

УДК 552.163

Возраст и петрографический состав пород восточного обрамления Печенгской структуры, Кольский регион

Е. А. Ниткина*, Т. В. Каулина, Н. Е. Козлов

*Геологический Институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская область, Россия;
e-mail: nitkina@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7242-1950>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
27.12.2019;

получена
после доработки
17.03.2020

Ключевые слова:
U-Pb датирование,
минералогия
циркона,
Архейские
комплексы
Кольского региона

Изучение и датирование пород в районе Центрально-Кольского блока (Кольский полуостров) обусловлены необходимостью разработки Лицевского урановорудного района, наиболее перспективного в отношении добычи урана в Кольском регионе, расположенного в непосредственной близости от изучаемого района и сложенного аналогичными гнейсами кольской серии. В пределах Центрально-Кольского блока архейские комплексы представлены гранито-гнейсами и мигматитами с реликтами биотит-плагиоклазовых, биотит-амфибол-плагиоклазовых гнейсов, амфиболитов, гранат-биотит-плагиоклазовых и глиноземистых гнейсов, содержащих прослойки железистых кварцитов (кварцевых метасоматитов) различной мощности. Породы неоднократно метаморфизованы в условиях от высокотемпературных ступеней амфиболитовой фации до гранулитовой фации. Геологическими и геохронологическими методами установлена последовательность геологических процессов, проявленных в породах кольской серии северо-западного обрамления Печенгской структуры. Результаты U-Pb-датирования определены по зернам циркона следующего генезиса: метаморфического – в гнейсе; магматического и метаморфического – в метагаббро; метаморфического и метасоматического – в кварцевом метасоматите. Полученные данные позволили установить возрастную последовательность геологических процессов: 2,8 млрд лет назад – время метаморфизма гранат-биотитовых гнейсов; $2\,722 \pm 9$ млн лет – кристаллизации гранодиоритов; $2\,636 \pm 41$ млн лет – образование аплитовидных гранитов; $2\,620 \pm 16$ млн лет – внедрение пегматитов; возраст аплитовидных гранитов и пегматитов отмечает заключительные этапы архейской эволюции района; $2\,587 \pm 5$ млн лет – внедрение габброидов, $2\,522$ – $2\,503$ млн лет – период термального процесса, с которым связано образование кварцевых метасоматитов во время метаморфизма габбро и гранат-биотитовых гнейсов; $2\,507 \pm 7$ млн лет – метаморфизм, расщепление и будинирование габброидов.

Для цитирования

Ниткина Е. А. и др. Возраст и петрографический состав пород восточного обрамления Печенгской структуры, Кольский регион. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 46–56. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-46-56

The ages and rock mineral composition of the Pechenga eastern frame, the Kola region

Elena A. Nitkina*, Tat'yana V. Kaulina, Nikolay E. Kozlov

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: nitkina@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7242-1950>

Article info

Received
27.12.2019;

received
in revised
17.03.2020

Key words:
U-Pb dating,
zircon mineralogy,
Archean complexes
of the Kola region

Abstract

The research and dating of rocks in the area of the Central Kola block (the Kola Peninsula) is due to the need to develop the Lyceum uranium ore area, the most promising for uranium mining in the Kola region, located in close proximity to the study area and composed of similar gneisses from the Kola series. Within the Central Kola block, Archean complexes are represented by granite-gneisses and migmatites with relicts of biotite-plagioclase, biotite-amphibole-plagioclase gneisses, amphibolites, garnet-biotite-plagioclase and aluminous gneisses containing interlayers of ferruginous quartzite (quartz metasomatites) of various capacities. The rocks are repeatedly metamorphosed in conditions from high-temperature steps of the amphibolite facies to the granulite facies. Geological and geochronological methods have established the sequence of geological processes manifested in the rocks of the Kola series of the northwest framing of the Pechenga structure. The results of U-Pb dating are determined by zircon grains of the following genesis: metamorphic – in gneiss; magmatic and metamorphic – in metagabbro; metamorphic and metasomatic – in quartz metasomatite. The data obtained have made it possible to establish the age sequence of geological processes: 2.8 Ga – the time of metamorphism of garnet-biotite gneisses; $2,722 \pm 9$ Ma – crystallization of granodiorites; $2,636 \pm 41$ Ma – the formation of aplitic granites; $2,620 \pm 16$ Ma – the emplacement of pegmatites; the age of aplitic granites and pegmatites marks the final stages of the Archean evolution of the region; $2,587 \pm 5$ Ma – the emplacement of gabbroids, $2,522$ – $2,503$ Ma – the period of the thermal process associated with the formation of quartz metasomatites during the metamorphism of gabbro and garnet-biotite gneisses; $2,507 \pm 7$ Ma – metamorphism, schist and budding of gabbroids.

For citation

Nitkina, E. A. et al. 2020. The ages and rock mineral composition of the Pechenga eastern frame, the Kola region. *Vestnik of MSTU*, 23(1), pp. 46–56. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-46-56

Введение

Кольский регион расположен в северо-восточной части Балтийского щита (рис. 1) и состоит из Мурманского, Центрально-Кольского, Беломорского, Терского, Кейвского и Инари террейнов¹ (Mitrofanov et al., 1995; Балаганский, 2002). Разделяют блоки супракустальные пояса различного возраста и геотектонической природы: Колмозеро-Вороньинско-Урагубский, Терско-Аллареченский, Тана-Корватундровский зеленокаменные пояса; Кейвская парагнейсовая структура, Лапландско-Колвицкий гранулитовый пояс и Полмак-Пасвик-Печенга-Варзугский рифтогенный пояс.

