

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ ТАНТАЛО-НИОБАТОВ ИЗ РЕДКОМЕТАЛЬНО-ГРАНИТНОГО УКСИНСКОГО ДАЙКОВОГО КОМПЛЕКСА (САЛМИНСКИЙ БАТОЛИТ, КАРЕЛИЯ)

© 2024 г. А. А. Конышев<sup>1,\*</sup>, Н. Г. Ризванова<sup>2</sup>, Н. А. Сергеева<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН Ю.А. Костицыным 02.08.2024 г.

Поступило 02.08.2024 г.

После доработки 04.08.2024 г.

Принято к публикации 05.08.2024 г.

В работе приводятся новые данные о дайках редкометальных топаз-“циннвальдитовых” гранитов Салминского аортозит-рапакивигранитного комплекса пород. U-Pb изотопным методом (ID-TIMS) определен возраст тантало-ниобатов ряда колумбит-(Fe) – танталит-(Fe) и тапиолита  $1541 \pm 2.5$  млн лет. Приведены выводы о возрастных ограничениях ассоциирующих пород, секущихся аналогичными дайками, дискретности проявления редкометального магматизма в изучаемом районе.

**Ключевые слова:** редкометальные граниты, U-Pb-изотопный возраст, аортозит-рапакивигранитный комплекс, колумбит, танталит, тапиолит, дайковый комплекс, Салминский батолит, Карелия

**DOI:** 10.31857/S2686739724120024

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее высокодифференцированные кислые породы, входящие в аортозит-рапакивигранитные комплексы пород (далее АРГК), представляют собой редкометальные граниты (Li-F-граниты). Они богаты F, Li, Rb, Ta, их образование происходит при низкой температуре в богатых флюидом условиях [1]. Редкометальные граниты в районе г. Питкяранта ранее выделялись многими авторами, наиболее полное и актуальное обобщение по породам данного комплекса дано в [2]. Однако в рассматриваемом районе присутствуют два типа редкометальных гранитов: массивные интрузивные Li-сидерофиллитовые топазсодержащие граниты и дайки топаз-“циннвальдитовых” (полилиционит-сидерофиллит) гранитов [3].

С Li-сидерофиллитовыми гранитами связан дайковый комплекс, идентичный им геохимически и имеющий разнонаправленное простижение тел. Дайки топаз-“циннвальдитовых” гранитов более эволюционно развиты чем

граниты предыдущего типа по индикатору степени кристаллизационной дифференциации Zr/Hf, они также обеднены по всем REE и имеют одинаковое простижение C3 300–330°, совпадающее с ориентировкой главных разломов в регионе. Установление временного диапазона функционирования магматических систем связанных с Салминским АРГК важно для интерпретации их участия в образовании метасоматитов, рудопоявлений и месторождений Питкярантского рудного района [2].

Определение возраста редкометально-гранитного Уксинского дайкового комплекса U-Pb-изотопным методом и относительных временных взаимоотношений пород, входящих в АРГК, является главной целью работы.

### ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Салминский АРГК расположен на стыке Карельского кратона и Свекофеннского орогена, его породы прорывают вмещающие породы: гнейсогранитные купола AR<sub>2</sub>-PR<sub>1</sub> и обрамляющие их метаосадочные породы Сортавальской и Ладожской серий.

Топаз-“циннвальдитовые” дайки редкометальных гранитов наиболее распространены в районе деревни Ууксу, расположенной в 8 км к ЮВ от г. Питкяранта. Выход топазсодержащих

<sup>1</sup> Институт геологии Карельского научного центра Российской Академии Наук, Петрозаводск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия Российской Академии Наук, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: icelopa@gmail.com

Li-сидерофиллитовых гранитов отмечается к востоку от гнейсогранитного купола Люпикко, а также в его пределах 2–7 км на восток от г. Питкяранта. Главные различия между этими типами пород: количество топаза – от акцессорного в массивных гранитах, до породообразующего в топаз-“циннвальдитовых” дайках; различный состав слюд; отличие в значении индикатора степени магматической дифференциации – Zr/Hf: менее 7.9 в топаз-“циннвальдитовых” дайках и 8.5–13.2 в массивных гранитах [3].

