и девонские вулканогенно-осадочные породы около 360 млн. лет назад (Крамм, Когарко, 1994) и представляет собой расслоенный лакколит. По геофизическим данным (Шаблинский, 1963) щелочные породы прослеживаются до глубины 7 км, нижняя граница их распространения не установлена, контакты массива с вмещающими породами практически вертикальны.

Массив состоит из двух крупных комплексов: эвдиалитового (в верхней части) и расслоенного (рис. 1). Среди пород этих двух комплексов распространены линзовидные или неправильной формы тела пойкилитовых фельдшпатоидных сиенитов, с которыми связаны практически все редкометалльные пегматиты и гидротермальные жилы Ловозерского массива. В массиве также присутствуют ксенолиты кровли, представляющие собой в разной степени измененные вулканогенно-осадочные породы.

Расслоенный комплекс слагает большую часть разреза массива, на его долю приходится 77 % общего объема щелочных пород. Комплекс состоит из множества субгоризонтальных слоев (или ритмов). Нижняя часть каждого ритма сложена уртитом (рис. 2в). Вверх по ритму содержание щелочного полевого шпата увеличивается и уртит постепенно переходит в фойяит (лейкократовый нефелиновый сиенит, рис. 2б). Далее вверх ритма растёт содержание темноцветных минералов, таких

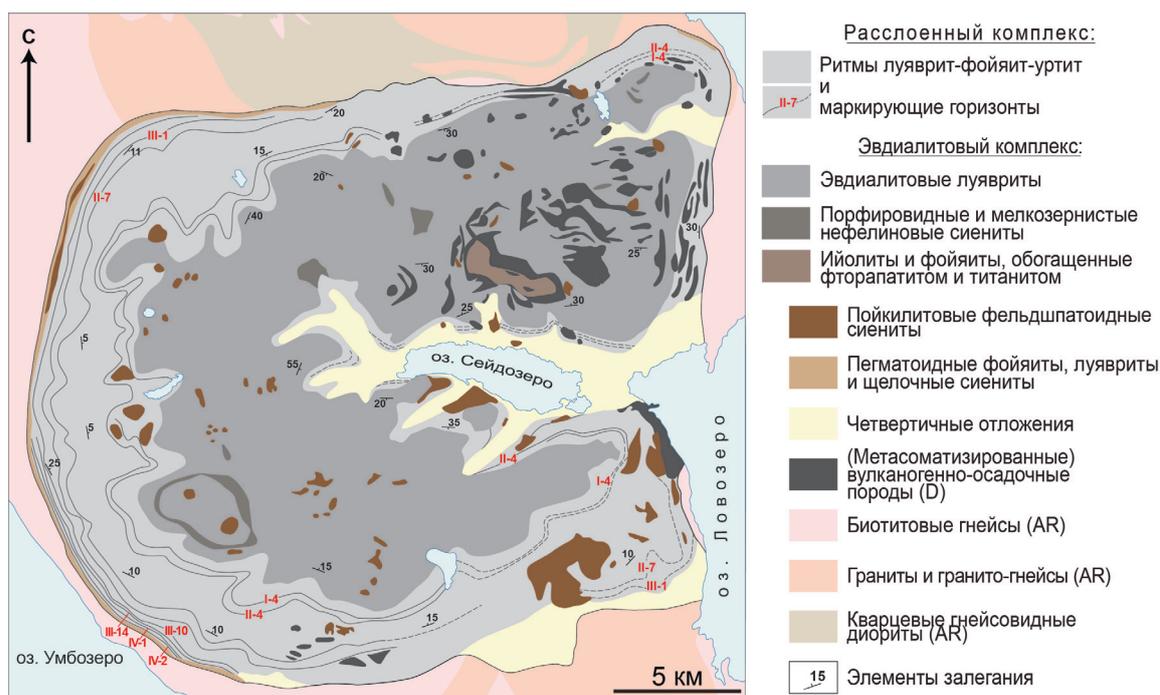


Рис. 1. Схема геологического строения Ловозерского массива [по (Буссен, Сахаров, 1972), с упрощениями].