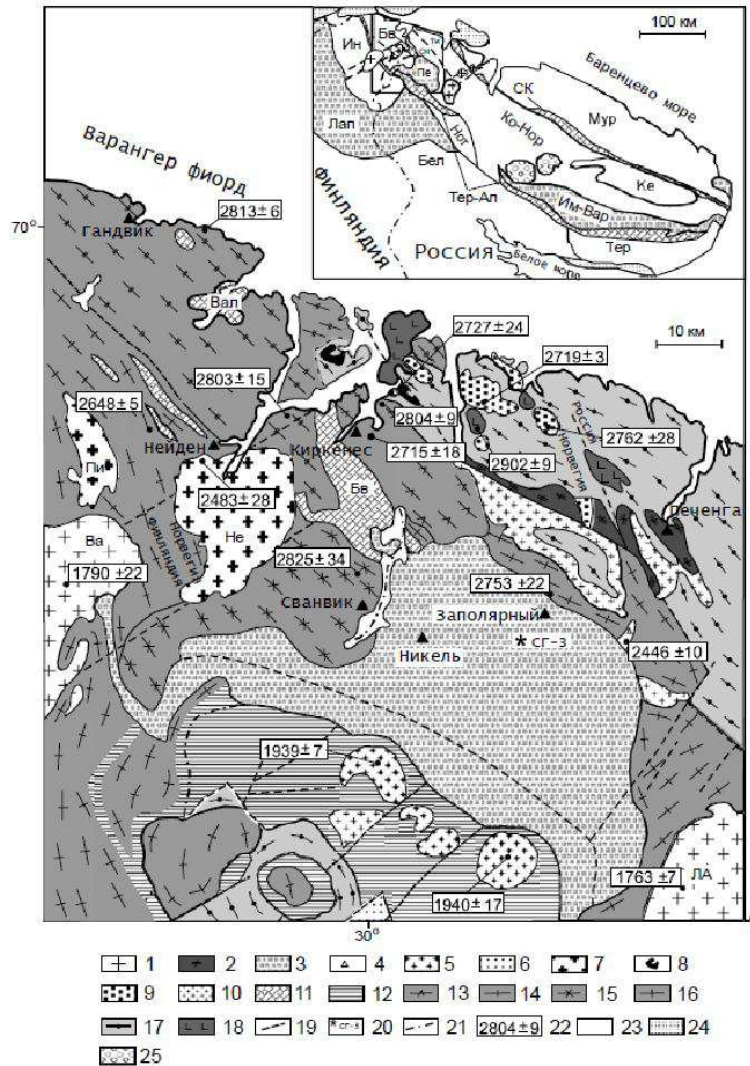


Рис. 1. Схема геологического строения Северной Норвегии и северо-западной части Мурманской области (Ветрин, 2007)
 Fig. 1. The geological map of northern Norway and the northwestern part of the Murmansk region (Ветрин, 2007)

На рис. 1 представлены следующие обозначения: *породы протерозойского возраста* (1–6): 1 – постскладчатые граниты и пегматиты (ЛА – лицо-арагубский комплекс, Ва – массив Вайноспаа); 2 – мусковит-микроклиновые граниты и гранитизированные породы; 3 – вулканогенно-осадочные породы Печенгско-Имандра-Варзугского пояса; 4 – породы основного состава; 5 – кварцевые диориты, тоналиты, гранодиориты каскельяврского комплекса; 6 – гранулиты; *породы позднеархейского возраста*

¹ См.: Объяснительная записка к геологической карте северо-восточной части Балтийского щита, масштаб 1:500 000 (Радченко А. Т., Балаганский В. В., Басалаев А. А., Беляев О. А., Пожиленко В. И., Радченко М. К.). Препринт. Апатиты : КНЦ РАН, 1994. 95 с.; Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита), масштаб 1:500 000 (гл. ред. Ф. П. Митрофанов; авторы – Балаганский В. В., Басалаев А. А., Беляев О. А., Пожиленко В. И., Радченко А. Т., Радченко М. К.). Апатиты, 1996.

(7–18): 7 – порфировидные граниты (Пи – массив Пириваара, Не – массив Нейден); 8 – кварцевые сиениты, сиениты; 9 – монцониты, гранодиориты; 10 – плагиомиоклиновые граниты; 11 – вулканогенно-осадочные породы зеленокаменных поясов; 12 – нерасчлененные породы Терско-Аллареченского зеленокаменного пояса и фундамента; 13–16 – "серые гнейсы" дацит-плагиориодацитового состава различных комплексов: 13 – Киркенес, 14 – Варангер, 15 – Сванвик, 16 – Гарсио (+ нерасчлененные комплексы); 17 – гнейсы с высокоглиноземистыми минералами; 18 – эндербиты; 19 – проекции разломов; 20 – Кольская сверхглубокая скважина; 21 – государственные границы; 22 – результаты изохронного U-Pb-датирования (млн лет); вверху во врезке представлена схема тектонического районирования Кольской субпровинции Балтийского щита; 23 – архейские породы; 24 – позднепротерозойские осадочные породы; 25 – палеозойские интрузии нефелиновых сиенитов.

Исследование и датирование пород проводилось в пределах Центрально-Кольского блока (рис. 1) (Ветрин, 2007; Горяинов, 1980; Балаганский, 2002).

Архейские комплексы в районе Центрально-Кольского блока представлены гранито-гнейсами и мигматитами с реликтами биотит-плагиоклазовых, биотит-амфибол-плагиоклазовых гнейсов, амфиболитов, гранат-биотит-плагиоклазовых и глиноземистых гнейсов, содержащих прослойки железистых кварцитов (кварцевых метасоматитов) различной мощности (Полканов, 1935; Беляев, 1976; Авакян, 1992; Балаганский, 2002), а также ортопорадами разного состава и происхождения (Ранний докембрий Балтийского щита, 2005; Кольская сверхглубокая..., 1998). К последним относятся тоналит-трондьемитовые и эндербитовые гнейсы, чарнокито- и гранито-гнейсы, идентифицированные как вещество первичной сиалической коры (Батиева и др., 1968; Ветрин и др., 1987). Породы неоднократно метаморфизованы в условиях от высокотемпературных ступеней от амфиболитовой до гранулитовой фации (Беляев, 1976; Виноградов и др., 1973). Возраст наиболее раннего метаморфизма кольской серии составляет 2,8 млрд лет, последнего метаморфизма – 2,7 млрд лет (Митрофанов, 2001; Vetrin et al., 2013); возраст протолита гнейсов установлен в 2,9 млрд лет (Беляев и др., 1977; Vetrin et al., 2013). Подобный возраст (2,96 млрд лет) известен для циркона из гнейсов кольской серии (Мыскова и др., 2005; Мыскова и др., 2016).

Среди гнейсов кольской серии выделяется несколько групп гранитоидов. Для гиперстенсодержащих тоналит-гранодиоритов, входящих в состав гнейсового комплекса Хомпен (Норвегия, район Серварангер), был определен с помощью U-Pb-метода по циркону наиболее древний для Кольского полуострова возраст $2\,902 \pm 9$ млн лет (Levchenkov et al., 1995).

Внедрение больших плутонов и даек гранодиоритов (эндербитов и эндербито-чарнокитов) в кольские гнейсы во время поздней стадии гранулитового метаморфизма (Nordgulen et al., 1995) происходило в интервале 2 709–2 762 млн лет. Метаморфизованные в условиях гранулитовой фации гнейсы комплекса Ярфиорд прорываются интрузиями монцонит-сиенитовой серии возрастом $2\,727 \pm 28$ млн лет (Levchenkov et al., 1995; Nordgulen et al., 1995).

Среди интрузий гранитоидного состава протерозойского возраста выделяются группа гранитоидов и кварцевых диоритов возрастом 1 940 млн лет (Шуонинский, Роусельский, Каскельярский, Мунозерский и другие комплексы) и группа многофазных тел северо-восточного простирания, сложенных субщелочными гранитами (Лицко-Арагубский и Вайноспаа комплексы) или плагиогранитами (Стрельнинский комплекс) возрастом 1 760 млн лет. Помимо описанных гранитоидов в архейском фундаменте Печенгской структуры и ее южного обрамления в толщах тоналит-трондьемитовых гнейсов встречаются микроклиновые граниты и гранитизированные породы возрастом 2 225–2 150 млн лет (Бибикова и др., 1993; Ветрин, 2014).