Для Li-сидерофиллитовых гранитов ранее был определён изотопный возраст U–Pb-методом по монациту и ксенотиту:  $1538.1 \pm 0.9$  млн лет. [4]. Для одной из даек топаз-“циннвальдитовых” гранитов определено, что она сечет дайку гранит-порфиров в пределах купола гнейсо-гранитов Люпикко [5]. В этой дайке гранит-порфиров определен изотопный U–Pb-возраст циркона  $1541 \pm 9$  млн лет. [6].

### ОПИСАНИЕ ИЗУЧАЕМОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Изучаемая дайка топаз-“циннвальдитовых” гранитов сечет амфиболиты Сортавальской серии в западном обрамлении Уксинского гнейсо-гранитного купола:  $61.52089^\circ$  с. ш.,  $31.58984^\circ$  в. д. (WGS84), простирание дайки СЗ  $332^\circ$ , падение  $60^\circ$  СВ, совокупная средняя мощность 1.6–2 м. Дайка сложносоставная, не выдержано по мощности, с многочисленными апофизами, внутреннее строение не выдержано по структурно-текстурным особенностям. Наблюдаются переходы от аплитовых разностей к пегматоидным, текстурные разности обусловлены параллельно-полосчатым распределением зерен слюды (цветное число в различных слоях от 1–2 до 10–15). Более меланократовые равномерно-меланозернистые разности (обр. АК310820-3) выполняют промежутки мощностью до 10–15 см. между пегматоидными разностями. Пегматоидные разности обусловлены, главным образом, субперпендикулярно ориентированными к простирианию дайки кристаллами калишпатита с зеленоватым оттенком (амазонитоподобный), длина до 5–7 см. Также, более меланозернистые меланократовые равномернозернистые разности формируют отдельные жилы мощностью до 1–2 см и секут более ранние текстурно-структурные взаимоотношения в дайках, иногда со смещением. Вероятно, дайка была сформирована в результате неоднократного внедрения вещества в периодически раскрывающуюся

трещину, что отразилось на ее текстурно-структурных особенностях.

### МЕТОДИКА

Из изучаемой породы (обр. АК310820-3) были изготовлены шлифы, аншлифы, протолочки, истертые пробы. При изучении породы и составляющих ее минеральных фаз использовались методы: XRF (ARL ADVANT'X); ICP-MS (Agilent 7900, “Agilent technologies”), аналитики М. В. Эхова, В. Л. Утицина, А. С. Парамонов; оптической и сканирующей электронной микроскопии (Tescan VEGA II LSH, с ЭДС Vega “INCA” Energy-350), аналитик А. Н. Терновой.

U–Pb-изотопное исследование tantalо-нибатов проводилось в ИГГД РАН (Санкт-Петербург). Отобранные из протолочки зёрна tantalита и тапиолита выщелачивали последовательно в 20% HF 30 минут, 7N HNO<sub>3</sub> 1 час и 6N HCl 2 часа на плитке при температуре  $80^\circ\text{C}$  [7], многократно отмывали ультрачистой водой. Для анализа отбирали хорошо огранённые зёрна с металлическим блеском без сростков. Отобранные кристаллы растворяли в концентрированной HF в тефлоновых блюксах при температуре  $110^\circ\text{C}$  в течение 16 часов. Та и Nb образуют нерастворимые комплексы с HCl, поэтому деление на аликовты выполняли из раствора HF [8]. Для определения содержания Pb и U использовали смешанный индикатор  $^{235}\text{U}+^{208}\text{Pb}$ . Свинец выделяли методом ионно-обменной хроматографии с использованием смолы Bio-Rad AG 1-X8 по HBr–HCl методике [9] с последующим выделением урана на смоле UTEVA. Измерения изотопного состава Pb и содержаний Pb и U выполняли на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом режиме. Загрязнение в опыте не превышало 25 пг для Pb и 1 пг для U. Первичную обработку результатов изотопного анализа Pb и U, вычисление возраста выполняли по программам Людвига [10, 11]. Расчет возраста по одной навеске колумбита-(Fe) – tantalита-(Fe) и четырем навескам тапиолита выполняли с учетом погрешности U/Pb-отношений 0.5%.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Образец АК310820-3 имеет содержания компонентов в: 6.98 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O, 72.04 SiO<sub>2</sub>, 15.57 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2.55 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sub>общ</sub>, 1.23 F; содержания элементов в г/т: 2494 Li, 1596 Rb, 65.5 Nb, 55.92 Ta; элементные отношения: K/Rb = 16.6, Zr/Hf = 2.6, Nb/Ta 1.2, Y/Ho = 9.32, La<sub>N</sub>/Lu<sub>N</sub> = 1.27,