Fig. 1. Geological scheme of the Lovozero massif [simplified after (Bussen, Sakharov, 1972)].

как щелочные пироксены и амфиболы, и фойяит постепенно переходит в луаврит (трахитоидный меланократовый нефелиновый сиенит, рис. 2а).

Контакты между ритмами резкие и часто маркируются пластовыми или линзовидными пегматитами. Идеальные ритмы (рис. 2г) встречаются только в верхней части расслоенного комплекса. Средняя часть сложена луавритами с линзами фойяитов, а нижняя – ритмами луаврит-фойяит рядами с линзами уррита.

Механизмы формирования расслоенности Ловозерского массива представлены в классических исследованиях 50–70-х годов прошлого века. Были предложены: ритмичная кристаллизация единого магматического очага сверху вниз (Власов и др., 1959), кристаллизация магматического очага снизу вверх (Герасимовский и др., 1966), а также выделение в едином магматическом бассейне порций силикатных расплавов разного состава (Буссен, Сахаров, 1972). Когарко с соавторами (Когарко и др., 2006) пришли к выводу, что основным процессом формирования расслоения Ловозерского плутона была фракционная кристаллизация снизу вверх единого бассейна щелочной магмы. Féménias с соавторами (Féménias et al., 2005) установили, что ритм II-7 образовался в результате внедрения щелочного расплава в твердые вмещающие породы. То есть этот ритм является силлом.

Сопоставление составов сквозных породообразующих и аксессуарных минералов из разных пород одного и того же ритма может помочь установить относительное время кристаллизации каждой из этих пород. В этой статье мы представляем результаты исследования изменчивости составов щелочных пироксенов и амфиболов, а также минералов группы эвдиалита.

Материалы и методы

Состав породообразующих минералов из щелочных пород расслоенного комплекса изучен с использованием электронно-зондового микроанализатора Cameca MS-46 (ГИ КНЦ РАН), действующего в волнодисперсионном режиме с ускоряющим напряжением 20 кВ, диаметром зонда 2–20 мкм, током зонда 30 нА и временем набора импульсов 10 с (для пиков) и 2 × 10 с (для фона до и после пика), с 5–10 наборами импульсов для каждого элемента в заданном однородном по составу участке минерала. Точность анализа составляет 0.2–0.05 мас. % (2 стандартных отклонения) для главных элементов и около 0.01 мас. % для микропримесей.