Цель настоящего исследования заключалась в установлении с помощью структурно-метаморфических и геохронологических методов последовательности процессов образования и преобразования пород, проявленных в породах трех детальных участков (Перевал, Полигонный и Малонемецкая бухта). Изучение и датирование пород на данных участках обусловлены необходимостью разработки Лицевского урановорудного района, наиболее перспективного в отношении добычи урана в Кольском регионе, расположенного в непосредственной близости от изучаемого района Центрально-Кольского блока и сложенного аналогичными гнейсами кольской серии.

Материалы и методы

Методика

Циркон из мономинеральных фракций был разделен на морфологические типы и генерации с целью проведения U-Pb-датирования. Среди зерен циркона различных морфологических типов, установленных по габитусу, окраске, прозрачности, были выделены генерации циркона по наличию во внутреннем строении зональности, ядер и оболочек.

U-Pb-определение возраста циркона проводилось в лаборатории геохронологии и геохимии изотопов в Геологическом институте Кольского научного центра РАН (Каулина, 2010). Химическое разложение навесок циркона и выделение U и Pb осуществлялось по методу Т. Кроу (Krogh, 1973). Концентрации U

и Pb определялись методом изотопного разбавления со смешанным трассером ^{208}Pb - ^{235}U на масс-спектрометре MI-1201T. Уран наносился вместе со свинцом на одинарную Re ленточку с H_3PO_4 и силикагелем. Измерения выполнялись при температурах 1 300 и 1 500 °C для свинца и урана соответственно. Холостое загрязнение составляло менее 0,2 нг для свинца и 0,05 нг для урана. Изотопные отношения свинца исправлены на масс-дискриминацию $0,18 \pm 0,05 \%$ a.m.u (MI-1201T) и определены на основе параллельных анализов стандарта SRM-982. Все расчеты выполнены с использованием программ PBDAT и ISOPLOT (Ludwig, 1985; Ludwig, 2003) на основе принятых констант распада урана (Steiger et al., 1977), ошибки не превышали уровня 2σ ; ошибка воспроизводимости отношений U/Pb составила 0,5 %.

Геологическое описание участков

Участок Полигонный представлен (Nitkina et al., 2019; Козлов и др., 2006) чередованием светло-серых гранитов и гранат-биотитовых гнейсов с прослоями ставролит-гранат-биотитовых гнейсов (рис. 2) (мощность прослоев гранитов 15–40 м; мощность прослоев гранат-биотитовых гнейсов 15–50 м). В центре участка в плагиограните прослеживается линза гранат-биотитовых гнейсов мощностью 3 м. Породы имеют южное падение (углы падения 64–82°). Среди гранат-биотитовых гнейсов встречаются зоны окварцевания этих гнейсов и кварцевые жилы с гранатом (приуроченным к контакту жил с гнейсами), расположенные по простиранию породы. Зоны окварцевания представляют собой зоны наиболее интенсивно проявленных тектонических процессов. Гнейсы прорваны телами гранитных пегматитов северо-западного простирания. Мощность гранитных пегматитов составляет 1,5–2 м. Предполагается, что окварцевание гнейсов связано с процессом гранитизации.

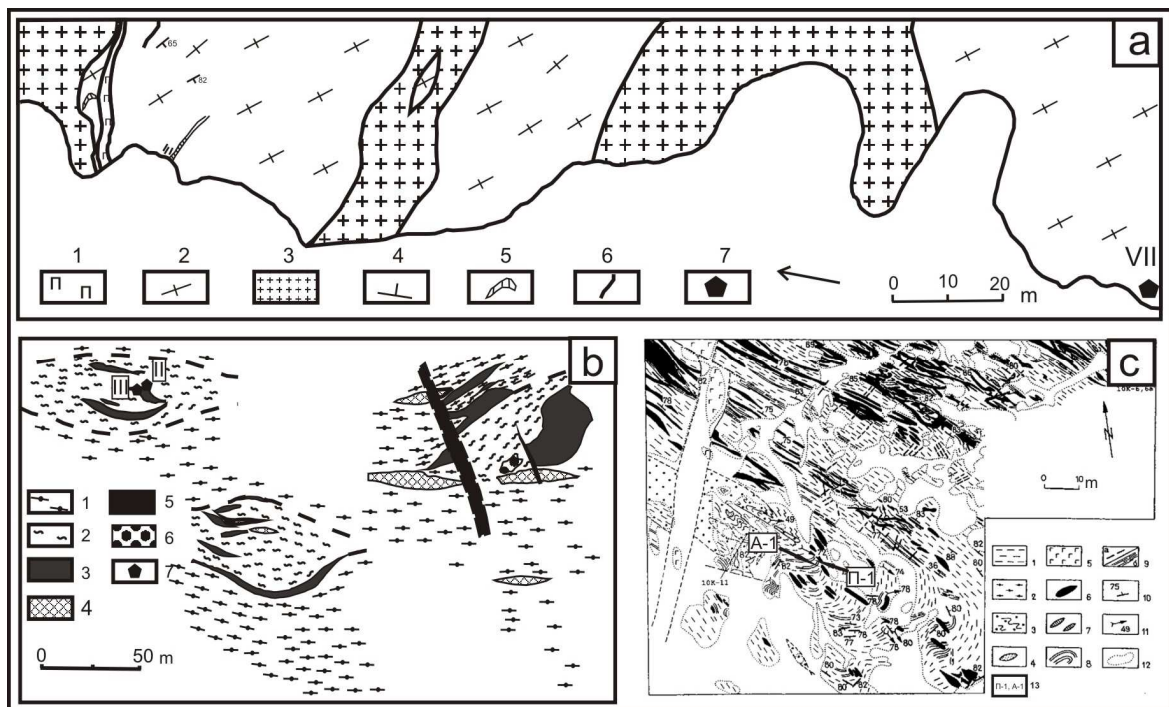


Рис. 2. Геологическое строение деталей участков обрамления Печенгской структуры (Nitkina et al., 2019)
 Fig. 2. Geology of the Pechenga frame outcrops (Nitkina et al., 2019)

На рис. 2 представлены схемы геологического строения участков: *a* – Полигонный: 1 – пегматиты; 2 – гранат-биотитовые гнейсы; 3 – плагиограниты; 4 – элементы залегания пород; 5 – зоны окварцевания; 6 – кварцевые жилы; 7 – точки отбора проб; *b* – Перевал: 1 – биотит-амфиболовые гнейсы; 2 – метагаббро; 3 – кварцевые метасоматиты; 4 – гранодиориты; 5 – долериты; 6 – гранатовые амфиболиты; 7 – точки отбора проб; *c* – Малонемецкая Бухта: 1 – биотит-амфиболовые гнейсы; 2 – железистые кварциты; 3 – железистые кварциты и гранатовые амфиболиты; 4 – гранодиориты; 5 – габброиды; 6 – плагиомикроклиновые пегматиты; 7 – кварцевые жилы; 8 – аплитовидные граниты с амфиболом; 9 – разломы; 10 – элементы залегания пород; 11 – шарниры складок пластического сдвига; 12 – границы разновидностей пород; 13 – точки отбора проб.

