

О возрасте наиболее древних пегматитов свекофеннского блока в Северном Приладожье (ЮВ Фенноскандинавского щита)

©2023 Ш. К. Балтыбаев^{1, 2✉}, Н. Г. Ризванова¹, Э. С. Вивдич^{1, 2},
А. М. Лезжов^{1, 2}, М. Е. Петракова¹, А. В. Юрченко¹

¹Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
наб. Макарова, д. 2, 199034, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный университет, Институт Наук о Земле,
Университетская наб., д. 7, 199034, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Введение: В свекофеннском блоке Северного Приладожья, где развит палеопротерозойский метаморфический комплекс, U-Pb датированием монацита выявлены наиболее древние для этого региона гранитные пегматиты, знаменующие завершение активной фазы плутоно-метаморфического развития структур региона. Предшествующими исследованиями свекофеннид Северного Приладожья основная фаза плутоно-метаморфической активности региона оценивалась возрастным интервалом 1881–1860 млн лет. Эти оценки основывались на U-Pb датировании циркона и монацита из различных гранитоидов и связанных с ними пегматоидных жил.

Методика: Для определения возраста пегматитовой жилы было проведено U-Pb геохронологическое исследование (ID-TIMS).

Результаты и обсуждение: Выявленный возраст изученного нами пегматита (1869 ± 5 млн лет) оказался несколько древнее известных ранее возрастов пегматитов и гранитов (1858–1860 млн лет), что сужает ранее предполагаемый временной диапазон проявления интенсивных плутоно-метаморфических преобразований в регионе. Аналогичная весьма короткая длительность активной фазы плутоно-метаморфических событий (ок. 15 млн лет) ранее выявлялась при датировании син- и пост-кинематических гранитов из Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса, расположенного к северо-западу от Северного Приладожья.

Заключение: Совпадение длительности эндогенной активности в свекофеннском блоке Приладожья с длительностью, установленной для Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса, дает возможность проводить более тесные и точные корреляции при анализе сценариев тектонического развития протерозойских пород этих смежных регионов.

Ключевые слова: U-Pb датирование, монацит, пегматит, гранит, свекофеннский блок.

Источник финансирования: Исследование было поддержано госбюджетной темой ИГГД РАН № FMUW-2022-0002.

Для цитирования: Балтыбаев Ш. К., Ризванова Н. Г., Вивдич Э. С., Лезжов А. М., Петракова М. Е., Юрченко А. В. О возрасте наиболее древних пегматитов свекофеннского блока в Северном Приладожье (ЮВ Фенноскандинавского щита) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 4. С. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/36-46>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Балтыбаев Шаукет Каимович, e-mail: shauket@mail.ru

Введение

При исследовании истории развития сложнодисциplinированных и неоднократно метаморфизованных геологических комплексов большое значение придается геохронологическому изучению интрузивных пород, занимающих ясную структурно-геологическую позицию, поскольку они могут служить важным возрастным репером при реконструкции последовательности эндогенных событий. Особое место среди интрузивных пород занимают различные дайковые и жильные тела, которые чаще всего имеют небольшие размеры, что позволяет исследовать особенности их строения и взаимоотношения с окружающими породами непосредственно в пределах локальных обнажений. Такая возможность проведения геологических наблюдений, с ясной привязкой конкретной жилы или дайки к определенным структурно-деформационным элементам, резко повышает достоверность интерпретации изотопного возраста породы.

В нашем исследовании мы обратились к геохронологическому изучению пегматитовых жил в пределах свекофеннского блока Северного Приладожья с целью определить верхний возрастной рубеж активной фазы плутоно-метаморфических событий, считавшийся ранее 1858–1860 млн лет [1–3] и установить возможную временную и генетическую связь между

позднеорогенным дайково-жильным комплексом с известными в районе разновозрастными крупными интрузиями гранитоидов.

Краткая характеристика

геологического строения и развития региона

В Северном Приладожье преобладают палеопротерозойские плутонические и метаморфические породы, слагающие структуры Свекофеннского аккреционного орогена, расположенные к югу от эпиархейского Карельского кратона [1]. Вещественный состав пород региона и их метаморфизм проявлен очень неоднородно. В северной, прикратонной области, развиты в основном немигматизированные или испытавшие лишь начальную мигматизацию гнейсы и сланцы. Эти породы имеют протолиты архейского и палеопротерозойского возраста. В южной части, в свекофенском блоке, метаморфизованные супракрастальные и (мета-)интрузивные породы имеют только палеопротерозойский возраст. Здесь широко распространены мигматиты и мигматизированные гнейсы, степень метаморфизма которых достигает гранулитовой фазии. По степени метаморфизма и тектоническому положению толщ в Северном Приладожье выделяются два домена: Северный и Южный (рис. 1), которые отделены друг от друга Мейерской надвиговой зоной [4].