$Gd_N/Lu_N = 0.21$ ; а также тетрадэфект ( $TE_{1,3,4} = 1.46$ ). Нормирование на хондрит проводилось по [12], расчет тетрадэфекта по [13]. На основе представленных данных, изучаемый образец может быть охарактеризован как онгонитоподобная порода, близкая по содержанию некоторых элементов и их отношениям к “дайке амазонитовой” из работы “Онгониты” [14].

Исследование морфологии, зональности и состава тантало-ниобатов из образца AK310820-3 показало, что они представлены минералами ряда колумбит-(Fe) – танталит-(Fe) и тапиолит. Колумбит представлен удлиненными (длина до 80–100 мкм, ширина до 30–40 мкм), часто зональными в близкрайней части зернами (рис. 1 а). Внешние зоны роста обогащены танталом вплоть до возможности отнесения состава этих зон к танталиту. Тапиолит представлен незональными изометрическими кристаллами до 130 мкм в поперечнике (рис. 1 б).

Все полученные при помощи СЭМ составы изученных зерен различных разновидностей тантало-ниобатов, используемых в дальнейшем для датирования, были нанесены на дискриминационную диаграмму (рис. 2).

Результаты изотопных исследований зерен тантало-ниобатов представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Отношения  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  в пяти проанализированных навесках колумбита-(Fe) – танталита-(Fe) и тапиолита находятся в пределах от 105 до 6683. Фигуративные точки располагаются на конкордии и вблизи нее. Рассчитанная по пяти точкам дискордия определяет возраст  $1541 \pm 2.5$  млн лет (CKBO = 0.9).

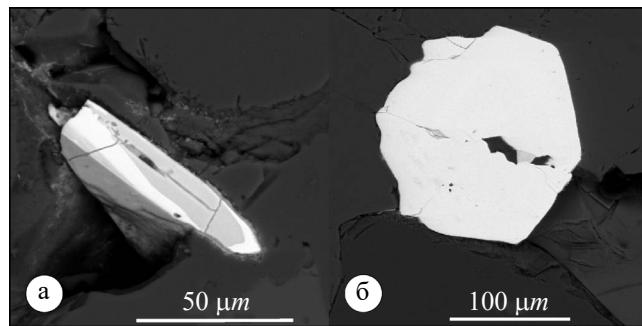


Рис. 1. Изображения типичных зерен ряда колумбит-(Fe) – танталит-(Fe) (а) и тапиолита (б), обратно-отраженные электроны.

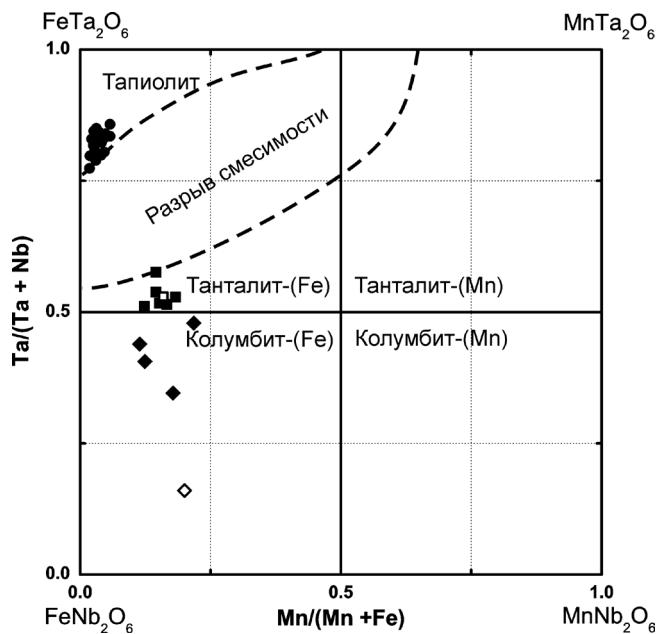


Рис. 2. Дискриминационная диаграмма для минералов ряда колумбит – танталит – тапиолит по [15]. Кружки – тапиолит, квадраты – танталит, ромбы – колумбит. Незакрашенные значки – усредненные составы, полученные для внутренней и внешней зоны зерна на рис. 1 а.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Судя по зональности зерен минералов ряда колумбит-(Fe) – танталит-(Fe) активность тантала в системе нарастала по мере роста его кристаллов, или на стадии автометасоматических преобразований.