В пределах участка Перевал гранат-биотитовые и биотитовые гнейсы субширотного простирания расположены на всей площади участка (рис. 3). В гнейсах, ориентированных согласно плоскостям

сланцеватости, залегают метаморфизованные и будинированные тела метагаббро, представленные полевошпатовыми амфиболитами. На контакте этих метаморфизованных основных тел и гранат-биотитовых гнейсов развиты кварц-магнетитовые и кварц-силикатные (кварц-пироксеновые, кварц-амфиболовые с гранатом и без граната) метасоматические породы – кварцевые метасоматиты. Прорываются метагаббро аплитовидными гранитами. Будинированные тела гранитных пегматитов располагаются по простиранию сланцеватости гранат-биотитовых и биотитовых гнейсов. Самые молодые породы на участке представлены дайками метадолеритов с субширотным и субмеридиональным простиранием.

Участок Малонемецкая Бухта сложен мигматизированными биотит-амфиболовыми и биотитовыми гнейсами с прослоями кварцевых метасоматитов (рис. 4). Эти породы испытали метаморфизм амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций, в то время как окружающие их гранат-биотитовые и глиноземистые гнейсы за пределами участка являются диафоритами амфиболитовой фации по гранулитовой фации. Прорываются породы участка жилами аплитовидных гранитов и пегматитов. В пределах участка Малонемецкая бухта встречаются гранодиориты возрастом $2\,722 \pm 9$ млн лет (Козлов и др., 2006).

Последовательность эндогенных процессов, отбор проб и петрографическая характеристика образцов

Последовательность эндогенных процессов определяется следующими этапами. Чередование пород, исходных для биотитовых, гранат-биотитовых, ставролит-гранат-биотитовых гнейсов, считается первичной полосчатостью. Во время первого этапа деформации произошло образование сланцеватости, тонкой и грубой мигматитовой полосчатости. Во время второго этапа деформаций мигматитовая полосчатость была смята в складки; параллельно осевым плоскостям складок образовались пегматиты. Между вторым и третьим этапами деформаций произошло внедрение пластовых тел габброидов, пород, исходных для метагаббро. Во время третьего этапа деформаций внедрились тела гранитов; гранат-биотитовые, биотитовые гнейсы и габброиды совместно претерпели разлинзование и будинаж. Тела габброидов были превращены в амфиболиты. По зонам рассланцевания, маркирующим границы линз внутри тел метаморфизованных габброидов, образовались кварц-магнетит-силикатные породы (кварцевые метасоматиты и железистые кварциты). На контакте основных пород с гранат-биотитовыми, биотитовыми гнейсами образовались магнетит-кварцевые, магнетит-амфиболовые, магнетит-пироксеновые полосчатые породы. После третьего этапа деформации образовались крупнозернистые пегматиты, секущие границы линз амфиболитов. Во время четвертого этапа деформаций произошла совместная деформация гнейсов, пегматитов и гранитов и образовались крупнозернистые микроклинсодержащие аплитовидные граниты. Во время завершающего этапа развития произошло внедрение даек метадолеритов, которые образовались по сети субширотных и субмеридиональных трещин.

Для U-Pb-исследований на участке Полигонный (рис. 2, а) в южной части были отобраны гранат-биотитовые гнейсы (проба VII, 12 кг), являющиеся самыми древними породами района исследований. На участке Перевал (рис. 2, б) в центральной части из будинированного тела метагаббро отобрана проба II (27,7 кг), связанная с первым этапом магматизма, а также на контакте амфиболита и гранат-биотитового гнейса произведен отбор кварцевых метасоматитов (проба III), образование которых связано с третьим этапом метаморфизма и деформаций. На участке Немецкая бухта (рис. 2, в) отобраны пробы аплитовидных гранитов (проба А-1, 2,5 кг) и пегматитов (проба П-1, 3,2 кг), отвечающие заключительным этапам архейской эволюции района.

Гранат-биотитовый гнейс (проба VII) со сланцеватой текстурой и лепидогранобластовой структурой состоял из зерен кварца (40 %) размером 0,15–0,45 мм; лейст биотита (20 %) размером 0,06–0,6 мм, образующих мелкочешуйчатую массу; зерен плагиоклаза (20 %) размером 0,3–0,9 мм, по которым развивается эпидот и хлорит; зерен граната (10 %, 0,6–3 мм), который по трещинам замещен хлоритом и биотитом; скоплений призматических кристаллов кианита (3 %) и ставролита (3 %), а также чешуек мусковита (3 %); рудного минерала (1 %), образующего мелкую рудную вкрапленность по спайности и границам зерен биотита; округлых зерен циркона (единичные знаки) размером 0,03 мм, образовавших плеохроичные дворики в биотите.

Метагаббро (проба II) с массивной текстурой и нематобластовой структурой сложено зернами амфибола (85 %) размером 0,3–3 мм и бесцветными зернами плагиоклаза (15 %) размером 0,2–0,25 мм.

Кварцевый метасоматит (проба III) имеет сланцеватую текстуру, гранобластовую структуру и состоит из трещиноватых без включений зерен кварца (60–65 %) размером 0,3–3 мм; вытянутых по сланцеватости лейст куммингтонита (10–15 %), который рядом с рудным минералом в некоторых местах замещается амфиболом; зерен ортопироксена (10 %) размером 0,5–1,5 мм, замещающимся куммингтонитом; рудного минерала (5–10 %), образующегося на контакте кварца и куммингтонита в виде зерен, вытянутых по сланцеватости.

Мелкозернистые аплитовидные граниты имеют аллотриоморфнозернистую структуру и состоят из кварца (40 %), плагиоклаза (55 %), биотита (5 %). Пегматиты представляют собой породу с порфиробластовой структурой, состоящую из кварца (65 %), плагиоклаза (35 %) и калиевого полевого шпата в виде антипертитовых вростков в плагиоклазе.

Результаты и обсуждение

Описание и U-Pb-возраст циркона

В гранат-биотитовом гнейсе (проба VII) выделено две генерации циркона (рис. 3): ранняя (призматические кристаллы со сложным внутренним строением) и более поздняя метаморфическая (гомогенные призматические кристаллы и оболочка на ранней генерации циркона) (Ниткина и др., 2019).

U-Pb-дискордия, построенная по трем фигуративным точкам метаморфического циркона (рис. 4, таблица), имеет верхнее пересечение с конкордией, равное $2\,810 \pm 150$ млн лет (СКВО = 5,5). Этот возраст установлен с большой погрешностью, так как определения проведены предварительные и только по трем точкам, и интерпретируется как время метаморфизма гранат-биотитовых гнейсов.

