

УДК 550.42,552.3,552.13

МАГМАТИЧЕСКИЕ ИНКЛАВЫ В ВЫБОРГИТАХ САЛМИНСКОГО АНОРТОЗИТ-РАПАКИВИГРАНИТНОГО КОМПЛЕКСА

А. А. Конышев^{1*}, Е. Е. Климовская¹, С. С. Васильев^{1,2}

¹ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *icelopa@gmail.com

² Петрозаводский государственный университет (пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Приводятся результаты минералого-геохимического изучения магматических инклавов в гранитах рапакиви (выборгитах) Салминского анортозит-рапакивигранитного комплекса возрастом 1,55–1,53 млрд лет (Южная Карелия). Образцы инклавов детально исследованы методами оптической и электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа, ICP-MS и силикатного анализа. Установлено, что инклавы представлены кварцевыми диоритами, низкощелочными кварцевыми диоритами и гранодиоритами. Петрохимически они характеризуются повышенными в сравнении с гранитоидами содержаниями $Fe_2O_3^{total}$ (10,8–15,2 мас. %), TiO_2 (1,12–1,59 мас. %), Zr (1370–2240 ppm) и P (1160–1721 ppm), что сближает их с «FTP»-породами (имеющими высокое содержание Fe, Ti, P), рассматриваемыми как остаточные расплавы после кристаллизации ассоциирующих с гранитами рапакиви анортозитов. Минералогические особенности (высокожелезистые оливин и пироксен, низкокальциевый плагиоклаз) указывают на вероятную кристаллизацию инклавов из магм, являющихся продуктом фракционирования базитового расплава, сопровождавшегося значительным накоплением железа в расплаве. Сравнительное изучение геохимических особенностей инклавов с подобными Fe, Ti, P-обогащенными породами различных анортозитовых провинций мира (Украина, Бразилия, Северная Америка) показало, что, несмотря на сходство микроэлементного состава, по содержанию кремнезема и щелочей инклавы не попадают в поля типичных анортозит-ассоциированных пород. Это в совокупности с геологическими и петрографическими свидетельствами активного взаимодействия мафической и фельзитической магм указывает на гибридную природу инклавов. Являются ли данные инклавы продуктом захвата кислым расплавом остаточной магмы после кристаллизации анортозитов – остается открытым вопросом.

Ключевые слова: магматические инклавы; рапакиви; анортозиты; ферродиориты; феррогранодиориты

Для цитирования: Конышев А. А., Климовская Е. Е., Васильев С. С. Магматические инклавы в выборгитах Салминского анортозит-рапакивигранитного комплекса // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 116–119. doi: 10.17076/geo2170

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2023-0005).

A. A. Konyshov^{1*}, E. E. Klimovskaya¹, S. S. Vasilyev^{1,2}. MAGMATIC ENCLAVES IN WIBORGITES OF THE SALMI ANORTHOSITE-RAPAKIVI GRANITE COMPLEX

¹Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), * icelopa@gmail.com

² Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

This article presents the results of a mineralogical and geochemical study of magmatic enclaves in Rapakivi granites (wiborgite). These granites belong to the Salmi anorthosite-rapakivi granite complex aged 1.55–1.53 Ga (southern Karelia, Russia). Samples of the enclaves were studied in detail using optical and electron microscopy, X-ray fluorescence analysis, ICP-MS, and quantitative chemical analysis. The enclaves proved to be quartz diorites, low-alkali quartz diorites, and granodiorites. Petrochemically, they are characterized by an increased content of $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{total}}$ (10.8–15.2 % w/w), TiO_2 (1.12–1.59 % w/w), Zr (1370–2240 ppm), and P (1160–1721 ppm) in comparison with granitoids. In this sense, they are more similar to FTP rocks (with high concentrations of Fe, Ti, and P), which are considered as residual melts after crystallization of anorthosite associated with rapakivi granites. The mineralogical features (high-iron olivine and pyroxene, low-calcium plagioclase) indicate the probable crystallization of the enclaves from the magma produced through the fractional crystallization of basaltic melt, accompanied by significant iron accumulation in the melt. A comparative study of the geochemical features of the enclaves against similar Fe, Ti, and P-enriched rocks from various anorthosite provinces of the world (Ukraine, Brazil, and North America) has shown that, despite the similarity of the trace element composition, the silica and alkali content of the enclaves places them outside of the fields of typical anorthosite-associated rocks. Combined with geological and petrographic evidence of active interaction between mafic and felsic magmas, these facts point to a hybrid nature of the enclaves. The question of whether these enclaves are the product of residual magma capture by the acidic melt after anorthosite crystallization remains open.

Keywords: magmatic enclaves; rapakivi; anorthosites; ferrodiorites; ferrogranodiorites

For citation: Konyshov A. A., Klimovskaya E. E., Vasilyev S. S. Magmatic enclaves in wiborgites of the Salmi anorthosite-rapakivi granite complex. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 116–119. doi: 10.17076/geo2170

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (FMEN-2023-0005).