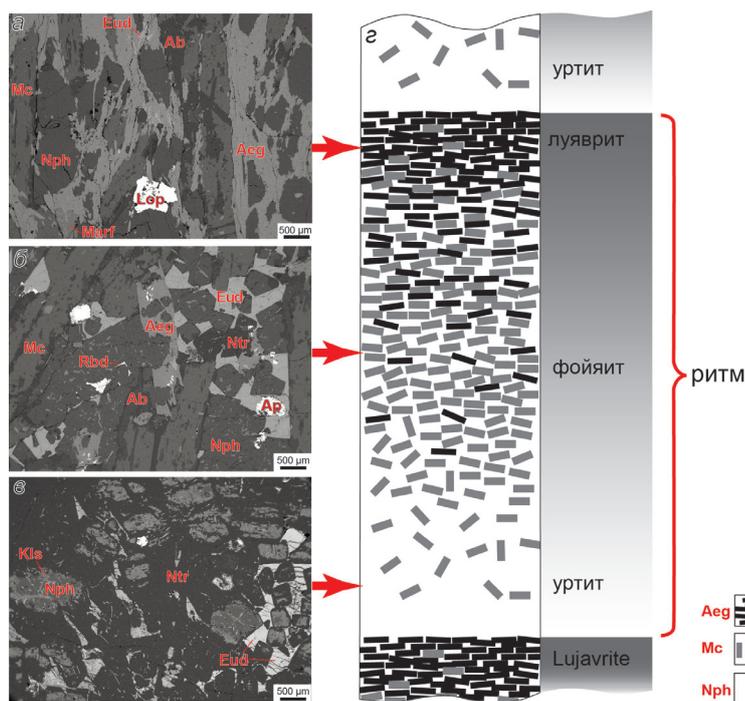


Рис. 2. Разновидности пород расслоенного комплекса: а – меланократовый нефелиновый сиенит (луяврит); б – лейкократовый нефелиновый сиенит (фойяит); в – уртит. Изображения в обратно рассеянных электронах (BSE). Ab – альбит, Aeg – эгирин, Ap – фторапатит, Eud – минералы группы эвдиалита, Kls – кальсилит, Lop – лопарит-(Ce), Marf – магнезиоарфведсонит, Mc – микроклин, Rbd – рабдофан-(Ce), Nph – нефелин, Ntr – натролит. г – схематическое изображение ритма (по Arzamastsev, 1994).

Fig. 2. Varieties of rocks of the layered complex: a – melanocratic nepheline syenite (lujavrite); b – leucocratic nepheline syenite (foyaite); c – urtite. Back-scattered electron (BSE) images. Ab – albite, Aeg – aegirine, Ap – fluorapatite, Eud – eudialyte-group minerals, Kls – kalsilite, Lop – loparite-(Ce), Marf – magnesioarfvedsonite, Mc – microcline, Rbd – rhabdophane-(Ce), Nph – nepheline, Ntr – natrolite. d – schematic representation of rhythm (after Arzamastsev, 1994).

Результаты

Клинопироксены (эгирин и эгирин-авгит) в луйавритах образуют мелкие длиннопризматические кристаллы, а в уртитах – крупные пойкилитовые зерна. Но кроме морфологии, они различаются и по химическому составу. Клинопироксены из луйавритов обогащены диопсидовым компонентом, тогда как пироксены из уртитов содержат больше эгиринового минерала, а пироксены из фойяита занимают промежуточное положение. Эволюционный тренд от клинопироксенов, богатых диопсидом, к клинопироксенам, содержащим большее количество эгиринового компонента, типичен для щелочных массивов во всем мире (Larsen, 1976). Основное различие между массивами заключается в степени обогащения двухвалентным железом по отношению к магнезию (соотношение диопсид/геденбергит) в процессе их эволюции (Korobeinikov, Laajoki, 1994).

Состав минералов группы эвдиалита также меняется при переходе от луйавритов к фойяитам и уртитам. Отношение марганца к двухвалентному железу в составе эвдиалита максимально в уртите, а минимально – в луйаврите. Такое изменение указывает на то, что луйаврит является самой ранней породой каждого ритма, а уртит – более дифференцированной и поздней (Shilling et al., 2011). Репрезентативные анализы клинопироксенов и минералов группы эвдиалита из разных пород ритмов приведены в таблице 1.

Амфиболы (арфведсонит и магнезиоарфведсонит) в уртитах и фойяитах образуют крупные пойкилитовые кристаллы с включениями всех окружающих минералов, а в луйавритах эти минералы образуют ксеноморфные зерна в тесных срастаниях с клинопироксенами. В амфиболах из луйавритов содержание алюминия и кальция выше, а кремния и натрия ниже, чем в амфиболах из лейкократовых пород. Известно, что натриевые амфиболы стабильны только при низких температурах (ниже 650 °С) и давлениях (Mitchell, 1990), поэтому состав амфиболов используется для определения относительного времени формирования щелочных пород. На основании исследования составов амфиболов можно сделать вывод о том, что уртиты являются более поздними породами по отношению к луйавритам и фойяитам.

Таблица 1. Репрезентативные химические анализы минералов Ловозерского массива.
 Table 1. Representative chemical analyses of minerals from the Lovozero massif.