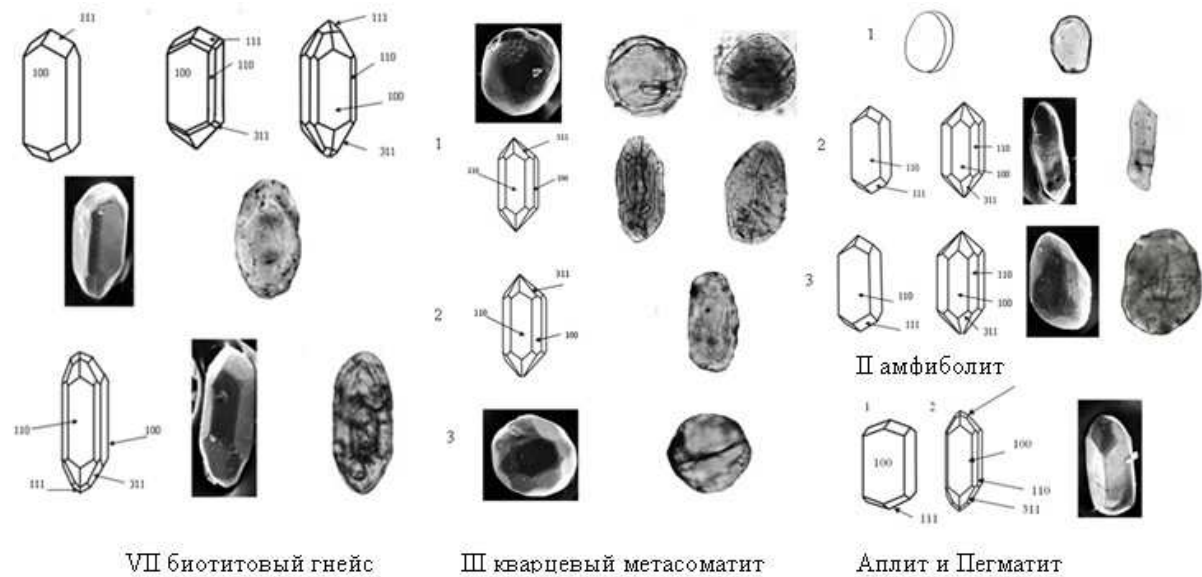


Рис. 3. Морфология и анатомия кристаллов циркона (Ниткина и др., 2019)
Fig. 3. Zircon morphology and internal structure (Ниткина и др., 2019)

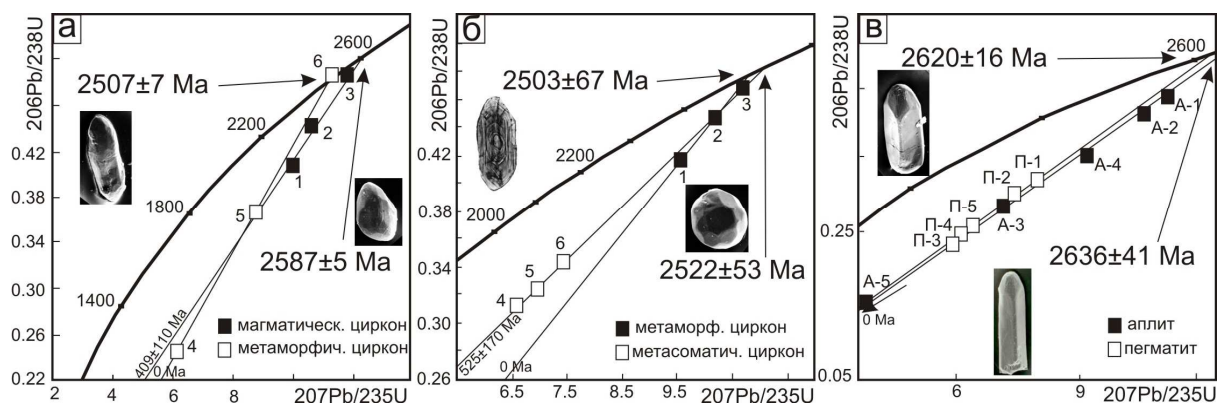


Рис. 4. Изотопная U-Pb-диаграмма с конкордией (Nitkina et al., 2019): а – для циркона из метагаббро (проба II); б – для циркона из кварцевого метасоматита (проба III); в – для циркона из аплитовидных гранитов (проба А1) и пегматитов (проба П1)
Fig. 4. U-Pb isotope diagram with concordia (Nitkina et al., 2019): а – for zircon from metagabbro (II); б – for zircon from quartz metasomatite (III); в – for zircon from aplite (A1) and pegmatite (P1)

Таблица. Изотопные U-Pb-данные для циркона
из пород участков Полигонный, Перевал и Малонемецкая бухта
Table. U-Pb isotope data for zircon from rocks
of the Poligon, Pereval, and Malonemetskaya Bay outcrops

Точки на графике (рис. 4)	Навеска, мг	Содержание ppm		Изотопный состав свинца			Изотопные отношения		Возраст, млн лет
		Pb	U	$\frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}}$	$\frac{206\text{Pb}}{207\text{Pb}}$	$\frac{206\text{Pb}}{208\text{Pb}}$	$\frac{207\text{Pb}}{235\text{U}}$	$\frac{206\text{Pb}}{238\text{U}}$	
Аплитовидный гранит (проба А-1)									
А-1	0,6	32	59	1230	5,359	4,833	10,669	0,4377	2623
А-2	0,7	31	73	1219	5,158	4,532	10,238	0,4199	2623
А-3	0,5	43	104	945	4,792	3,698	7,181	0,2899	2650
А-4	1,2	23	48	1210	5,203	4,392	8,891	0,3583	2653
А-5	0,5	55	208	1139	5,056	4,012	3,719	0,1568	2578
А-6	0,4	161	281	834	4,774	3,647	9,197	0,3854	2588
А-7	0,4	77	194	1086	5,249	3,853	6,821	0,2922	2550
Пегматит (проба П-1)									
П-1	0,65	192	523	605	5,125	12,184	7,899	0,3274	2606
П-2	0,6	224	647	505	5,080	10,887	7,317	0,3033	2606
П-3	0,65	193	739	658	5,723	14,540	5,753	0,2399	2596
П-4	1,0	535	1027	723	5,983	11,893	5,984	0,2489	2600
П-5	1,0	521	965	810	6,039	15,332	6,304	0,2633	2593
Кварцевый метасоматит (проба III)									
1	0,9	134	307	1400	5,710	19,7800	9,5058	0,4142	2522
2	0,4	271	460	210	4,436	4,8860	10,2244	0,4470	2517
3	1,1	231	471	2450	5,910	22,7400	10,6181	0,4683	2502
4	0,9	110	330	1050	6,048	15,6602	6,6430	0,3133	2388
5	0,9	78	215	510	5,560	9,5970	6,8971	0,3218	2407
6	0,3	155	368	260	4,900	6,1076	7,4310	0,3433	2424
Метагаббро (проба II)									
1	1,4	35	80	1200	5,570	12,7700	9,5616	0,4097	2551
2	1,5	46	89	450	5,116	7,6562	10,3361	0,4449	2543
3	2,5	46	70	210	4,330	4,3500	11,5915	0,4868	2584
4	0,7	126	458	580	5,312	8,6140	5,5593	0,2408	2533
5	0,6	81	197	580	5,320	8,6800	8,3906	0,3643	2528
6	1,0	89	151	300	4,878	6,3490	11,0325	0,4856	2505

В метагаббро (проба II) выделено три генерации циркона (рис. 3): магматический циркон – розовые призматические кристаллы с неровными гранями и искривленной формой, что свойственно для основных пород, так как теряется преимущество кристаллизации циркона; метаморфический – коричневые кристаллы короткопризматического габитуса с развитыми иррациональными гранями, которые образуются при нарастании однородного циркона в условиях амфиболитовой фации метаморфизма; метаморфический розовый однородный – оболочки на кристаллах второго морфологического типа и мелкие кристаллы (Ниткина и др., 2019).