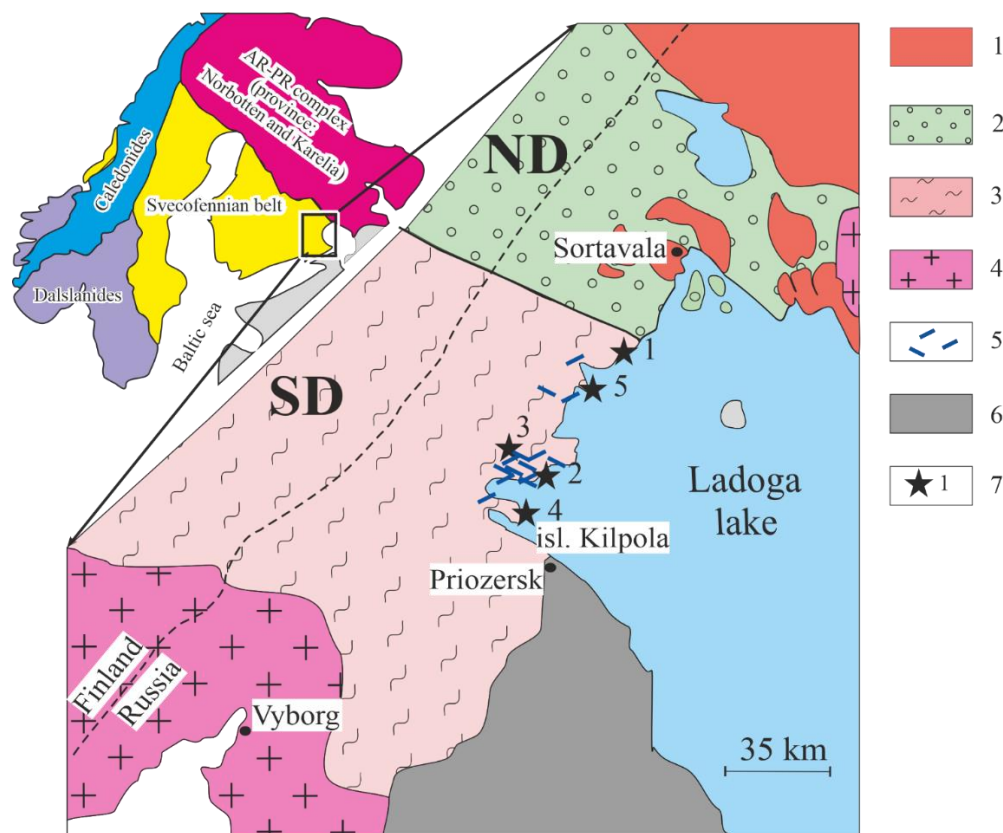


Рис. 1. Схематическое отображение двух доменов Северного Приладожья с указанием участков преимущественного развития пегматитов и позднеорогенных гранитных жил: 1 – архейский Карельский кратон; 2, 3 – свекофеннский метаморфический комплекс, Северный (ND) и Южный (SD) домены; 4 – рапакиви; 5 – местоположение «роев» пегматитов и позднеорогенных жил преимущественного гранитного состава; 6 – участки, перекрытые рифейскими отложениями; 7 – местоположение датированных пород: 1 – датированный в настоящей работе пегматит, 2–4 интрузии: 2 – Тервуская, 3 – Пелтольская, 4 – Кильполская, 5 – Путсарская. На врезке. Схема геологического строения Фенноскандинавского щита с указанием изученной площади (выделено прямоугольником).

[Fig. 1. Schematic representation of two domains of the Northern Ladoga region with indications of areas of predominant development of pegmatites and late-orogenic granite veins: (1) – Archean Karelian craton; (2, 3) – Svecofennian metamorphic complex, Northern (ND) and Southern (SD) domains; (4) – rapakivi; (5) – location of pegmatite "swarms" and late-orogenic veins of predominant granite composition; (6) – areas covered by Riphean sediments; (7) – location of dated rocks: 1 – pegmatite dated in this study, 2–4 – intrusions: 2 – Tervu, 3 – Peltola, 4 – Kilpola, 5 – Putsaari. Inset. Scheme of the geological structure of the Fennoscandian Shield with indication of the studied area (outlined by a rectangle).]

Изученные пегматиты находятся в Южном домене, который представляет собой блок, метаморфизованный до уровня гранулитовой фации и содержащий многочисленные интрузии габбро-эндербитов (1.89 млрд лет, U-Pb метод по циркону [2, 5]), тоналитов-трондьемитов (1.88–1.87 млрд лет, U-Pb метод по циркону [2, 5]) и различных гранитов (1.89, 1.87–1.86, 1.80 млрд лет, U-Pb метод по циркону и монациту [2, 5–7]).

Время накопления осадочных толщ в Южном домене определяется как палеопротерозойское по датированию кислых вулканитов [1884 млн лет, 8]. Формационный состав этих супракрустальных образований соответствует, в основном, метаморфическим аналогам палеопротерозойских турбидитов, первичная природа которых диагностируется в слабо метаморфизованном Северном домене.

Минеральные парагенезисы в метаморфических породах Южного домена позволяют выделить несколько стадий метаморфических преобразований – от пиковой гранулитовой до регрессивной фации двуслюдяных гнейсов. Для наиболее высокотемпературной ранней стадии метаморфизма по парагенезису Grt-Crd-Bt-Pl-Sil-Kfs-Qtz¹ установлены диапазоны температур (Т) и давлений (Р): Т = 790–825 °С и Р = 5–5.8 кбар [9], указывающие на уровень метаморфизма гранулитовой фации.

Сопряженный с гранулитовым метаморфизмом эндербитовый магматизм датируется возрастом 1881 ± 6 млн лет [2, 5]. В начале регрессивной стадии метаморфизма в условиях амфиболитовой фации происходило внедрение и кристаллизация диорит-тоналитовых массивов (Лауватсарского, Приозерского и т.п.) и первых калиевых порфировидных гранитов, для которых определены возрасты 1879 ± 3 (Лауватсарский), 1876 ± 6 (Приозерский), 1874 ± 4 (Кузнеценский) млн лет [1, 10]. Завершает эту стадию метаморфизма внедрение калиевых гранатсодержащих гранитов (Кильполская интрузия) возраста 1867 ± 2 млн лет [2]. Заключительная, поздняя стадия метаморфизма в Приладжье сопровождается внедрением позднеорогенных гранитов (Тервуская и Пелтолская интрузии), которые вместе с жильными фациями формировались в интервале от 1861 ± 3 до 1850 ± 4 млн лет [2, 7]. Эта стадия характеризуется снижением температуры от уровня амфиболитовой фации до фации двуслюдяных гнейсов и ниже.

¹ Grt- гранат, Crd- кордиерит, Bt- биотит, Pl- плагиоклаз, Sil- силлиманит, Kfs- калиевый полевой шпат, Qtz- кварц.

Позднеорогенный

дайково-жильный комплекс пород

Дайково-жильный комплекс состоит из нескольких генераций пересекающих друг друга линейно-вытянутых маломощных (до первых м) даек и жил гранитного состава. Хотя затруднительно достоверно судить об их распространенности в силу локальности наблюдений и слабой обнаженности пород, но отдельные участки их концентрации удается выявить (рис. 1). Определенно можно говорить, что максимальная концентрация таких жил и даек наблюдается в Тервуской зоне брекчирования, где помимо этих жильных тел развиты достаточно крупные для региона (первые десятки км²) интрузии двуполевошпатовых гранитов – Тервуская и Пелтолская [7].

Составы жильных гранитоидов часто аналогичны составам двуполевошпатовых гранитов указанных плутонов. Ранние генерации жил чаще более мелкозернистые, иногда порфировидные. Самая ранняя генерация даек и жил сложена мелкозернистыми метадиоритами и диоритовыми порфиритами; наличие порфировых фаций говорит о внедрении первых небольших порций магмы в относительно холодные вмещающие породы.

Жилы метадиоритового-гранодиоритового состава встречаются в виде самостоятельных пластовых тел на удалении от плутонов кислого и среднего состава. Известны метадиориты и в виде включений внутри плутонов, а также в зонах развития эруптивных брекчий.

Представительные химические анализы пегматитов дайково-жильного комплекса приведены в таблице 1.