Образец	LV-III-3-2	LV-I-7-4	LV-00-16-1	LV-III-3-2	LV-I-7-4	LV-00-16-1
Порода	Луяврит	Фойяит	Уртит	Луяврит	Фойяит	Уртит
Минерал	Эгирин*			Минералы группы эвдиалита**		
Nb ₂ O ₅	н.о.	н.о.	н.о.	0.51	0.73	1.68
Ta ₂ O ₅	н.о.	н.о.	н.о.	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	52.12	51.89	52.48	50.83	52.81	49.48
TiO ₂	1.84	2.06	4.47	0.68	0.46	0.43
ZrO ₂	0.59	0.95	0.58	12.73	12.77	11.85
Al ₂ O ₃	0.87	0.96	0.75	0.20	0.19	0.13
La ₂ O ₃	н.о.	н.о.	н.о.	0.14	0.66	0.63
Ce ₂ O ₃	н.о.	н.о.	н.о.	0.54	1.52	0.52
Nd ₂ O ₃	н.о.	н.о.	н.о.	0.15	0.50	0.53
CaO	6.41	4.47	2.05	8.84	6.99	9.49
SrO	н.о.	н.о.	н.о.	1.12	1.43	2.10
BaO	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.37	н.о.
MgO	2.84	1.96	1.28	н.о.	н.о.	н.о.
FeO	23.40	24.44	23.92	2.13	1.29	0.58
MnO	0.55	0.48	0.48	1.66	3.40	3.57
Na ₂ O	11.04	12.32	13.55	15.67	6.19	9.23
K ₂ O	н.о.	н.о.	н.о.	0.20	1.07	1.95
Cl	н.о.	н.о.	н.о.	0.95	0.77	0.38
SO ₃	н.о.	н.о.	н.о.	0.20	0.00	0.92
O=Cl	н.о.	н.о.	н.о.	0.21	0.17	0.08
Сумма	99.64	99.53	99.56	96.74	91.32	93.54
Коэффициенты в формуле						
Nb	–	–		0.12	0.16	0.39
Si	1.94	1.93	1.95	25.41	25.55	25.40
Ti	0.05	0.06	0.12	0.26	0.17	0.17
Al	0.04	0.04	0.03	0.12	0.11	0.08
Zr	0.01	0.02	0.01	3.10	3.01	2.97
La	–			0.03	0.12	0.12
Ce	–			0.10	0.27	0.10
Nd	–			0.03	0.09	0.10
Ca	0.26	0.18	0.08	4.73	3.63	5.22
Sr	–			0.32	0.40	0.62
Ba	–			0.00	0.07	0.00
Mg	0.16	0.11	0.07	–	–	–
Fe ³⁺	0.73	0.76	0.74	–	–	–
Fe ²⁺	0.00			0.89	0.52	0.25
Mn	0.02	0.02	0.02	0.70	1.39	1.55
Na	0.80	0.89	0.97	15.19	5.81	9.18
K	–			0.12	0.66	1.27
Cl	–	–	–	0.80	0.63	0.33
S	–	–	–	0.07	0.00	0.35
	Aeg ₈₃ Di ₁₇	Aeg ₈₉ Di ₁₁	Aeg ₉₃ Di ₇	Mn/Fe = 0.78	Mn/Fe = 2.67	Mn/Fe = 6.20

* – формулы эгирина рассчитаны на 4 катиона и 6 атомов кислорода; ** – формулы минералов группы эвдиалита рассчитаны на сумму катионов Si + Zr + Nb + Al = 29. Aeg – эгириновый компонент в составе клинопироксена; Di – диопсидовый компонент; подстрочная цифра означает содержание каждого из компонентов в процентах.