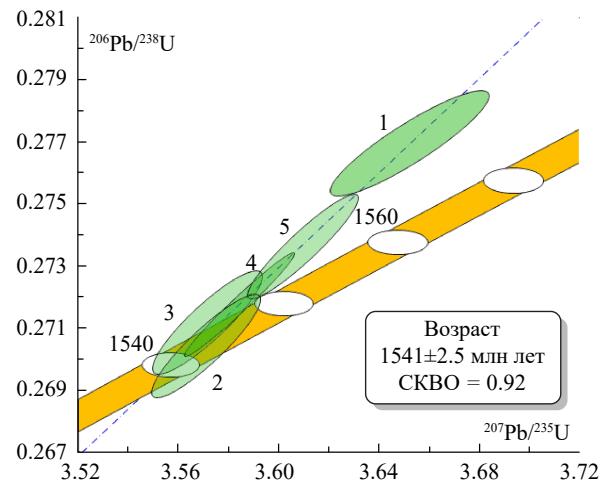


Рис. 3. Диаграмма с конкордией для тантало-ниобатов из образца AK310820-3.

Таблица 1. Результаты U–Pb-изотопных исследований тантало-ниобатов из образца АК310820-3

№ п/п	Минерал	$Pb_{c/}Pb_t$ $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}^a$	Изотопные отношения				Rho	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Возраст, млн лет	
			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^b$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^b$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
1	Колумбит-танталит-(Fe)	0.409	105	0.0956±3	0.0206±5	3.652±26	0.2769±17	0.98	1576±10	1561±11	1541±5	
2	Тапиолит	0.041	1476	0.0958±1	0.0025±4	3.571±8	0.2705±5	0.90	1543±3	1543±4	1543±2	
3	Тапиолит	0.114	501	0.0955±1	0.0046±2	3.572±8	0.2712±5	0.89	1547±3	1543±3	1538±2	
4	Тапиолит	0.169	321	0.0957±1	0.0079±3	3.610±10	0.2737±7	0.93	1559±4	1552±5	1541±2	
5	Тапиолит	0.009	6683	0.0957±1	0.0010±4	3.584±11	0.2718±8	0.98	1550±5	1546±5	1541±1	

Примечание. а – изотопные отношения, скорректированные на бланк и фракционирование; <sup>b</sup> – изотопные отношения, скорректированные на бланк, фракционирование и обычный Pb; Rho – коэффициент корреляции погрешностей отношений  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ . Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значениям цифрам. Порядковые номера в таблице соответствуют номерам точек на рисунке 3.

Полученное значение возраста совпадает с определенным ранее значением возраста для гранит-порфиров, однако имеет меньшую погрешность [5]. Так как геохимически аналогичная дайка сечет гранит-порфиры [6], это ограничивает погрешность определения возраста гранит-порфиров, уменьшая это значение в более молодую сторону с 9 до 2.5 млн лет.

Полученный нами возраст тантало-ниобатов совпадает в пределах погрешности с возрастом монацита и ксенотима из менее эволюционно-развитых редкометальных гранитов [4], 1538.5 и 1538.9 млн лет соответственно. Вероятно, упомянутые выше, два типа редкометального магматизма в изучаемом районе – связанны с различными магматическими импульсами. Так, по данным [4], выделяется как минимум 6 магматических импульсов: два мафических и четыре импульса, связанных с внедрением гранитоидных магм. Каждый из этих импульсов продуцирует свою эволюционную серию пород. Подобная дискретность магматизма присуща аортозит-рапакивигранитным комплексам [2]. Однако, так как возраста двух типов редкометальных гранитов близки, в дальнейшем необходимо дополнительно изучить вопрос их возрастного взаимоотношения.