По химическому составу гранитоиды дайково-жильного комплекса (включая пегматиты, о составе которых будет сказано ниже) отвечают известково-щелочным, магнезиальным диоритам – гранодиоритам с содержанием SiO₂ от 57 до 69 вес. % (рис. 2а, б, с). По содержанию ASI (0.9–1.28) являются преимущественно высокоглиноземистыми, единичные образцы – умеренно глиноземистыми. Отмечается положительная корреляция содержания щелочей с ростом кремнезёма, что может свидетельствовать о преобладающей роли кристаллизации полевых шпатов, особенно калиевого полевого шпата. Из-за переменных, но относительно высоких содержаний CaO (1–5 вес. %) и MgO (1–8 вес. %) фигуративные точки составов на тройной диаграмме источников

Табл. 1. Представительные химические анализы пегматитов Северного Приладожья (вес.%)
[Table 1. Representative chemical analyses of pegmatites of the Northern Ladoga region (wt.%)]

№	№ образца [Sample]	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП [LOI]	Сумма [Total]
1	Б-99-9	72.82	0.084	14.52	1.70	-	0.03	0.26	1.22	3.44	4.96	0.05	0.92	100
2	3056	70.17	0.47	14.60	0.84	2.35	0.01	0.92	1.10	3.50	4.51	0.11	1.42	100
3	3051-4	69.71	0.49	14.86	0.87	2.21	0.01	0.97	0.83	3.14	5.55	0.10	1.26	100
4	3059-4	70.58	0.45	14.19	0.79	1.99	0.01	0.96	1.33	2.96	5.29	0.09	1.36	100
5	3125-2	70.87	0.39	15.47	1.02	1.80	0.02	1.18	0.44	4.68	2.85	0.08	1.21	100
6	5907Г	71.44	0.31	14.25	0.97	1.32	0.02	0.93	1.24	3.38	4.69	0.07	1.37	100

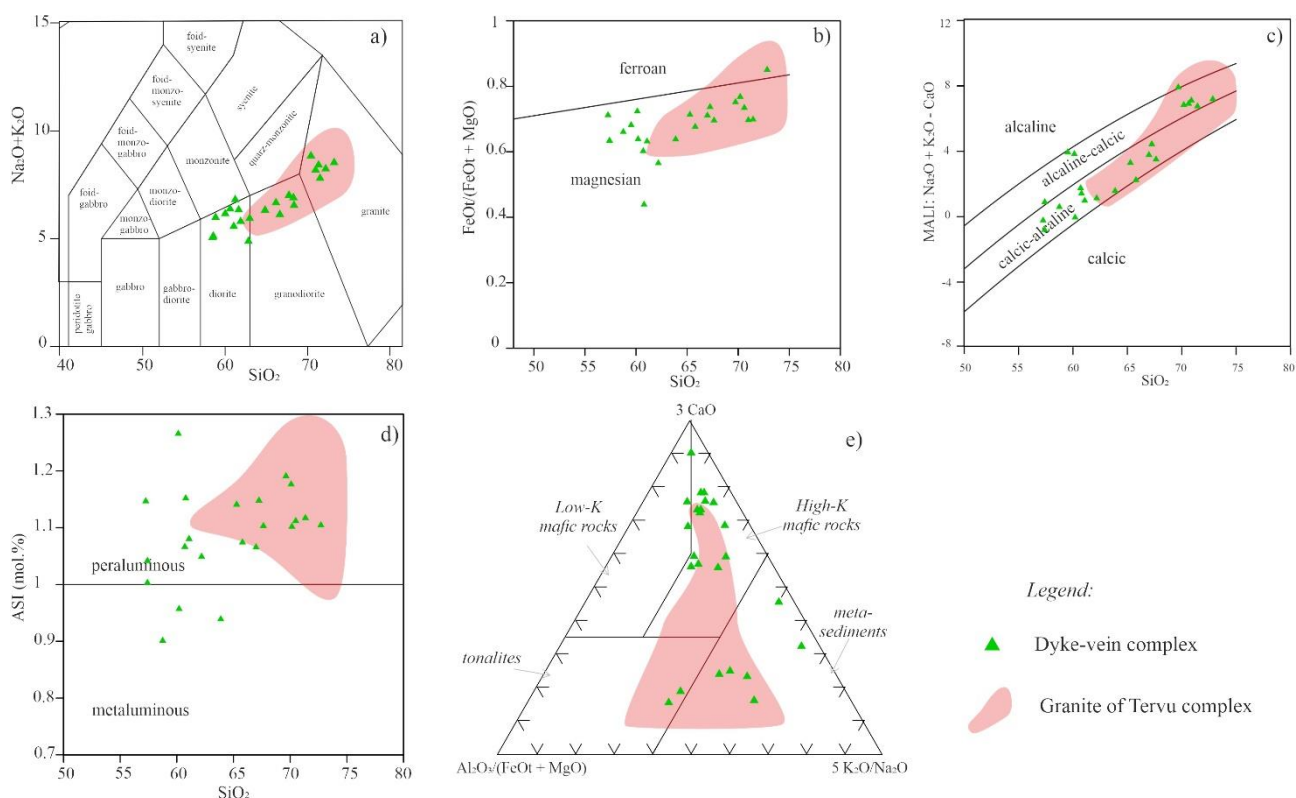


Рис. 2. Петрохимические классификационные диаграммы для пегматитов и даек позднеорогенного гранитного тервуского комплекса Северного Приладожья: *a)* SiO₂ – (Na₂O+K₂O) по [11]; *b)* FeOt/(FeOt+MgO) *c)* SiO₂ – индекс MALI и *d)* ASI = Al/(Ca – 1.67P + Na + K) по [12]; *e)* Al₂O₃/(FeOt+MgO)–3CaO–K₂O/Na₂O диаграмма, характеризующая источники по [13]. Поле составов гранитов тервуского комплекса из работы [7].

[Fig. 2. Petrochemical classification diagrams for pegmatites and dykes of the late-orogenic granites of the Tervu complex of the Northern Ladoga region: *(a)* – SiO₂ – (Na₂O+K₂O) by [11]; *(b)* – FeOt/(FeOt+MgO); *(c)* – SiO₂ – MALI index and *(d)* – ASI = Al/(Ca – 1.67P+Na+K) by [12]; *(e)* – Al₂O₃/(FeOt+MgO)–3CaO–K₂O/Na₂O diagram, characterizing sources by [13]. Composition field of granites of the Tervu complex from [7].]

попадают преимущественно в поле высоко калиевых мафических источников и лишь некоторые составы в поле метаосадочного протолита.

Пегматиты по химическому составу отвечают гранитам с содержанием SiO₂ = 70–72 вес. % и относятся к нормально и умеренно-щелочной серии (Na₂O+K₂O = 7–8 вес. %) (рис. 2а). ASI ≥ 1.1 характеризует их как высокоглиноземистые (рис. 2д). По соотношению оксидов железа и магния пегматиты пре-

имущественно относятся к магнезиальной ветви, только единичные образцы тяготеют к железистой (рис. 2б). Из-за высокой глиноземистости составы пегматитов на тройной диаграмме источников по [13] находятся в области производных плавления тоналитов и метаосадков, что сближает их с распространенным в регионе позднеорогенным комплексом гранитов, к которому относятся Тервуская и Пелтолская интрузии (рис. 2е).

Материал, методика и результаты изотопного датирования

Объектом исследования является монацитосодержащая деформированная пегматитовая жила, секущая мигматит-гнейсовую толщу (рис. 3а, б). Субвертикально залегающая жила содержит крупные кристаллы калиевого полевого шпата (преимущественно микроклин), кварца, плагиоклаза, биотита и простирается в северо-восточном направлении (70–

75°). Она отчетливо сечет более ранние складчатые структуры, но при этом имеет признаки вовлечения ее в деформацию, что видно по слабдеформированным полевым шпатам в краевой зоне пегматита. Мощность пегматита, в среднем - около 50–60 см. Кристаллы калиевого полевого шпата достигают 2–3 см, их морфологические особенности и характер распределения не обнаруживают в строении жилы какой-либо закономерности.

