Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»

ТРУДЫ

КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 10, 2026

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Петрозаводск
2026

Научный журнал
Труды Карельского научного центра Российской академии наук
№ 10, 2026
ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

ISSN 1997-3217 (печатная версия)
ISSN 2312-4504 (онлайн-версия)

Главный редактор
А. Ф. ТИТОВ, член-корр. РАН, д. б. н., проф.

Редакционный совет

О. Н. БАХМЕТ (зам. главного редактора), член-корр. РАН, д. б. н.; Н. А. БЕЛКИНА, д. г. н.; И. Н. БОЛОТОВ, член-корр. РАН, д. б. н.; А. В. ВОРОНИН, д. т. н., проф.; Х. ГАО, доктор математики, проф. (КНР); Н. В. ИЛЬМАСТ, д. б. н.; Ю. В. ЗАИКА, д. ф.-м. н.; С. В. КРИВОВИЧЕВ, академик РАН, д. г.-м. н.; А. М. КРЫШЕНЬ, д. б. н.; О. Л. КУЗНЕЦОВ, д. б. н.; Ю. Н. ЛУКИНА, д. б. н.; В. В. МАЗАЛОВ, д. ф.-м. н., проф.; Н. Н. НЕМОВА, академик РАН, д. б. н., проф.; А. Н. РЕТТИЕВА, д. ф.-м. н.; С. А. СВЕТОВ, д. г.-м. н.; А. И. СЛАБУНОВ, д. г.-м. н.; Н. Ю. СУХОВИЛО, к. г. н. (Республика Беларусь); С. ЛИ, доктор геологии (КНР); Н. