

УДК 552.322.1; 552.12

ДАЙКИ КВАРЦЕВЫХ ПОРФИРОВ И ИХ МЕСТО В СТАНОВЛЕНИИ САЛМИНСКОГО БАТОЛИТА (ЮЖНАЯ КАРЕЛИЯ)

© 2020 г. А. А. Коньшев^{1,2,*}, М. О. Аносова¹, А. А. Русак¹, И. А. Алексеев³,
А. И. Якушев⁴, член-корреспондент РАН Ю. Б. Шаповалов²

Поступило 25.12.2019 г.
После доработки 08.01.2020 г.
Принято к публикации 15.01.2020 г.

В работе приводятся новые данные о дайках кварцевых порфиров Салминского батолита, относящегося к анортозит-рапакивигранитным комплексам пород. Определены: относительные взаимоотношения различных магматических пород Салминского батолита и метасоматитов; изотопный возраст кварцевых порфиров U–Pb методом при помощи LA-ICP-MS; температура образования циркона по вхождению в них Ti. Также обнаружены сульфидные расплавные включения в цирконе.

Ключевые слова: кварцевые порфиры, рапакиви, циркон, возраст, докембрий, протерозой, ксенолит

DOI: 10.31857/S2686739720030081

Наиболее примитивные кислые породы, входящие в анортозит-рапакивигранитные комплексы пород (далее – АРГК), представляют собой амфибол-биотитовые граниты (граниты-рапакиви), они богаты K, Fe, их образование происходило при низкой фугитивности кислорода в равновесии с ильменитом и фаялитом [1]. Ассоциирующие с ними эффузивные и субэффузивные образования редки и часто сильно изменены [2, 3]. Они, в связи с более быстрым образованием по сравнению с интрузивами, несут информацию о событиях, которые могут быть затушеваны или уничтожены в результате длительной кристаллизации и автотметасоматических процессов. Например, данные о вмещающих породах уже сформированных на момент внедрения или наличие в минеральных включениях таких фаз-концентраторов рудного вещества, как сульфидный расплав. Ранее, кварцевые порфиры (далее – КП) на

основе петрохимического и геохимического сходства были отнесены к дайковой серии гранитов рапакиви [1, 4–6]. Изучаемый район также являлся местом проявления более поздней магматической активности, связанной с внедрением Валаамского силла габбро-долеритов (1457 ± 2 – 1459 ± 3 млн лет), с ним связаны выплавки кислотогаббро-долеритов [7] и нект габбро-долеритов в изучаемом районе. Дайки КП секутся только лишь дайками редкометалльных гранитов, изотопный возраст которых, как и КП – ранее не был определен. Установление изотопного возраста для КП и относительных временных взаимоотношений пород, входящих в АРГК, и пород их обрамления является главной целью данной работы. Это чрезвычайно важно, т.к. значения их изотопного возраста часто пересекаются в пределах аналитических погрешностей.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Салминский батолит образовался в интервале 1549–1537 млн. лет [8, 9] в сочленении Карельского кратона и Свекофенской складчатой области. В батолите выделяются три основных группы гранитоидов: *Vt-Amp* граниты и сиениты (1), *Vt* граниты (2), высокодифференцированные топазосодержащие граниты (3) [6]. В юго-западной оконечности купола гнейсогранитов Люпикко (AR_2-PR_1) предыдущими исследователями отмечались дайки КП и магматических брекчий [1, 4]. Тела КП представляют из себя серию даек до 100×30 м, секущие гнейсограниты купола Люпикко, а также перекрывающие его породы. Зона,

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук, г. Черноголовка, Московской обл., Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле (СПБГУ), Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: icelopa@gmail.com

в которой проявлены эти дайки, прослеживается от N61.54968 E31.57587 (WGS 84) на северо-запад. Некоторые данные по составам образцов пород, а также их координаты представлены в [10].

ОПИСАНИЕ ИЗУЧАЕМОЙ ПОРОДЫ

Рассматриваемые в работе КП представляют собой цемент магматической брекчии риолит-трахириолитового состава. В коренном залегании они имеют розовый цвет и сильно изменены, в отвалах по бортам карьера обнаружена темно-серая разность с тонко-вкрапленной сульфидной минерализацией.