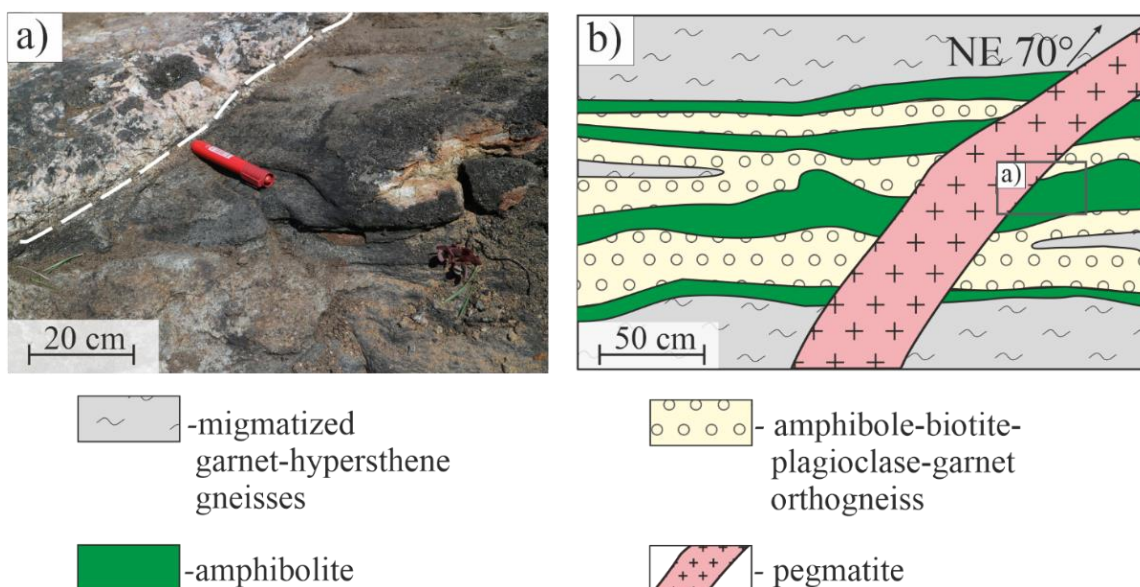


Рис. 3. Схематическая геологическая карта обнажения мигматито-гнейсовой толщи с положением секущего слабдеформированного пегматита: *a* – фотография части обнажения мигматит-гнейсовой толщи с пегматитом, *b* – геологическая схема обнажения. Прямоугольником показан участок на фотографии (*a*), из которого выделялся монацит для датирования. [Fig. 3. Schematic geological map of the migmatite-gneiss complex outcrop with the position of the cutting weakly deformed pegmatite: (*a*) – photograph of a part of the migmatite-gneiss complex outcrop with the pegmatite, (*b*) – geological scheme of the outcrop. A rectangle shows the area on the photograph (*a*), from which monazite was extracted for dating.]

Для U-Pb изотопного анализа был выделен монацит, который исследовался под оптическим микроскопом в проходящем свете и в режиме отраженных электронов на электронно-сканирующем микроскопе. Преобладают зерна разной степени прозрачности, без признаков внутренней зональности или ядер. Размеры зерен варьируют от 50 до 120 мкм. Прозрачные зерна монацита обычно мелкие и округлой формы, а ярко-желтые замутненные кристаллы чаще имеют уплощенные формы и более крупные размеры.

Выделение Pb и U из монацита проводилось с помощью HCl на ионообменной смоле BioRad AG 1-X8. Для изотопных исследований использован трассер ^{235}U - ^{208}Pb . Изотопные анализы выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом режиме. Точность определения содержаний U и Pb, а также U/Pb отношений - 0.5%. Холостое загрязнение не выше 25 пг Pb и 5 пг U.

По результатам трех измерений разных фракций монацита получено близкое к конкордантному значение возраста, равное 1869 ± 5 млн лет, СКВО = 0.42 (рис. 4, табл. 2).

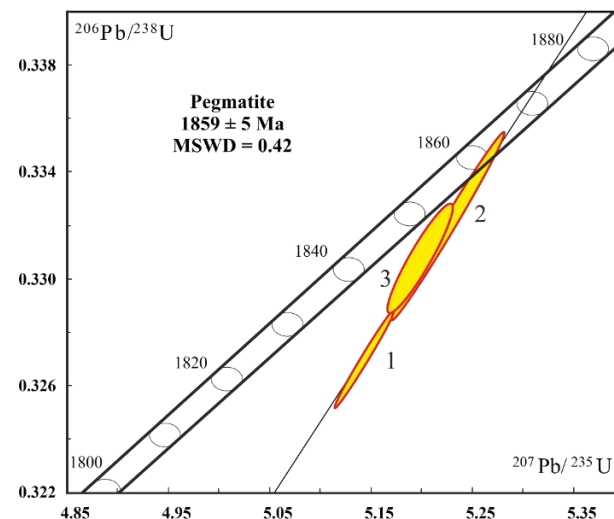


Рис. 4. Диаграмма с конкордией для монацита из изученного пегматита. Цифры при эллипсах отвечают порядковым номерам анализов в таблице 2. [Fig. 4. Concordia diagram for monazite from the studied pegmatite. Numbers at ellipses correspond to serial numbers of analyses in Table 2.]

Табл. 2. Результаты U-Pb изотопных исследований монацита из пегматитовых жил и интрузий
 [Table 2. Results of U-Pb isotope studies of monazite from pegmatite veins and intrusions]

№	Описание монацитов [Description of monazite]	Содержание, мкг/г [Content, µg/g]		Изотопные отношения [Isotope ratios]				Rho	Th/U	Возраст, млн лет [Age, Ma]			
		Pb	U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁸ Pb ^a	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
Пегматит, образец Б-21-511-1 [настоящая работа] [Pegmatite, sample B-21-511-1 [present work]]													
1	Ярко-желтый, крупный (> 100 мкм), мутный [Bright yellow, large (> 100 µm), muddy]	4934	1532	1236	0.11403	10.1943	5.1405	0.32695	0.99	28.1	1823.6±7.2	1842.87.4	1864.6±0.9
2	Тёмно-желтый, крупный, мутный [Dark yellow, large, muddy]	6795	2481	6218	0.11420	8.3982	5.2264	0.33193	0.99	23.2	1847.7±16.6	1856.9±16.7	1867.3±0.6
3	Бледно-желтый, мелкий, округлый, прозрачный [Pale yellow, small, rounded, clear]	9258	2552	1050	0.11405	11.4783	5.2006	0.33072	0.86	31.7	1841.9±3.7	1852.7±4.5	1864.9±2.3
Гранодиорит, Кильольская интрузия, образец Б-2000-29 [3] [Granodiorite, Kivrola intrusion, sample B-2000-29 [3]]													
4	-	-	-	7263	0.11591	6.7331	6.7331	5.286	0.93	18.6	1868.1	1868.1	1865.0±2.1
Пегматит, образец Б-2004 [13] [Pegmatite, sample B-2004 [13]]													
5	-	-	-	29000	0.11361	2.3429	5.222	0.3334	0.99	6.5	1854.8±10.5	1856.3±10.5	1857.9±0.7
6	-	-	-	17100	0.11374	3.4778	5.217	0.3327	0.98	9.6	1851.4±8.1	1855.5±8.2	1859.9±1.4
Гранит, Пелтолская интрузия Б-21-516 [6] [Granite, Peltole intrusion, sample B-21-516 [6]]													
7	-	2303	1033	1178	0.11356	6.5966	5.1888	0.33140	0.99	18.2	1845.2±12.2	1850.8±12.2	1857.1±0.73
8	-	2871	1321	1636	0.11359	6.4730	5.1498	0.32881	0.98	17.9	1832.6±3.3	1844.4±3.3	1857.6±0.65
9	-	3075	1492	1461	0.11344	6.1289	5.1075	0.32653	0.98	16.9	1821.6±3.2	1837.3±3.3	1855.3±0.64
10	-	2874	1300	952	0.11359	6.5795	5.1464	0.32860	0.98	18.2	1831.6±3.1	1843.8±3.2	1857.6±0.68