Введение

Магматические инклавы – захваченные магмой фрагменты ксеногенного расплава, впоследствии раскристаллизованные в интрузиве совместно с магмой-«хозяином» [Didier, Barbarin, 1991], служат своего рода «окнами» в недоступные для непосредственного изучения породы и несут важную петрологическую информацию об эволюции магматических систем. Настоящее исследование фокусируется на обнажениях (от первых десятков см до метра) инклавов пород среднего состава, обнаруженных в краевой части интрузии биотит-амфиболовых гранитов рапакиви (выборгиты) Салминского анортозит-рапакивигранитного комплекса (АРГК).

Салминский АРГК, локализованный на границе Карельского кратона и Свеккофеннского

складчатого пояса Фенноскандинавского щита, представляет собой многофазную интрузию, в составе которой выделяются габ-бронорит-анортозиты, монцониты, кварцевые монцониты и кварцевые диориты, граниты рапакиви (выборгиты и питерлиты), биотитовые граниты, Li-F-граниты. Возраст интрузива 1,55–1,53 млрд лет [Neymark et al., 1994; Amelin et al., 1997].

Материалы и методы

В основе работы лежит детальное минералого-геохимическое исследование четырех образцов инклавов, восьми образцов гранитов рапакиви и шести образцов гранитов, обогащенных кварцем, на контакте с инклавами. Изучение петрографических особенностей пород и компонентного состава минеральных

фаз осуществлялось методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (KyKu em6900I и Tescan VEGA II LSH, EDS спектрометр Energy-350 (ИГ КарНЦ РАН); а также Mira3, Tescan и EDS спектрометр X-MAX (ГЕОХИ РАН)). Химический состав пород определен в ИГ КарНЦ РАН: содержание макрокомпонентов – на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL ADVANT`X, рассеянных компонентов – методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900, FeO и Fe₂O₃ – силикатным анализом.

Минералогия инклавов

Изучаемые породы не выдержаны по текстурно-структурным особенностям и количественному соотношению минералов. Это зеленовато-серые среднезернистые породы с вкрапленниками зеленовато-серого калиевого полевого шпата, плагиоклаза и кварца. Минеральный состав инклавов (об. %) представлен: плагиоклазом (30–40), амфиболом (10–30), кварцем (15–25), калиевым полевым шпатом (5–20), биотитом (2–10), оливином (0–2), пироксеном (0–3). Аксессуары: ильменит, апатит, циркон, магнетит, пирротин, халькопирит, сфалерит. Также зафиксированы монацит, паризит, кальцит. Оливин (фаялит, $\text{Fa}_{95}\text{Fo}_{2.5}\text{Tef}_{2.5}$) ассоциирует с пироксеном и образующим пироксен Са-амфиболом, образуя ксеноморфные включения в них. В различной степени замещается иддингситом, грюнеритом, магнетитом. Са-амфибол по составу соответствует гастингситу ($\text{с}^{\text{A}}(\text{Na}+\text{K}+2\text{Ca}) > 0,5$) и ферро-ферри-горнблендиту ($\text{с}^{\text{A}}(\text{Na}+\text{K}+2\text{Ca}) < 0,5$). Пироксены в породах представлены геденбергит-авгитом ($\text{Wo}_{42-46}\text{En}_{15-17}\text{Fs}_{37-42}$), отмечаются микроструктуры распада клинопироксена – ферросилитовые ламели ($\text{Wo}_2\text{En}_{14}\text{Fs}_{83-84}$) в геденбергитовой матрице. Биотит относится к аннитам. Полевые шпаты включают зональный и незональный плагиоклаз, состав которого варьирует от альбита до андезина (An_{40}), а также ортоклаз с микропертитовыми вростками альбита.

Петрохимия

На классификационной диаграмме TAS составы изученных пород инклавов располагаются в полях нормальнощелочных и низкощелочных кварцевых диоритов, а также гранодиоритов. Отличительной особенностью пород являются высокие относительно проанализированных образцов гранитоидов содержания Fe₂O₃^{total} (10,8–15,2 в сравнении с 2,56–6,57 мас. %),

TiO₂ (1,12–1,59 в сравнении с 0,18–0,51 мас. %), Zr (1370–2240 в сравнении с 231–913 ppm) и P (1160–1721 в сравнении с 43–400 ppm). Подобные Fe-Ti-P-обогащенные («FTP») образования рассматриваются исследователями [Emslie, 1978] как закристаллизованные остаточные расплавы после кристаллизации ассоциирующих с гранитами рапакиви анортозитов.