Ксенолиты вмещающих пород имеют размеры от первых см до 1 м в поперечнике, представлены гнейсо-гранитами куполов AR₂—PR₁ возраста, амфиболитами сортавальской серии (а также, вероятно, внутрикупольными), слюдянными сланцами ладожской серии, магнезиальными скарнами и более ранними гранитными фазами: *Vt-Amp* граниты с текстурой “рапакиви” (выборгиты), *Vt* равномерно мелкозернистые граниты геохимически близкие гранитам 2-й группы — по [6]. В ксенолитах магнезиальных скарнов обнаружена парагенетическая ассоциация рудных минералов, характерных для постмагматических процессов: никелин, арсенопирит, герсдорфит, твердый раствор кобальтин-арсенопирит-герсдорфит, халькопирит, пирит, галенит, карбонаты меди, гессит, висмут-содержащая минерализация, минералы гр. тетраэдрита. Вкрапленники в основной массе темно-серых разностей представлены: резорбированными фенокристаллами кварца до 6–8 мм в поперечнике и резорбированными иризирующими полупрозрачными кристаллами калишпата до 4–5 мм; овальными кристаллами розоватого калишпата от первых мм по длинной стороне, до первых см; а также минеральным агрегатам, отвечающим парагенетической ассоциации гранитоидных пород, покрытых снаружи монокристаллической олигоклазовой каймой серого цвета, идентичной кайме на овоидах выборгитов. Основная масса состоит из мелкокристаллического агрегата кварца, калишпата и альбита, среди которой выделяются идиоморфные кристаллы кварца 100–300 мкм. Темноцветные силикаты — амфибол и биотит. Акцессорная минерализация: циркон, апатит, ильменит, рутил, пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит. Кварц, полевые шпаты, циркон, ильменит содержат многочисленные раскристаллизованные расплавные силикатные включения, в которых также обнаружены Fe-Mn содержащий кальцит и тонкая (менее 2 мкм) вкрапленность флюорита. Циркон содержит сульфидные расплавные включения, а также апатита и ильменита.

МЕТОДИКА

Из образцов брекчий при помощи алмазной дисковой пилы были выпилены участки цемента сложенные кварцевым порфиром, ксенолитами, они дробились и истирались для последующих исследований. Химический состав изучен методами XRF (вакуумный спектрометр Axios mAX, ИГЕМ РАН) и ICP-MS и AES (квадрупольный масс-спектрометр X-7 и атомно-эмиссионный спектрометр CAP-6500Duo, ИПТМ РАН). Также были изготовлены прозрачно полированные шлифы и аншлифы. Для изучения использовались методы оптической микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа — EPMA (CamScan MV2300 с энергодисперсионным спектрометром, ИЭМ РАН и JEOL JXA-8200 с пятью волновыми спектрометрами, ИГЕМ РАН). Цирконы для изотопных исследований выделены при помощи растворения КП цемента брекчии в плавиковой кислоте с последующей сепарацией в тяжелых жидкостях. Изотопные и геохимические исследования цирконов проводились при помощи LA-ICP-MS (масс-спектрометр Element XR с системой лазерного пробоотбора UP-213, по методике [11], ГЕОХИ РАН). Оценка температур образования циркона производилась методом оценки вхождения Ti в циркон [12].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определен возраст U-Pb методом по цирконам (31 анализ) — 1541 ± 9 млн. лет (СКВО 1.7), данные представлены на (рис. 1).

Использование метода вхождения Ti в циркон [12] дает оценки температур образования минерала 700–870°C с пиком распределения на 780–840°C, единичное зерно дало оценку температуры в 950°C. Определения проводили методами EPMA (14 измерений) и LA-ICP-MS (14 измерений). При расчетах в связи с наличием ильменита и рутила в породе принималось, что $\alpha_{Ti} = 1$. Также для грубой оценки максимальной вероятной температуры образования породы можно использовать метод насыщения расплава Zr [13]. В первом приближении, учитывая то, что основная масса, занимающая больший объем породы, представлена афировым агрегатом, можно сделать допущение, что в момент внедрения весь Zr был растворен в расплаве. Оценка температуры, полученная этим методом: 914°C. Однако надо иметь в виду, что данное значение скорее отображает максимально возможное значение температуры образования породы, так как было обнаружено зерно циркона, имеющее возраст 2447 млн лет (не учтено в выборке, как заведомо захваченное), что уже говорит о том, что не весь Zr находился в силикатном расплаве. Полученные температуры совпадают с полученными ранее оценками тем-