Примечание: ^a – изотопные отношения, скорректированные на фракционирование и лабораторное загрязнение; ^b – изотопные отношения, скорректированные на фракционирование, лабораторное загрязнение и обычный свинец. Уровень лабораторного загрязнения Pb и U не превышал 0.025 и 0.01 нг, соответственно. Изотопный анализ выполнен на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI. Погрешность измерения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U – 0.5% (2σ). Rho – коэффициент корреляции погрешностей отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U. Погрешность конкордантного возраста рассчитана без учета погрешностей констант радиоактивного распада. Th/U отношения рассчитаны по изотопному возрасту свинца на время кристаллизации минерала. Расчеты проведены по программам Ладвига [14, 15].

[Note: ^a – isotope ratios corrected for fractionation and laboratory pollution; ^b – isotope ratios corrected for fractionation, laboratory pollution, and normal lead. The level of laboratory pollution of U and Pb did not exceed 0.025 and 0.01 ng, respectively. Isotope analysis was performed using the TRITON TI Multicollector Mass Spectrometer. The error of measurements of ²⁰⁶Pb/²³⁸U and ²⁰⁷Pb/²³⁵U isotope ratios is 0.5% (2σ). Rho is the correlation coefficient of errors of ²⁰⁶Pb/²³⁸U and ²⁰⁷Pb/²³⁵U ratios. The error of the concordant age was calculated without account for errors of radioactive decay constants. Th/U ratios were calculated from the lead isotopic age for the time of mineral crystallization. The calculations were carried out using Ladwig's programs [14, 15].]

Обсуждение результатов

Возраст монацита из изученного пегматита ~ 1869 ± 5 млн лет даже с учетом величины погрешности U-Pb метода датирования (ID-TIMS) отличается от ранее известной оценки возраста пегматитов свекофеннского блока ~ 1859 ± 2 млн лет [3].

Надо отметить, что близкий возраст имеет гранит-гранодиоритовая интрузия (Кильполская), для которой был определен конкордантный возраст (с вероятностью 0.78 при 95%-ном уровне значимости) при U-Pb датировании монацита – 1867 ± 4 млн лет [2] (табл. 2). Эта интрузия находится в южной части свекофеннского блока, на о-ве Кильпола (рис. 1). К одновозрастным с ней можно отнести граниты (1868 ± 6 млн лет) и связанные с ними габбро (1870 ± 8 млн лет), обнажающихся на о. Путсари [6], находящегося также в пределах свекофеннского блока.

В этой связи следует обратить внимание на то, что достаточно много геологических примеров, указывающих на тесную возрастную и пространственную связь интрузий и жильных (пегматитовых) образований.

В работе [16] рассматривается структурная позиция и возраст гранитов и пегматитов пояса Уусима на юге Свекофеннского орогена. Авторы отмечают совпадение возрастов гранитов (1819 ± 3 млн лет) с серией пегматитов (1818 ± 3 млн лет). Для циркона из гранитов и пегматитов характерны высокие содержания U и низкое Th/U соотношение. Учитывая небольшие размеры тел гранитов и пегматитов и вовлечение их в один деформационный этап, предполагается их общий генезис при анатексисе вмещающих пород.

Аналогичные совпадающие возрасты были установлены для гранодиорит-гранитных интрузий с небольшим содержанием пегматитов в пределах интрузивных тел в Канаде (Новая Шотландия): возраст интрузии 372–373 млн лет, а пегматитов (по Sm-Nd методу датирования) – около 370 млн лет [17].

Иногда удается установить связь между интрузиями и пегматитами не только по возрасту, но и геохимическим особенностям, например, по наличию и составу расплавных включений в минералах этих пород. Ранее было показано, что присутствие многочисленных расплавных включений в минералах гранита, может быть признаком наличия у него пегматитов [18]. Составы расплавных включений (и минералов) обогащены такими элементами, как бор, фтор и т.д., характерными для пегматитов. Как установлено авторами [18], индикаторные расплавные включения в минералах гранитов и пегматитов являются хорошим критерием генетической связи интрузий и жильных тел.

Подобным образом, геохимическое сходство интрузий мусковитовых монцогранитов и пегматитов, их одинаковый возраст и тесная пространственная близость,

позволили выявить генетическую связь жильной Ta-Nb минерализации с интрузивным магматизмом [19].

В Северном Приладожье, в пределах Питкярантского пегматитового поля, пегматиты связывали с гранитами тервуского типа [20] по сходству геохимических особенностей: наличию положительных аномалий Rb, U, Th и отрицательных Ba, Sr, Eu, Ti, а также повышенному содержанию LREE при более низких содержаниях HREE. Авторы в данном примере не нашли пространственную связь пегматитов и интрузивов.

На основе изотопного анализа Pb калиевого полевого шпата из гранитных пегматитов (возраст 900–1000 млн лет) и интрузий гранитов А-типа из четырех различных районов южной Норвегии, делается вывод о том, что магмы, образующие гранитные плутоны и гранитные пегматиты, произошли из схожего источника – континентальной коры, которая первоначально сформировалась в палеопротерозойское время (около 2.10–1.86 млрд лет назад), а затем претерпела частичное плавление в мезопротерозое [21].

Интересные наблюдения были сделаны при исследовании Ошурковского плутона в Западном Забайкалье [22]. В этом, единственном на территории, базитовом массиве весь комплекс пород (плутонические и жильные базиты, сиениты, карбонатиты, граниты и гранитные пегматиты) сформировался в течение 20 млн лет. Среди пегматитов распространены гранитные, меньше сиенитовые и редко габбро-пегматиты. Пегматиты сформировались в позднем мезозое (113–121 млн лет) и синхронизированы с образованием базитовых пород, а гранитные пегматиты имеют возраст 115–112 млн лет. Эти гранитные пегматиты относятся к наиболее поздним породам и распространены в контурах плутона и в 1–3 км за его пределами. При этом наибольшее их количество сосредоточено в пределах массива и уменьшается при удалении от него.