Обсуждение результатов

Изменения составов клинопироксенов, амфиболов и минералов группы эвдиалита свидетельствуют о том, что каждый ритм расслоенного комплекса состоит из менее (луяврит) и более (уртит) эволюционированных пород. Фракционирование расплава шло в направлении обогащения нефелином и снижения содержания эгирина. Такой путь фракционирования исследован экспериментально (Bailey, Schairer, 1966) в системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, где расплав типа «ийолит» (около 50 % эгирина) эволюционирует в сторону «фонолитовой эвтектики» (около 10 % эгирина). Результаты нашего исследования согласуются с выводами Féménias и его коллег (Féménias et al., 2005). Мы предполагаем, что Ловозерский массив образовался в результате внедрения относительно небольших порций щелочного расплава в вулканогенно-осадочные породы. Фракционная кристаллизация происходила *in situ* в каждой такой порции.

Установление механизма образования Ловозерского массива чрезвычайно важно для решения вопроса о происхождении водорода и углеводородных газов (в основном метана), в изобилии встречающихся в виде включений в минералах и заполняющих трещины в породах. Генерация водорода возможна путем окисления железа в структуре железосодержащих минералов, таких как арфведсонит, эвдиалит или слюды, в ходе реакции депротонирования: $\text{Fe}^{2+} + \text{OH}^- = \text{Fe}^{3+} + \text{O}^{2-} + 1/2\text{H}_2\uparrow$. Для осуществления подобных реакций необходима повышенная температура (от 400 до 800 °С в зависимости от минерала). Если Ловозерский массив сформировался путем кристаллизации отдельных порций расплава, то каждая такая порция могла прогреть уже кристаллизовавшиеся породы, вызывать реакции депротонирования и выделение водорода.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 21-47-09010.

Литература

1. Буссен И.В., Сахаров А.С. Петрология Ловозерского щелочного массива. Изд-во: Наука. Ленингр. отделение. 1972. 296 с.
2. Власов К.А., Кузьменко М.В., Еськова Е.М. Ловозерский щелочной массив. М. Изд-во: АН СССР. 1959. 450 с.
3. Герасимовский В.И., Волков В.П., Когарко Л.Н., Поляков А.И., Сапрыкина Т.В., Балашов Ю.А. Геохимия Ловозерского щелочного массива. Изд-во: Наука. 1966. 398 с.
4. Arzamastsev A.A. Unique Paleozoic Intrusions of the Kola Peninsula. Geological Institute of the Kola Science Centre. Apatity. 1994. 79 pp.
5. Bailey D.K., Schairer J.F. The system $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ at 1 atmosphere, and the petrogenesis of alkaline rocks // *Journal of Petrology*. 1966. V. 7. № 1. P. 114–170.
6. Féménias O. et al. Emplacement processes and cooling history of layered cyclic unit II-7 from the Lovozero alkaline massif (Kola Peninsula, Russia) // *Lithos*. 2005. T. 83. № 3–4. С. 371–393. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.03.012>.
7. Kogarko L.N., Williams C.T., Woolley A.R. Compositional evolution and cryptic variation in pyroxenes of the peralkaline Lovozero intrusion, Kola Peninsula, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2006. V. 70. № 4. P. 347–359. <https://doi.org/10.1180/0026461067040340>.
8. Korobeynikov A.N., Laaioki K. Petrological Aspects of the Evolution of clinopyroxene Composition in the Intrusive Rocks of the Lovozero Alkali Massif // *Geochemistry International*. 1994. V. 31. № 3. P. 69–76.
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. Larsen L.M. Clinopyroxenes and coexisting mafic minerals from the alkaline Himaussaq intrusion, South Greenland // *Journal of Petrology*. 1976. V. 17. № 2. P. 258–290. <https://doi.org/10.1093/petrology/17.2.258>.
11. Mitchell R.H. A review of the compositional variation of amphiboles in alkaline plutonic complexes // *Lithos*. 1990. V. 26. № 1–2. P. 135–156. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90044-2).
12. Schilling J. et al. The compositional variability of eudialyte-group minerals // *Mineralogical Magazine*. 2011. V. 75. №. 1. P. 87–115. <https://doi.org/10.1180/minmag.2011.075.1.87>.