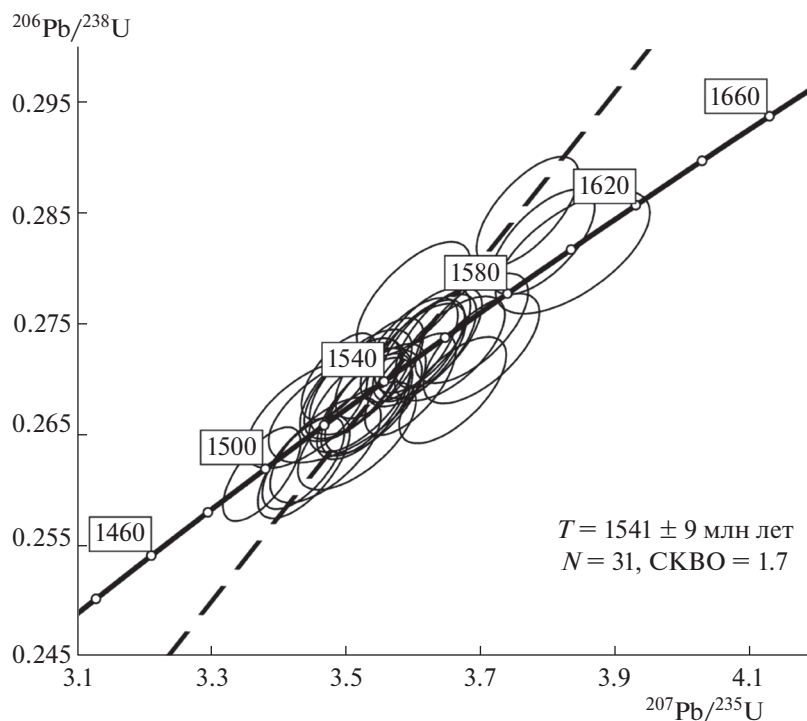


Рис. 1. Диаграмма с конкордией для циркона из кварц-порфирового цемента магматической брекчии.

ператур образования наиболее примитивных гранитов Салминского батолита 940–840°C [9].

Включения сульфидных расплавов, обнаруженные в цирконах, имеют округлые очертания до 20–25 мкм в поперечнике, иногда неизометричные. Также присутствуют расплавные гетерофазные включения сульфид-силикатного состава. По валовому макросоставу включения сульфидных расплавов близки к пирротину. Из сульфидных минеральных фаз внутри таких включений найден халькопирит. Для сульфидных включений наблюдаются повышенные концентрации некоторых халькофильных элементов (в различных точках анализа, ЕРМА): Cu, Co, Ni, Zn до 0.2, 1, 0.25, 0.6 мас. % соответственно.

Изучаемые кварцевые порфиры по нормированным спектрам распределения РЗЭ близки к гранитам-рапакиви Салминского батолита и их основной массы, кварцевым сиенитам, отличаются более значимым Eu минимумом (рис. 2). Возраст самых ранних гранитов с текстурой “рапакиви” — выборгитов Салминского батолита 1540.6 млн. ± 1.6 млн [9] попадает в пределы аналитической погрешности определенного нами возраста. Но судя по наличию гранитных ксенолитов с характерной текстурой “рапакиви” — они образовались ранее изучаемых КП. Нормированные спектры РЗЭ кварцевых порфиров отличаются от *Vt* гранитов и высокодифференцированных топазсодержащих гранитов [10] общей

концентрацией легких РЗЭ. Одна из даек КП в 500 метрах к северо-западу от места отбора сечется дайкой гранитов (№ 5 на рис. 3), имеющих спектр РЗЭ, схожий со спектром Li–F цинквалдитсодержащих гранитов [10], изотопный возраст последних не определен. Спектры РЗЭ равномерно-мелкозернистых *Vt* гранитов из ксенолитов близки к спектрам *Vt* гранитов Салминского батолита [10].

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Салминский батолит, как и многие другие АРГК, вероятно, формировался в результате нескольких импульсов магмогенерации [6]. Причем новый импульс кислого магматизма начинался с примитивных магм образующих породы схожие с *Vt-Amp* гранитами (рапакиви) и далее в результате кристаллизационной дифференциации происходила эволюция в сторону Li–F гранитов. Образование рассматриваемых нами кварцевых порфиров может быть связано с подобным, новым магматическим импульсом, произошедшим после становления полнокристаллических *Vt-Amp* гранитов (рапакиви) и *Vt* гранитов. Более глубокий Eu минимум в них по сравнению с *Vt-Amp* гранитами может являться следствием отделения расплава от магматической камеры, в которой происходила кристаллизация полевых шпатов с распределением в них Eu.