Выявленный нами возраст изученного пегматита 1869 млн лет оказался несколько древнее известных ранее значений для пегматитов и гранитов (наиболее поздние из которых имели возраст 1858–1860 млн лет), что еще больше сужает предполагаемый ранее (1881–1860 млн лет) временной диапазон проявления интенсивных плутоно-метаморфических преобразований в регионе. Аналогичная, весьма короткая длительность активной фазы плутоно-метаморфических событий (ок. 15 млн лет) была установлена при датировании син- и посткинematических гранитов из Центрально-Финляндского гранитоидного комплекса [23], расположенного к северо-западу от Северного Приладожья. Совпадение длительности эндогенной активности дает возможность проводить более тесные корреляции при анализе сценариев тектонического развития палеопротерозойских пород этих смежных регионов.

Выводы

В свекофеннском блоке Северного Приладожья U-Pb датирование монацита позволило выявить наиболее древние для этого региона гранитные пегматиты, знаменующие завершение активной фазы плутоно-метаморфического развития структур региона. Поскольку предшествующими исследованиями свекофеннид Северного Приладожья основная фаза плутоно-метаморфической активности региона оценивалась возрастным интервалом 1881–1860 млн лет, теперь этот интервал сужается до диапазона 1881–1869 млн лет.

Две генерации пегматитов свекофеннского блока (~1869 и ~1860 млн лет) по возрасту коррелируются с широко развитыми в регионе гранитами и гранодиоритами тервуского (1860 млн лет), кильполского (1867 млн лет) и путсарского (1868 млн лет) комплексов. Полученные геохронологические данные позволяют предположить генетическую связь гранитных пегматитов с разновозрастными интрузивными комплексами региона.

Благодарности. Работа выполнена теме НИР ИГГД РАН № FMUW-2022-0002.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев И. А., Амантов А. В., Амантова М. Г., Бабичев А. В., Балтыбаев Ш. К., Бугаенко И. В. Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения). Отв. ред. Н. В. Шаров, Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2020. 435 с.
2. Балтыбаев Ш. К., Левченко О. А., Бережная Н. Г., Левский Л. К., Макеев А. Ф., Яковлева С. З. Время и длительность свекофеннской плутоно-метаморфической активности на юго-востоке Балтийского щита, Приладожье // *Петрология*. 2004а. Т. 12. № 4. С. 374–393.
3. Балтыбаев Ш. К., Левченко О. А., Глебовицкий В. А. Оценка времени региональной постпегматитовой калишпатизации по данным U-Pb датирования монацита (Метаморфический комплекс Северного Приладожья, Россия) // *ДАН*. 2010. Т. 410. № 4. С. 529–532.
4. Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В., Шульдинер В. И. Мейерский надвиг – главный элемент строения сутуры на границе Карельского кратона и Свекофеннского пояса в Приладожье, Балтийский щит // *ДАН*. 1996. Т. 348. № 3. С. 353–356.
5. Балтыбаев Ш. К., Левченко О. А., Глебовицкий В. А., Левский Л. К., Матуков Д. И., Бережная Н. Г. U-Pb датирование циркона интрузии плагиогранитов в свекофеннидах юго-востока Балтийского щита: особенности верхнего и нижнего пересечения дискордии с конкордией // *ДАН*. 2005а. Т. 402. № 6. С. 800–803.
6. Konopelko D., Eklund O. Timing and geochemistry of potassic magmatism in the eastern part of the Svecofennian domain, NW Ladoga Lake Region, Russian Karelia // *Precambrian Research*. 2003. Vol. 120. P. 37–53. DOI: 10.1016/S0301-9268(02)00141-9
7. Балтыбаев Ш. К., Ризванова Н. Г., Кузнецов А. Б., Петракова М. Е., Вивдич Э. С. Позднеорогенные гранитоиды в Тервуской агматитовой зоне в юго-восточной части Свекофеннского пояса (Северное Приладожье, Россия) // *ДАН*. 2023. Т. 511. № 2. С. 72–

80. DOI: 10.31857/S2686739723600546

8. Балтыбаев Ш. К., Левченко О. А. Вулканы в свекофеннидах Приладожья и результаты U-Pb, Pb-Pb датирования пород разного генезиса как основа для корреляции свекофеннских событий // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2005 б. Т. 13. № 2. С. 3–18.
9. Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В., Конопелько Д. Л., Левченко О. А., Седова И. С., Шульдинер В. И. Геология и петрология свекофеннид Приладожья. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2000. 200 с.
10. Балтыбаев Ш. К., Сальникова Е. Б., Глебовицкий В. А., Бережная Н. Г., Яковлева С. З., Ковач В. П. Кузнеченский массив калиевых порфиридных гранитов: результаты U-Pb датирования и обоснование тектонической позиции // *ДАН*. 2004б. Т. 398. № 4. С. 519–523.
11. Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system // *Earth-Science Reviews*. 1994. Vol. 37. P. 215–224. DOI: 10.1016/0012-8252(94)90029-9
12. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. A geochemical classification for granitic rocks // *Journal of Petrology*. 2001. Vol. 42. P. 2033–2048. DOI: doi: 10.1093/petrology/42.11.2033
13. Laurent O., Martin H., Moyen J. F., Doucelance R. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of 'modern-style' plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga // *Lithos*. 2014. Vol. 205. P. 208–235. DOI: 10.1016/j.lithos.2014.06.012
14. Ludwig K. R. PbDat 1.21 for MS-dos: a computer program for IBM-PC compatibles for processing raw Pb-U-Th isotope data. Version 1.07. U.S. Geological Survey. Open File Report. 1991. 35 p.
15. Ludwig K. R. Isoplot/Ex rev. 2.49. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication. 2001. No. 1a. 55 p.
16. Currie K. L., Whalen J. B., Davis W. J., Longstaffe F. J., Cousens B. L. Geochemical evolution of peraluminous plutons in southern Nova Scotia, Canada – a pegmatite-poor suite // *Lithos*. 1998. Vol. 44. P. 117–140.
17. Skytta P., Manttari I. Structural setting of late Svecofennian granites and pegmatites in Uusimaa Belt, SW Finland: Age constraints and implications for crustal evolution // *Precambrian Res.* 2008. Vol. 164. P. 86–109. DOI: 10.1016/j.precamres.2008.04.001
18. Thomas R., Davidson P. The missing link between granites and granitic pegmatites // *Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 58. P. 183–200. DOI: 10.3190/jgeosci.135
19. Xiong Y.-Q., Jiang Sh.-Y., Wen Ch.-H., Yu H.-Y. Granite-pegmatite connection and mineralization age of the giant Renli Ta-Nb deposit in South China: constraints from U–Th–Pb geochronology of coltan, monazite, and zircon // *Lithos*. 2020. P. 358–359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105422>
20. Егоров А. В., Арзамасцев А. А. Та-Nb минерализация в керамических пегматитах Северного Приладожья: состав и условия образования. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15 С. 136–139; DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.032>
21. Rosing-Schow N., Andersen T., Müller A. Lead isotopes and the sources of granitic magmas: The Sveconorwegian granite and pegmatite province of Southern Norway // *Minerals*. 2022. Vol. 12. No. 7. P. 878. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12070878>
22. Рипп Г. С., Дорошкевич А. Г., Ласточкин Е. И., Избродин И. А. Изотопно-геохимические особенности пород Ошурковского апатитоносного массива (Западное Забайкалье) // *Геохимия*. 2014. № 4. С. 302–318. DOI: 10.7868/S0016752514020071
23. Nironen M., Elliott B. A., Rämö O. T. 1.88–1.87 Ga post-kinematic intrusions of the Central Finland Granitoid Complex: a shift from C-type to A-type magmatism during lithospheric convergence // *Lithos*. 2000. Vol. 53. P. 37–58. DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00007-4