U-Pb-дискордия, построенная по двум фигуративным точкам магматического циркона (рис. 4, таблица), имеет верхнее пересечение с конкордией, равное $2\ 587 \pm 5$ млн лет, и соответствует времени внедрения габброидов. U-Pb-дискордия, построенная по трем фигуративным точкам метаморфического циркона (рис. 4, таблица), имеет верхнее пересечение с конкордией, равное $2\ 507 \pm 7$ млн лет (СКВО = 1,3), и отвечает времени метаморфизма габброидов.

В кварцевом метасоматите (проба III) выделяются три генерации циркона (рис. 3) (Nitkina et al., 2019): ксеногенный циркон из амфиболитов, метаморфический призматический (розовые гомогенные кристаллы) и метаморфический розовый изометричный (образованный при избытке кремнезема и добавки железа) (Козлов и др., 2007).

U-Pb-дискордия, построенная по трем фигуративным точкам метаморфического циркона (рис. 4, таблица), имеет верхнее пересечение с конкордией, равное $2\ 503 \pm 67$ млн лет (СКВО = 3,1) (Nitkina et al., 2019). U-Pb-дискордия, построенная по трем фигуративным точкам метасоматического циркона (рис. 4, таблица), имеет верхнее пересечение с конкордией, равное $2\ 522 \pm 53$ млн лет (СКВО = 1,6) (Nitkina et al.,

2019). Возрасты, учитывая метаморфический и метасоматический генезис циркона, интерпретируются как время образования кварцевых метасоматитов во время метаморфизма габбро и биотитовых гнейсов.

В пробе аплитовидного гранита (проба А1) отмечены (Nitkina et al., 2019) два типа циркона (рис. 3): основной объем пробы (85 %) составляют розоватые, длинно- и короткопризматические кристаллы гиацинтового типа размером 75–250 мкм. В меньшем количестве (до 15 %) присутствуют коричневые длиннопризматические кристаллы. Для пяти фракций розового циркона (рис. 4, таблица) получен возраст 2636 ± 41 млн лет, который, вероятно, отвечает возрасту аплитовидного гранита. Коричневый циркон имеет более молодой возраст (рис. 4, в, точки на графике А-6 и А-7; таблица).

В пробе пегматита (проба П1) представлены (Nitkina et al., 2019) коротко- и длиннопризматические кристаллы (рис. 2). Окраска циркона варьирует от бесцветной (редкие зерна) до желтой и коричневой; размер зерен до 300 мкм. Возраст циркона (рис. 4, таблица), полученный по пяти фигуративным точкам циркона, равен 2620 ± 16 млн лет и отвечает времени кристаллизации жилы, близкой по возрасту к кристаллизации аплитовидных гранитов.

Заключение

В результате исследования получены геохронологические данные, на основе которых уточнена последовательность образования и возрасты пород на трех детальных участках по кварцевым метасоматитам, что позволит в дальнейшем скоррелировать их с показателями, определенными в ходе изучения метасоматитов Лицевского урановорудного района. Наиболее древними породами являются гранат-биотитовые, биотитовые гнейсы (возраст их метаморфизма 2,8 млрд лет) и гранодиориты (возраст кристаллизации 2722 ± 9 млн лет) (Козлов и др., 2006). Пегматиты возрастом 2620 ± 16 млн лет и аплитовидные граниты возрастом 2636 ± 41 млн лет образовались в гнейсах во время второго этапа деформаций на заключительном этапе архейской эволюции района. Тела метагаббро имеют возраст кристаллизации 2587 ± 5 млн лет и в настоящее время представлены метаморфизованными и будинированными телами амфиболитов (возраст метаморфизма 2507 ± 7 млн лет); возраст кварцевых метасоматитов, появившихся при метаморфизме габбро и гранат-биотитовых гнейсов (2522 ± 53 млн лет и 2503 ± 67 млн лет) интерпретируется как время проявления термального процесса, с которым связано их образование.

Результаты исследования согласуются с литературными данными, полученными для пород северо-западной части Кольско-Норвежского блока: возраст пород ТТГ-серии находится в пределах от 2825 ± 34 до 2804 ± 9 млн лет, возраст интрузий гранодиоритов – от 2762 ± 28 до 2729 ± 10 млн лет (Levchenkov et al., 1995; Бибикова и др., 1993; Vetrin et al., 2013; Vetrin et al., 2018), возраст кварцевых сиенитов – 2727 ± 24 млн лет (Levchenkov et al., 1995), возраст диоритов Малонемецкой бухты – 2724 ± 27 млн лет (Козлов и др., 2007). Первый метаморфизм и гранитизация пород кольской серии оценивается в 2760–2710 млн лет, следующий этап метаморфизма имел место 2640–2630 млн лет назад (Авакян, 1992; Levchenkov et al., 1995). Образование пегматитовых жил и кварцевых метасоматитов в северном обрамлении Печенги происходило 2620 ± 16 и 2503 ± 67 млн лет назад (Козлов и др., 2007).

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0052 "Геологические и геодинамические закономерности развития северо-востока Фенноскандинавского щита в раннем докембрии как основа для расширения минерально-сырьевой базы Арктической зоны Российской Федерации". Авторы благодарят доктора геол.-минерал. наук А. В. Волошина за проведение консультаций по минералогии циркона, Н. Е. Козлову – за проведение консультаций по геологическому строению района, Е. Э. Савченко – за предоставление качественных фотографий циркона, выполненных с использованием растрового электронного микроскопа.

Библиографический список

- Авакян К. Х. Геология и петрология Центрально-Кольской гранулит-гнейсовой области архея. М. : Наука, 1992. 164 с.
- Балаганский В. В. Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.01. СПб., 2002. 32 с.
- Батиева И. Д., Бельков И. В. Гранитоидные формации Кольского полуострова // Очерки по петрологии, минералогии и металлогении гранитов Кольского полуострова / отв. ред. И. В. Бельков. Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1968. С. 28–43.
- Беляев О. А. Прогрессивный зональный метаморфизм раннего протерозоя северо-запада Кольского полуострова / Метаморфизм докембрийских комплексов (Кольский полуостров) : сб. ст. / отв. ред. В. Г. Загородный. Апатиты : Кольск. филиал АН СССР, 1976. С. 31–49.
- Беляев О. А., Загородный В. Г., Петров В. П., Волошина З. М. Фации регионального метаморфизма Кольского полуострова. Л. : Наука, 1977. 88 с.