Ранее, другими авторами делались попытки датировки кассiterита и граната, из рудных объектов района для привязки их к различным проявлениям магматизма. Кассiterит из “Старого рудного поля” датировался: LA-ICP-MS U–Pb-методом –  $1542.7 \pm 1.5$  млн лет [16], ID-TIMS U–Pb-методом  $1539.5 \pm 0.9$  млн лет [17] и  $1540.9 \pm 3.6$  млн лет [18]. Также из Питкярантского района датированы кассiterиты из пород “Старого Рудного поля” и месторождения “Кителя”, в результате получены схожие возраста [19]. U–Pb-методом из скарновой минеральной ассоциации датировался гранат:  $1539 \pm 9$  млн лет [20]. Все полученные возраста в пределах погрешности совпадают с полученными нами значениями, оставаясь, в целом, несколько моложе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые в составе Салминского АРГК, в Питкярантском районе были продатированы экстремально дифференцированные дайки редкометальных гранитов. Полученный возраст  $1541 \pm 2.5$  млн в пределах погрешности согласуется с возрастами рудной минерализации для скарновых объектов изучаемого района. Однако

в изучаемом районе также проявлены менее эволюционно развитые редкометальные граниты, имеющие несколько более молодой возраст [4], что нарушает общепринятое направление эволюции гранитного магматизма. Подобное несогласование возраста и геохимии пород, вероятно, связано с проявлением дискретности магматического процесса в Салминском АРГК и отнесением этих пород к различным магматическим импульсам. Проведенные исследования также позволили скорректировать вероятный нижний порог возраста гранит-порфиров, определённый ранее [5].

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят АО “ВАД” за расчистки обнажений и взрывные работы, проведенные в рамках реконструкции трассы Олонец–Вяртсиля в 2020 г., Я. И. Корепанова за транспортные услуги при проведении полевых работ и А. М. Ларина за ценные замечания, высказанные в процессе обсуждения.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работы по изучению пород и минералов проведены в рамках госзадания ИГ КарНЦ РАН, тема НИР FMEN-2023-0005, работы по датированию тантало-ниобатов проведены в рамках госзадания ИГГД РАН, тема НИР FMUW-2022-0005.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shapovalov Yu. B., Chevychelov V. Yu., Korzhinskaya V. S., Kotova N. P., Redkin A. F., Konyshhev A. A. Physical and Chemical Parameters of Processes Producing Rare-Metal Deposits in Granitoid Systems with Fluorine: Experimental Data // Petrology. 2019. V. 27. № 6. P. 567–584. <http://doi.org/10.1134/S0869591119060067>
2. Larin A. M. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 402 с.
3. Konyshhev A. A., Chevychelov V. Y., Shapovalov Y. B. Two Types of Highly Differentiated Topaz-Bearing Granites of the Salmi Batholith, Southern Karelia // Geochemistry International. 2020. V. 58. № 1. P. 11–26. <http://doi.org/10.1134/S0016702920010073>
4. Amelin Yu. V., Larin A. M., Tucker R. D. (1997) Chronology of multiphase emplacement of the Salmi rapakivi granitaneorthosite complex, Baltic Shield: implications for magmatic evolution // Contribution to Mineralogy and Petrology. 127 (4). 353–368. <http://doi.org/10.1007/s004100050285>
5. Konyshhev A. Natural Experiment on the Extraction and Quenching of Rapakivi-like Magmas: Traces of Interaction with the Mafic Melts and Their Derivatives, Salmi Batholith (Karelia, Russia) // Minerals. 2023. 13. 527. <http://doi.org/10.3390/min13040527>
6. Konyshhev A. A., Anosova M. O., Rusak A. A., Alekseev I. A., Yakushev A. I., Shapovalov Yu. B. Dikes of quartz porphyry and their role in the formation of the salmi batholith (South Karelia) // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 491. Part 1. P. 127–130. <http://doi.org/10.1134/S1028334X20030083>
7. Romer R. L., Smeds S. A. U–Pb columbite ages of pegmatites from Sveconorwegian terranes in southwestern Sweden // Precambrian Research. 1996. V. 76. Issues 1–2. P. 15–30. [http://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00023-2](http://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00023-2)
8. Romer R. L., Wrigg J. E. U–Pb dating of columbites: A geochronologic tool to date magmatism and ore deposits // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1992. 56. 2137–214. <http://doi.org/10.1007/s00710-016-0455-1>
9. Manhes G., Minster J. E., Allegre C. J. Comparative uranium–thorium lead and rubidium–strontium study of the Saint Severin amphoterite: consequences for early solar system chronology // Earth and Planetary Science Letters. 1978. V. 39. № 1. P. 14–27. <http://doi.org/10.1134/S0869591114040067>
10. Ludwig K. R. PbDat for MS-DOS, version 1.21 // U. S. Geological survey open-file report. 88–542. 1991. 35 p.
11. Ludwig K. R. Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Vol. 4. // Berkeley Geochronology Center Special Publications. 2003. P. 70.
12. McDonough W. F., Sun S. S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. Issues 3–4. P. 223–253. <http://doi.org/10.1016/0009-25419400140-4>
13. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1999. V. 63. № 3–4. P. 489–508. <http://doi.org/10.1524/zkri.1963.119.1-2.90>
14. Коваленко В. И., Коваленко Н. И. Онгониты – субвулканические аналоги редкометалльных литий-фтористых гранитов. М.: Наука, 1976. 129 с.
15. Černý P., Ercit T. S. Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites // Bulletin Minéralogie. 1985. V. 108. P. 499–532.
16. Neymark L. A., Holm-Denoma C. S., Moscati R. J. In situ LA-ICPMS U–Pb dating of cassiterite without a known-age matrix-matched reference material: Examples from world-wide tin deposits spanning the