On the age of the most ancient pegmatites of the Svecofennian block in the Northern Ladoga region (SE of the Fennoscandian shield)

© 2023 Sh. K. Baltybaev^{1, 2✉}, N. G. Rizvanova¹, E. S. Vivdich^{1, 2},
A. M. Lezzhov^{1, 2}, M. E. Petrakova¹, A. V. Yurchenko¹

¹*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, emb. Makarova, 2, St. Petersburg, Russian Federation*

²*St. Petersburg State University, Universitetskaya embankment, 7, St. Petersburg, Russian Federation*

Abstract

Introduction: In the Svecofennian block of the Northern Ladoga region, where the Early Proterozoic metamorphic complex is developed, U-Pb dating of monazite revealed the most ancient granite pegmatites for this region, marking the completion of the active phase of magmatic and metamorphic development of the structures of the region. Previous studies of the svecofennides of the Northern Ladoga region estimated the main phase of endogenic activity in the region at an age interval of 1881–1860 Ma. These estimates were based on U-Pb dating of zircon and monazite from various granitoids and associated pegmatitic veins.

Methods: To determine the age of the pegmatite vein, a U-Pb geochronological study (ID-TIMS) was carried out.

Results and discussion: The identified age of the pegmatitic vein we studied (1869 ± 5 Ma) turned out to be somewhat older than the previously known ages of pegmatites and granites (1858–1860 Ma), which further narrows the time range of intense plutono-metamorphic activities in the region. A similar very short duration of the active phase of plutono-metamorphic events (ca. 15 Ma) was previously revealed when dating syn- and post-kinematic granites from the Central Finnish granitoid complex, located northwest of the Northern Ladoga region.

Conclusion: The coincidence of the duration of endogenous activity in the southern domain of the Ladoga region with the duration established for the Central Finnish granitoid complex makes it possible to make closer and more accurate correlations when analyzing scenarios for the tectonic development of Proterozoic rocks in these adjacent regions.

Keywords: U-Pb dating, monazite, pegmatite, granite, Svecofennian complex.

Funding: The study was supported by the State budget theme of the Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences No. FMUW-2022-0002.

For citation: Baltybaev Sh. K., Rizvanova N. G., Vivdich E. S., Lezzhov A. M., Petrakova M. E., Yurchenko A. V. On the age of the most ancient pegmatites of the Svecofennian block in the Northern Ladoga region (SE of the Fennoscandian shield) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/36-46>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Shauket K. Baltybaev, e-mail: shauket@mail.ru