- Бибикова Е. В., Ветрин В. Р., Кирнозова Т. И., Макарова В. А. [и др.]. Геохронология и корреляция пород нижних частей разреза Кольской сверхглубокой скважины // Доклады Академии наук. 1993. Т. 332, № 3. С. 360–363.
- Ветрин В. Р. Длительность формирования и источники вещества гранитоидов лицко-арагубского комплекса, Кольский полуостров // Геохимия. 2014. № 1. С. 38–51. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016752514010099>.
- Ветрин В. Р. Протерозойские процессы магматизма и метасоматоза в архейских породах фундамента Печенгского палеорифта // Вестник МГТУ. 2007. Т. 10, № 1. С. 116–129.
- Ветрин В. Р., Пушкарев Ю. Д., Рюнгенен Г. И., Шлайфштейн Б. А. Геологическое положение и возраст гранитов южной части Печенгского района // Строение и метаморфическая эволюция главных структурных зон Балтийского щита : сб. ст. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1987. С. 83–92.
- Виноградов А. Н., Виноградова Г. В. Метаморфизм пород кольской серии и проблема оценки перспектив слюдоносности северо-западной части Мурманской области // Проблемы изучения и освоения природных ресурсов Севера : сб. ст. Апатиты : КФАН СССР, 1973. С. 19–30.
- Горяинов П. М. Кольско-Норвежский мегаблок – древнейший кратон в докембрии Кольского полуострова // Региональная тектоника раннего докембрия СССР : сб. ст. / Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1980. С. 88–103.
- Каулина Т. В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты : КНЦ РАН, 2010. 144 с.
- Козлов Н. Е., Мартынов Е. В., Козлова Н. Е., Каулина Т. В. [и др.]. Петрохимическая систематика амфиболитов архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины // Геохимия. 2007. № 2. С. 150–158.
- Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Глазнев В. Н., Козлова Н. Е. [и др.]. Геология архея Балтийского щита / отв. ред. В. П. Петров. СПб. : Наука, 2006. 345 с.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. М. : ТЕХНОНЕФТЕГАЗ, 1998. 260 с.
- Митрофанов Ф. П. Современные проблемы и некоторые решения докембрийской геологии кратонов // Литосфера. 2001. № 1. С. 5–14.
- Мыскова Т. А., Бережная Н. Г., Глебовицкий В. А., Милькевич Р. И. [и др.]. Находки древнейших цирконов с возрастом 3 600 млн лет в гнейсах кольской серии Центрально-Кольского блока Балтийского щита (U-Pb, SHRIMP-II) // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402, № 1. С. 82–86.
- Мыскова Т. А., Милькевич Р. И. Глиноземистые гнейсы кольской серии Балтийского щита (геохимия, первичная природа и возраст протолита) // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 10. С. 34–62. DOI: <https://doi.org/10.17076/geo359>.
- Ниткина Е. А., Каулина Т. В. Морфология, химический состав и U-Pb возраст циркона из пород гнейсового комплекса участков Перевал, Полигонный и Малонемецкая бухта (северо-запад Кольского региона) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 438–442. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.089>.
- Полканов А. А. Геолого-петрологический очерк Северо-Западной части Кольского полуострова. В 2 ч. Ч. 1. Л. ; М. : АН СССР, 1935. 564 с.
- Ранний докембрий Балтийского щита / отв. ред. В. А. Глебовицкий. СПб. : Наука, 2005. 711 с.
- Krogh T. E. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1973. Vol. 37, Iss. 3. P. 485–494. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90213-5).
- Levchenkov O. A., Levsky L. K., Nordgulen Ø., Dobrzhinetskaya L. F. [et al.]. U-Pb zircon ages from Sörvaranger, Norway and the western part of the Kola Peninsula, Russia // Geology of the Eastern Finnmark – Western Kola Peninsula Region Proceeding of the 1st Intern. Barents Symposium / eds.: D. Roberts, Ø. Nordgulen. Trondheim, 1995. P. 29–47. (Nor. Geol. Unders. Special. Publ. ; Vol. 7).
- Ludwig K. R. PBDAT, a computer program for processing Pb-U-Th. [s.l.] : U.S. Geological Survey, 1985.
- Ludwig K. R. User's Manual for Isoplot 3.00 : A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley CA, 2003. (Berkeley Geochronology Center special publication No 4).
- Mitrofanov F. P., Pozhilenko V. I., Smolkin V. F., Arzamastsev A. A. [et al.]. Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield) / ed.: F. P. Mitrofanov. Apatity, KSC RAS, 1995. 145 p.
- Nitkina E. A., Kozlov N. E., Kozlova N. E., Kaulina T. V. Geochemical features and geological processes timescale of the Achaean TTG complexes of the Ingozero massif and the Pechenga frame (NE Baltic Shield) // Minerals. 2019. Vol. 9, Iss.12. P. 767. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9120767>.
- Nordgulen O., Vetrin V., Dobrzhinetskaya L., Cobbing I. [et al.]. Aspects of Late Archaean magmatism in the Sörvaranger-Kola terrane, northern Baltic Shield // Geology of the Eastern Finnmark – Western Kola Peninsula Region. Proceeding of the 1st Intern. Barents Symposium / eds.: D. Roberts, Ø. Nordgulen. Trondheim, 1995. P. 49–63. (Nor. Geol. Unders. Special. Publ. ; Vol. 7).
- Steiger R. H., Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth and Planetary Science Letters. 1977. Vol. 36, Iss. 3. P. 359–362. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(77)90060-7).

- Vetrin V. R., Belousova E. A., Kremenetsky A. A. Lu-Hf isotopic systematics of zircon from lower crustal xenoliths in the Belomorian mobile belt // *Geology of Ore Deposits*. 2018. Vol. 60, Iss. 7. P. 568–577. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1075701518070085>.
- Vetrin V. R., Rodionov N. V., Serov P. A. Age, Sm-Nd systematics, and geochemistry of tonalite-trondhjemite-granodiorite gneisses of the northern part of the Baltic Shield // *Doklady Earth Sciences*. 2013. Vol. 452, Part 1. P. 930–935. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X13070271>.