- Proterozoic to the Tertiary // Chemical Geology. 2018. V. 483. P. 410–425.  
<http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.03.008>
17. Rizvanova N. G., Kuznetsov A. B. A new approach to ID-TIMS U–Pb dating of cassiterite by the example of the Pitkäranta tin deposit // Doklady Earth Sciences. 2020. V. 491. P. 146–149.  
<http://doi.org/10.1134/S1028334X20030150>
18. Tapster S., Bright J. W. G. High-precision ID-TIMS cassiterite U–Pb systematics using a low-contamination hydrothermal decomposition: implications for LA-ICP-MS and ore deposit geochronology // Geochronology. 2020. V. 2. Issue 2. P. 425–441.
19. Neymark L. A., Larin A. M., Moscati R. J. Pb-Pb and U–Pb dating of cassiterite by in situ LA-ICPMS: Example spanning  $\approx$ 1.85 Ga to  $\approx$ 100 Ma in Russia and implications for dating Proterozoic to Phanerozoic tin deposits // Minerals. 2021. 11. 1166.  
<http://doi.org/10.3390/min11111166>
20. Amelin Y., Larin A. M. U–Pb and Sm–Nd zircon and garnet geochronology of scarn formation associated with rapakivi granite magmatism: an example of the Pitkäranta ore district, south-eastern Karelia / In: Anorthosites, rapakivi granites and related rocks // IGCP 290. Abstract, Montreal, Canada. 1994.

## NEW DATA ON THE AGE OF Ta-Nb MINERALIZATION FROM THE UUKSU RARE-METAL-GRANITE DIKE COMPLEX (SALMI BATHOLITH, KARELIA)

**A. A. Konyshov<sup>a, #</sup>, N. G. Rizvanova<sup>b</sup>, N. A. Sergeeva<sup>b</sup>**

*Presented by Academician of the RAS Yu.A. Kostitsyn on August 2, 2024.*

<sup>a</sup>*Institute of Geology, Karelian Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
Petrozavodsk, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Institute of Geology and Geochronology of the Precambrian,  
Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: icelopa@gmail.com*

This work presents new data on rare-metal topaz-“zinnwaldite” granite dikes of the Salmi anorthosite-rapakivigranite complex of rocks. The isotopic age of Ta–Nb mineralization: the columbite-(Fe) – tantalite-(Fe) series and tapiolite was determined by the U–Pb method (ID-TIMS,  $1541 \pm 2.5$  Ma). Conclusions are given about the age limitations of the associated rocks, intersected by similar dikes, and the discreteness of the rare-metal magmatism manifestation in the studied area.

**Keywords:** rare-metal granites, U–Pb isotopic age, anorthosite-rapakivigranite complex, columbite, tantalite, tapiolite, dike complex, Salmi batholith, Karelia