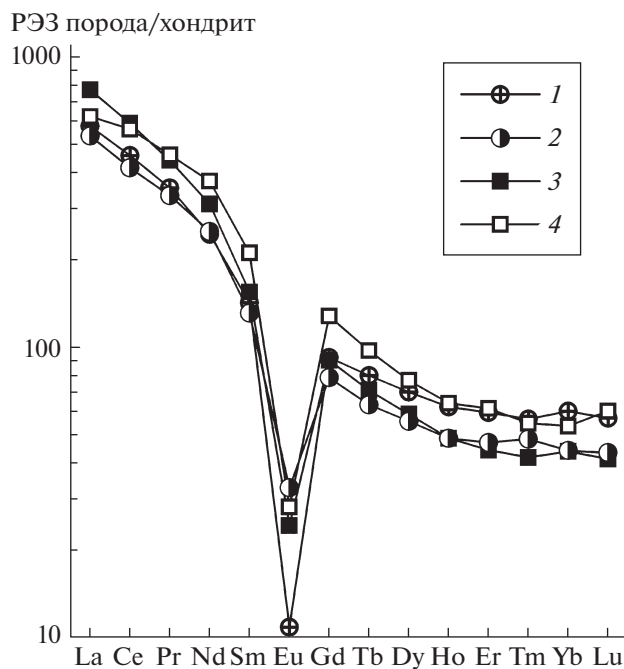


Рис. 2. Нормированные к содержаниям в хондритах по [14] спектры РЭЭ исследованных пород Салминского батолита: 1 – кварц порфировый цемент магматической брекчии, 2 – основная масса *Amp-Bt* гранитов, 3 – *Amp-Bt* граниты, 4 – кварцевые сиениты.

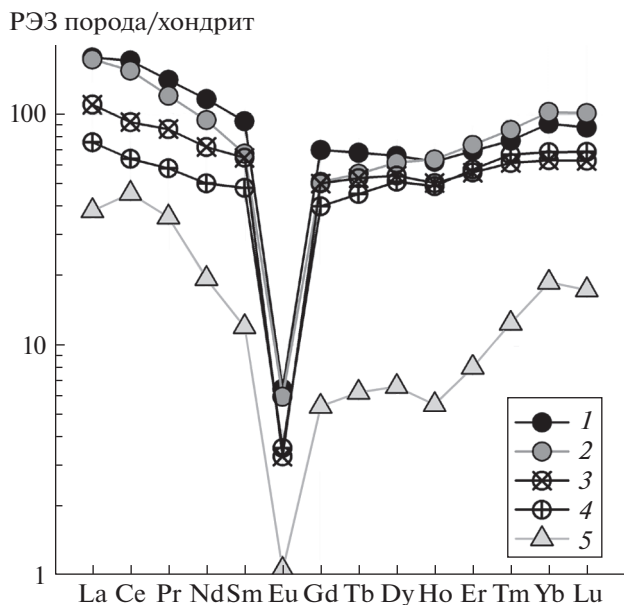


Рис. 3. Нормированные к содержаниям в хондритах по [14] спектры РЭЭ исследованных пород Салминского батолита: 1 и 2 – *Bt* граниты, 3 и 4 – ксенолиты мелко-равномернозернистых *Bt* гранитов из магматической брекчии с кварц-порфировым цементом, 5 – дайка *Li-F* гранитов, секущая дайку кварц-порфиров.

Чрезвычайно важен факт обнаружения включений сульфидного расплава в цирконах, так как сульфидный расплав является фазой, избирательно аккумулирующей многие металлы из силикатных магм, откуда они потом извлекаются и

переотлагаются в результате постмагматических процессов. Источник сульфидного расплава, захваченного минералами при кристаллизации, неизвестен. Можно предположить, что сульфидный расплав появился за счет ассимиляции магнези-