REFERENCES

1. Alekseev I. A., Amantov A. V., Amantova M. G., Babichev A. V., Baltybaev Sh. K., Bugaenko I. V. *Ladozhskaya proterozoiskaya struktura (geologiya, glubinnoe stroenie i minerageniya)* [Proterozoic Ladoga structure (geology, deep structure and mineral genesis)]. Ed. Sharov N. V. Publisher Karelian Research Centre of the RAS publ., 2020, 435 p. (In Russ.)
2. Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Berezhnaja N. G., Levskij L. K., Makeev A. F., Jakovleva S. Z. Vremja i dlitel'nost' svekofennskoj plutono-metamorficheskoj aktivnosti na jugovostoke Baltijskogo shhita, Priladozh'e [Age and duration of Svecofennian plutono-metamorphic activity in the Ladoga area, southeastern Baltic Shield]. *Petrologija – Petrology*, 2004a, vol. 12, no. 4, pp. 330–347 (In Russ.)
3. Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Glebovickij V. A. Ocenka vremeni regional'noj postmigmatitovoj kalishpatizacii po dannym U-Pb datirovanija monacita (Metamorficheskij kompleks Severnogo Priladozh'ja, Rossija) [Timing of the regional postmigmatitic K-feldspar mineralization on the base of U-Pb dating of monazite (Metamorphic Complex of the Northern Ladoga Region)]. *Doklady Akademii Nauk –Doklady Earth Sciences*, 2010, vol. 430, no. 2, pp. 186–189 (In Russ.)
4. Baltybaev Sh. K., Glebovitsky V. A., Kozyreva I. V., Shuldiner V. I. Meierskii nadvig – glavnyi element stroeniya sutury na granitse Karel'skogo kratona i Svekofennskogo poyasa v Priladozh'e, Baltiiskii shchit [The Meyeri Thrust: The main element of the suture at the boundary between the Karelian Craton and the Svecofennian belt in the Ladoga region of the Baltic Shield]. *Doklady Akademii Nauk – Doklady Earth Sciences*, 1996, vol. 348, no. 3, pp. 353–356 (In Russ.)
5. Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A., Glebovitsky V. A., Levskii L. K., Matukov D. I., Berezhnaya N. G. U-Pb dating of zircon from the Svecofennian plagiogranite intrusion, Baltic Shield: Specific features of the Upper and Lower intercepts. *Doklady Akademii Nauk –Doklady Earth Sciences*, 2005a, vol. 403, no. 5, pp. 750–753 (In Russ.)
6. Konopelko D., Eklund O. Timing and geochemistry of potassic magmatism in the eastern part of the Svecofennian domain, NW Ladoga Lake Region, Russian Karelia. *Precambrian Research*, 2003, vol. 120, pp. 37–53. DOI: 10.1016/S0301-9268(02)00141-9
7. Baltybaev Sh. K., Rizvanova N. G., Kuznecov A. B., Petrakova M. E., Vydich Je. S. Late Orogenic Granitoids of the Tervu Agmatitic Zone in the Southeastern Part of the Svecofennian Belt (Northern Ladoga Area, Russia). *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 511, no. 2, pp. 685–691. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1028334X23600561
8. Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A. Vulkanity v svekofennidakh Priladozh'ja i rezul'taty U-Pb, Pb-Pb datirovanija porod raznogo genezisa kak osnova dlja korreljacii svekofennskih sobytij [Volcanics in svecofennides of the Ladoga region and results of U-Pb and Pb-Pb dating of rocks and minerals as a basis for correlation of Svecofennian events]. *Stratigrafija Geologicheskaja korreljacija – Stratigraphy and Geological correlation*, 2005b, vol. 13, no. 2, pp. 119–133 (In Russ.)
9. Baltybaev Sh. K., Glebovitsky V. A., Kozyreva I. V., Konopelko D. L., Levchenkov O. A., Sedova I. S., Shuldiner V. I. *Geologiya i petrologiya svekofennid Priladozh'ja* [Geology and petrology of svecofennids in the Ladoga area]. Saint-Petersburg, University Press publ., 2000, 200 p. (In Russ.)
10. Baltybaev Sh. K., Sal'nikova E. B., Glebovickij V. A., Berezhnaja N. G., Jakovleva S. Z., Kovach V. P. Kuznечenskiy massiv kalievyyh porfirovidnyh granitov: rezul'taty U-Pb datirovanija i obosnovanie tektonicheskoy pozicii [The Kuznечenskiy massif of potassic porphyritic granites: results of U-Pb dating and substantiation of the tectonic position (Baltic shield)]. *Doklady Akademii Nauk –Doklady Earth Sciences*, 2004b, vol. 398, no. 7, pp. 1024–1028 (In Russ.)
11. Middlemost E. A. K. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 1994, vol. 37, pp. 215–224. DOI: 10.1016/0012-8252(94)90029-9
12. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, pp. 2033–2048. DOI: 10.1093/petrology/42.11.2033
13. Laurent O., Martin H., Moyon J. F., Doucelance R. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of 'modern-style' plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 2014, vol. 205, pp. 208–235. DOI: 10.1016/j.lithos.2014.06.012
14. Ludwig K. R. PbDat 1.21 for MS-dos: a computer program for IBM-PC compatibles for processing raw Pb-U-Th isotope data. Version 1.07. *U.S. Geological Survey. Open File Report*, 1991. 35 p.
15. Ludwig K. R. Isoplot/Ex rev. 2.49. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center, Special Publication*, 2001, no. 1a. 55 p.
16. Currie K. L., Whalen J. B., Davis W. J., Longstaffe F. J., Cousens B. L. Geochemical evolution of peraluminous plutons in southern Nova Scotia, Canada—a pegmatite-poor suite. *Lithos*, 1998, vol. 44, pp. 117–140.
17. Skytta P., Manttari I. Structural setting of late Svecofennian granites and pegmatites in Uusimaa Belt, SWFinland: Age constraints and implications for crustal evolution. *Precambrian Research*, 2008, vol. 164, pp. 86–109. DOI: 10.1016/j.precamres.2008.04.001
18. Thomas R., Davidson P. The missing link between granites and granitic pegmatites. *Journal of Geosciences*, 2013, vol. 58, pp. 183–200. DOI: 10.3190/jgeosci.135
19. Xiong Y.-Q., Jiang Sh.-Y., Wen Ch.-H., Yu H.-Y. Granite-pegmatite connection and mineralization age of the giant Renli Ta-Nb deposit in South China: constraints from U–Th–Pb geochronology of coltan, monazite, and zircon. *Lithos*, 2020, pp. 358–359. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105422
20. Egorov A. V., Arzamastsev A. A. Ta-Nb mineralizaciya v keramicheskikh pegmatitah Severnogo Priladozh'ya: sostav i usloviya obrazovaniya [Ta-Nb mineralization of ceramic pegmatites of the Northern Ladoga Region: composition and formation conditions]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii Geologicheskij institut Kol'skogo nauchnogo centra RAN – Proceedings of the Fersman Scientific Session of Geological Institute of Kola Scientific Centre of RAS*, 2018, vol. 15, pp. 136–139. DOI:10.31241/FNS.2018.15.032 (In Russ.)
21. Rosing-Schow N., Andersen T., Müller A. Lead isotopes and the sources of granitic magmas: The Sveconorwegian granite and pegmatite province of Southern Norway. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 7, pp. 878. DOI: 10.3390/min12070878
22. Ripp, G. S., Doroshkevich, A. G., Lastochkin, E. I., Izbrodin, I. A. Isotope and geochemical characteristics of rocks from the Oshurkovo apatite-bearing massif, Western Transbaikalia. *Geochemistry International*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 271–286. DOI:10.1134/s0016702914020074
23. Nironen M., Elliott B. A., Rämö O. T. 1.88–1.87 Ga post-kinematic intrusions of the Central Finland Granitoid Complex: a shift from C-type to A-type magmatism during lithospheric convergence. *Lithos*, 2000, vol. 53, pp. 37–58. DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00007-4

Балтыбаев Шаукет Каимович, д.г.-м.н., профессор, Институт Наук о Земле, Санкт-Петербургский Государственный университет, зав. лаб. петро- и рудогенеза, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: shauket@mail.ru; ORCID 0000-0002-6484-2042

Вивдич Эмилия Сергеевна, инж. лаб. петро- и рудогенеза, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, аспирант кафедры Петрографии Института Наук о Земле, Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: emily.vivdich@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5799-1712

Лезжов Арсений Михайлович, инж. лаб. петро- и рудогенеза, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, аспирант кафедры Петрографии Института Наук о Земле, Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: arsenylez@gmail.com; ORCID 0000-0002-5901-7822

Петракова Марина Евгеньевна, к.г.-м.н, м.н.с. лаб. петро- и рудогенеза, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: maribya@mail.ru; ORCID 0000-0002-5721-1082

Ризванова Наиля Гаптрахмановна, к.г.-м.н, ст.н.с. лаб. геохронологии и геохимии изотопов, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: rizng@mail.ru; ORCID 0000-0002-6426-2486

Юрченко Анастасия Владимировна, к.г.-м.н, мл.н.с. лаб. петро- и рудогенеза, Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: yurchenko-nastya@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3999-5151

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Shauket K. Baltybaev, Dr. habil. in Geology and Mineralogy, Professor of Institute of Earth sciences of St. Petersburg State University, Chief of laboratory petro- and oregogenesis of Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: shauket@mail.ru; ORCID 0000-0002-6484-2042

Emilia S. Vivdich, Engineer in laboratory petro- and oregogenesis of Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, Graduate Student of Institute of Earth sciences of St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: emily.vivdich@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5799-1712

Arseny M. Lezzhov, Engineer in laboratory petro- and oregogenesis of Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, Graduate Student of Institute of Earth sciences of St. Petersburg State University Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: arsenylez@gmail.com; ORCID 0000-0002-5901-7822

Marina E. Petrakova, PhD in Geology and Mineralogy, Researcher in laboratory petro- and oregogenesis of Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: maribya@mail.ru; ORCID 0000-0002-5721-1082

Nailya G. Rizvanova, PhD in Geology and Mineralogy, Senior Researcher in laboratory of geochronology and geochemistry of isotopes, Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: rizng@mail.ru; ORCID 0000-0002-6426-2486

Anastasia V. Yurchenko, PhD in Geology and Mineralogy, Researcher in laboratory petro- and oregogenesis of Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: yurchenko-nastya@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3999-5151

All authors have read and approved the final manuscript.