Для сопоставления химического состава пород инклавов использовались литературные данные составов пород, ассоциирующих с анортозитами. Анортозитсодержащие комплексы сравнения были либо без гранитов рапакиви (массив Адирондак, Северная Америка), либо рапакивисодержащие: Коростеньский плутон, Украина; Мукажаи, Бразилия; Сьерра да Провиденсия, Бразилия; Салминский батолит, Карелия. На диаграмме TAS исследуемые инклавовы не попадают в поля типичных анортозит-ассоциированных пород. В зависимости от SiO₂ они несколько более железисты, а концентрации в них TiO₂ и P находятся в пределах содержаний пород сравнения. Две пробы в координатах Zr-SiO₂ находятся в пределах поля пород Малинского массива (Коростеньский батолит), одна из них попадает также в поле пород массива Адирондак. В двух оставшихся пробах содержание Zr выше относительно пород сравнения.

Обсуждение

Согласно имеющимся представлениям [Ларин, 2011], породы Салминского АРГК формировались в результате многочисленных дискретных импульсов внедрения мафических и фельзических магм, продуцированных в течение относительно длительного периода времени. Полученные геологические и петрографические данные свидетельствуют о близко-одновременной кристаллизации инклавов и гранитов рапакиви и активном взаимодействии контрастных по составу магм. Высокожелезистый состав клинопироксена и оливина и обедненный кальцием плагиоклаз указывают, что родоначальные мафитовые расплавы инклавов являются продуктом фракционной кристаллизации, сопровождавшейся значительным накоплением железа в расплаве. Однако являются ли данные инклавовы продуктом захвата остаточной магмы после кристаллизации анортозитов, остается открытым вопросом. Несмотря на сходство микроэлементного состава с «FTP»-породами, на диаграмме TAS они не попадают в поля типичных анортозит-ассоциированных пород.

Заключение

Изученные породы по содержанию Fe, Ti, P, Zr близки к «ФТР»-породам, ассоциирующим с анортозитами, и, вероятно, также ассоциируют с анортозитами Салминского АРГК. Однако минеральный состав изучаемых инклавов аналогичен составу вмещающих пород. Отличие заключается только в относительных количествах минеральных фаз. Валовый состав изучаемых пород не соответствует составам пород, ассоциирующим с анортозитами из других массивов. Вероятно, два последних наблюдаемых факта связаны с длительной субсолидусной перекристаллизацией инклавов в условиях доминирования влияния вмещающих их кислых пород.

Литература

Ларин А. М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 402 с.

Amelin Yu. V., Larin A. M., Tucker R. D. Chronology of multiphase emplacement of the Salmi rapakivi granite-anorthosite complex, Baltic Shield: implications for magmatic evolution // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1997. Vol. 127. P. 353–368.

Didier J., Barbarin B. The different types of enclaves in granites-nomenclature: enclaves and granite petrology // *Developments in Petrology* / Eds. J. Didier, B. Barbarin. Amsterdam: Elsevier, 1991. P. 19–23.

Emslie R. F. Aorthosite massifs, rapakivi granites, and late Proterozoic rifting of North America // *Pre-cambrian Res.* 1978. Vol. 7. P. 61–98. doi: 10.1016/0301-9268(78)90005-0

Neymark L. A., Amelin Yu. V., Larin A. M. Pb-Nd-Sr isotopic and geochemical constraints on the origin of the 1.54-1.56 Ga Salmi rapakivi granite-anorthosite batholith (Karelia, Russia) // *Mineralogy and Petrology.* 1994. Vol. 50. P. 173–193. doi: 10.1007/BF01160146

References

Amelin Yu. V., Larin A. M., Tucker R. D. Chronology of multiphase emplacement of the Salmi rapakivi granite-anorthosite complex, Baltic Shield: implications for magmatic evolution. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1997;127:353–368.

Didier J., Barbarin B. The different types of enclaves in granites-nomenclature: enclaves and granite petrology. *Developments in Petrology.* Amsterdam: Elsevier; 1991. P. 19–23.

Emslie R. F. Aorthosite massifs, rapakivi granites, and late Proterozoic rifting of North America. *Pre-cambrian Res.* 1978;7:61–98. doi: 10.1016/0301-9268(78)90005-0

Larin A. M. Rapakivi granites and related rocks. St. Petersburg: Nauka; 2011. 420 p. (In Russ.)

Neymark L. A., Amelin Yu. V., Larin A. M. Pb-Nd-Sr isotopic and geochemical constraints on the origin of the 1.54-1.56 Ga Salmi rapakivi granite-anorthosite batholith (Karelia, Russia). *Mineralogy and Petrology.* 1994;50:173–193. doi: 10.1007/BF01160146

Поступила в редакцию / received: 30.07.2025; принята к публикации / accepted: 11.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Коньшев Артем Александрович

канд. геол.-мин. наук, руководитель лаборатории рудообразующих систем и минеральных ресурсов, ведущий научный сотрудник

e-mail: icelopa@gmail.com

Климовская Екатерина Евгеньевна

младший научный сотрудник лаборатории рудообразующих систем и минеральных ресурсов

e-mail: klimeee@gmail.com

Васильев Сергей Сергеевич

студент

e-mail: karel_sergey@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Konyshev, Artyom

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Leading Researcher

Klimovskaya, Ekaterina

Junior Researcher

Vasilyev, Sergey

Student