References

- Avakyan, K. Kh. 1992. Geology and petrology of the Central Kola Granulite-Gneiss area of the Early Archean. Moscow. (In Russ.)
- Balagansky, V. V. 2002. The main stages of the tectonic development of the northeast of the Baltic Shield in the Paleoproterozoic. Abstract of Ph.D. dissertation. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Batieva, I. D., Bel'kov, I. V. 1968. Granitoid Formations of the Kola Peninsula. In *Essays on Petrology, Mineralogy, and Metallogeny of Granites of the Kola Peninsula*. Ed. I. V. Bel'kov. Leningrad, pp. 28–43. (In Russ.)
- Belyaev, O. A. 1976. Progressive zonal metamorphism of the Early Proterozoic of the northwest of the Kola Peninsula. In coll. articles *Metamorphism of Precambrian complexes (Kola Peninsula)*. Ed. V. G. Zagorodny. Apatity, pp. 31–49. (In Russ.)
- Belyaev, O. A., Zagorodny, V. G., Petrov, V. P., Voloshina, Z. M. 1977. Facies of regional metamorphism of the Kola Peninsula. Leningrad. (In Russ.)
- Bibikova, E. V., Vetrin, V. R., Kirnozova, T. I., Makarova, V. A. et al. 1993. Geochronology and correlation of rocks of the lower sections of the Kola superdeep well section. *Doklady Earth Sciences*, 332(3), pp. 360–363. (In Russ.)
- Vetrin, V. R. 2014. Duration of formation and sources of granitoids of the Litsik-Aragub complex, Kola Peninsula. *Geochemistry International*, 1, pp. 38–51. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0016752514010099>. (In Russ.)
- Vetrin, V. P. 2007. Proterozoic processes of magmatism and metasomatism in Archean rocks of the Pechenga paleorift basement. *Vestnik of MSTU*, 10(1), pp. 116–129. (In Russ.)
- Vetrin, V. R., Pushkaryov, Yu. D., Ryungenen, G. I., Shleifshstein, B. A. 1987. Geological position and age of granites in the southern part of the Pechenga region. In coll. articles *The structure and metamorphic evolution of the main structural zones of the Baltic Shield*. Apatity, pp. 83–92. (In Russ.)
- Vinogradov, A. N., Vinogradova, G. V. 1973. Metamorphism of rocks of the Kola series and the problem of assessing the prospects of mica content in the northwestern part of the Murmansk region. In coll. articles *Problems of study and development of natural resources of the North*. Apatity, pp. 19–30. (In Russ.)
- Goryainov, P. M. 1980. The Kola-Norwegian megablock – the oldest craton in Precambrian of the Kola Peninsula. In coll. articles *Regional tectonics of the early Precambrian of the USSR*. Leningrad, pp. 88–103. (In Russ.)
- Kaulina, T. V. 2010. Formation and recrystallization of zircons in polymetamorphic complexes. Apatity. (In Russ.)
- Kozlov, N. E., Martynov, E. V., Kozlova, N. E., Kaulina, T. V. et al. 2007. Petrochemical taxonomy of amphibolites of the Archean part of the Kola superdeep section. *Geochemistry International*, 2, pp. 150–158. (In Russ.)
- Kozlov, N. E., Sorokhtin, N. O., Glaznev, V. N., Kozlova, N. E. et al. 2006. Geology of the Archean of the Baltic Shield. Ed. V. P. Petrov. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Kola Superdeep. Scientific results and research experience. 1998. Moscow. (In Russ.)
- Mitrofanov, F. P. 2001. Actual questions and some answers of the Precambrian geology of cratons. *Litosfera*, 1, pp. 5–14. (In Russ.)
- Myškova, T. A., Berezhnaya, N. G., Glebovitsky, V. A., Milkevich, R. I. et al. 2005. Finds of the most ancient zircons with an age of 3,600 million years in the gneisses of the Kola series of the Central Kola block of the Baltic Shield (U-Pb, SHRIMP-II). *Doklady Earth Sciences*, 402(1), pp. 82–86. (In Russ.)
- Myškova, T. A., Milkevich, R. I. 2016. Alumina gneisses of the Kola series of the Baltic Shield (geochemistry, primary nature and protolith age). *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 10, pp. 34–62. DOI: <https://doi.org/10.17076/geo359>. (In Russ.)
- Nitkina, E. A., Kaulina, T. V. 2019. Morphology, chemical composition and U-Pb age of zircon from rocks of the gneiss complex of the sections Pass, Polygon and Malonemetskaya Bay (northwest of the Kola Region). *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN*, 16, pp. 438–442. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.089>. (In Russ.)
- Polkanov, A. A. 1935. Geological and petrological sketch of the North-Western part of the Kola Peninsula. Leningrad, Moscow. (In Russ.)
- Early Precambrian of the Baltic Shield. 2005. Ed. V. A. Glebovitsky. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Krogh, T. E. 1973. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(3), pp. 485–494. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90213-5).

- Levchenkov, O. A., Levsky, L. K., Nordgulen, Ø., Dobrzhinetskaya, L. F. et al. 1995. U-Pb zircon ages from Sørvaranger, Norway and the western part of the Kola Peninsula, Russia. In *Geology of the Eastern Finnmark – Western Kola Peninsula Region*. Proceeding of the 1st Intern. Barents Symposium. Eds.: D. Roberts, Ø. Nordgulen. Trondheim, pp. 29–47. (Nor. Geol. Unders. Special. Publ. Vol. 7).
- Ludwig, K. R. 1985. PBDAT, a computer program for Processing Pb-U-Th. [s.l.] : U.S. Geological Survey.
- Ludwig, K. R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00 : A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley CA. (Berkeley Geochronology Center special publication No 4).
- Mitrofanov, F. P., Pozhilenko, V. I., Smolkin, V. F., Arzamastsev, A. A. et al. 1995. Geology of the Kola Peninsula (Baltic Shield). Ed.: F. P. Mitrofanov. Apatity, KSC RAS.
- Nitkina, E. A., Kozlov, N. E., Kozlova, N. E., Kaulina, T. V. 2019. Geochemical features and geological processes timescale of the Achaean TTG complexes of the Ingozero massif and the Pechenga frame (NE Baltic Shield). *Minerals*, 9(12), pp. 767. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9120767>.
- Nordgulen, O., Vetrin, V., Dobrzhinetskaya, L., Cobbing, I. et al. 1995. Aspects of Late Archaean magmatism in the Sørvaranger-Kola terrane, northern Baltic Shield. In *Geology of the Eastern Finnmark – Western Kola Peninsula Region*. Proceeding of the 1st Intern. Barents Symposium. Eds.: D. Roberts, Ø. Nordgulen. Trondheim, pp. 49–63. (Nor. Geol. Unders. Special. Publ. Vol. 7).
- Steiger, R. H., Jäger, E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36(3), pp. 359–362. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821x(77)90060-7).
- Vetrin, V. R., Belousova, E. A., Kremenetsky, A. A. 2018. Lu-Hf isotopic systematics of zircon from lower crustal xenoliths in the Belomorian mobile belt. *Geology of Ore Deposits*, 60(7), pp. 568–577. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1075701518070085>.
- Vetrin, V. R., Rodionov, N. V., Serov, P. A. 2013. Age, Sm-Nd systematics, and geochemistry of tonalite-trondhjemite-granodiorite gneisses of the northern part of the Baltic Shield. *Doklady Earth Sciences*, 452, Part 1. P. 930–935. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X13070271>.

Сведения об авторах

Ниткина Елена Анатольевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник; e-mail: nitkina@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7242-1950>

Elena A. Nitkina – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. of Sci. (Geology & Miner.), Researcher; e-mail: nitkina@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7242-1950>

Каулина Татьяна Владимировна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Tat'yana V. Kaulina – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Dr of Sci. (Geology & Miner.), Leading researcher; e-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Козлов Николай Евгеньевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор; e-mail: kozlov@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3766-7127>

Nikolay E. Kozlov – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Dr of Sci. (Geology & Miner.), Professor; e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3766-7127>