альных скарнов с сульфидной минерализацией, но их ксенолиты не переработаны, на что ранее также указывалось в [4]. Вероятно, источник сульфидного вещества располагался на больших глубинах, чем скарны с рудной минерализацией, выходящие на поверхность современного эрозионного среза. Сульфидный расплав имеет большую плотность по сравнению с силикатным и должен оставаться в рестите, но из-за меньшей вязкости он в первую очередь устремляется в зону пониженного давления, т.е. в открывшиеся трещины [15]. Из-за высокой вязкости кислого расплава сульфидные капли менее 500 мкм не могут осесть, несмотря на свою большую плотность, таким образом, они могут мигрировать совместно с кислым расплавом [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемые в работе кварцевые порфиры Салминского батолита являются геохимическими аналогами гранитов-рапакиви, но образовались после *Amp-Vt* гранитов (рапакиви) пространственно расположенных вблизи изучаемых пород. Также они образовались позже *Vt*-гранитов и скарнов с рудной минерализацией. Наиболее вероятна их связь с новым импульсом магматизма, имеющим состав, близкий к *Amp-Vt* гранитам. Верхняя температурная граница образования цирконов кварцевых порфиров равна 870°C при максимально возможной температуре для породы не более 914°C, что соответствует диапазону формирования примитивных гранитов Салминского батолита [9]. Резорбция зерен кварца и калишпата может быть связана с плавлением в результате адиабатического поднятия магмы в область растяжения. С раскрытием трещин и возникновением области пониженного давления также может быть связано инъецирование капель сульфидного расплава из неизвестного источника в магму кислого состава.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Е.А. Карандашеву, Е.В. Ковальчук, А.И. Михайловой за выполненные прецизионные анализы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа финансово поддержана РФФИ № 18-05-01101-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свириденко Л.П. Петрология Салминского массива гранитов рапакиви (Карелия). Петрозаводск.: Карельское. 1968. 116 с.
2. Беляев А.М. Петрология вулканических пород формации рапакиви (о. Гогланд) // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 28–36.
3. Ehrlich K., Ver E., Kirs J., et al. Using a titanium-in-quartz geothermometer for crystallization temperature estimation of the Palaeoproterozoic Suursaari quartz porphyry // Estonian J. of Earth Sciences, 2012. V. 61. № 4. P. 195–204. <https://doi.org/10.3176/earth.2012.4.01>
4. Беляев А.М. Закономерности распределения рудных элементов в пегматитах, пегматоидных гранитах и гранитогнейсах Северного Приладожья // В кн. Закономерности концентрации рудных элементов в гранитоидных формациях Карело-Кольского региона. Апатиты. 1985. С. 89–96.
5. Иващенко В.И., Голубев А.И. Новые аспекты минералогии и металлогении Питкярантского рудного района // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 7. С. 127–148.
6. Ларин А.М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 402 с.
7. Свириденко Л.П., Светов А.П. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера // Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 123 с.
8. 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) // Contrib. Mineral. Petrol. 1994. V. 50. P. 173–193. <https://doi.org/10.1007/BF01160146>
9. 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. V. 127. P. 353–368. <https://doi.org/10.1007/s004100050285>
10. Konyshov A.A., Chevychelov V.Yu., Shapovalov Yu.B. Two types of highly differentiated topaz-bearing granites of the Salmi batholith, Southern Karelia // Geochemistry International. 2020. V. 58. № 1. P. 11–26. <https://doi.org/10.1134/S0016702920010073>
11. Kostyitsyn Yu.A., Anosova M.O. U-Pb age of extrusive rocks in the Uxichan caldera, sredinnyi range, Kamchatka: application of laser ablation in dating young zircons // Geochemistry int. 2013. T. 51, № 2. С. 155–163. <https://doi.org/10.1134/S0016702913020055>
12. Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contrib. Mineral. Petrol. 2006. V. 151. P. 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>
13. Watson E.B., Harrison M.T. Zircon saturation revisited temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // Earth and Planetary Science Letters. 1983. V. 64. P. 295–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90211-X)
14. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1989. V. 53. P. 197–214. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X)
15. Tomkins A.G., Mavrogenes J.A. Generation of metal-rich felsic magmas during crustal anatexis // Geology. 2003. V. 31. P. 765–768. <https://doi.org/10.1130/G19499.1>

DIKES OF QUARTZ PORPHYRY AND THEIR PLACE IN THE FORMATION OF THE SALMI BATHOLITH (SOUTH KARELIA)

**A. A. Konyshov^{a,b,#}, M. O. Anosova^a, A. A. Rusak^a, I. A. Alekseev^c,
A. I. Yakushev^d, and corresponding member of RAS Y. B. Shapovalov^b**

^a Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS), Moscow, Russia

^b D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy of Russian Academy of Sciences (IEM RAS), Chernogolovka, Moscow oblast, Russia

^c Saint-Petersburg State University (SPbSU), Saint-Petersburg, Russia

^d Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russia

[#]E-mail: icelopa@gmail.com

New data about the quartz porphyry dikes of the Salmi batholith, belonging to the anorthosite-rapakivigranite complexes of rocks is presented. The relative relationships of various igneous rocks of the Salmi batholith and metasomatites; the isotopic age of quartz porphyry by U-Pb method using LA-ICP-MS; the temperature of zircon formation by Ti content are determined. Sulfide melt inclusions in zircons were also found.

Key words: quartz porphyry, rapakivi, zircon, age, Precambrian, Proterozoic, xenolith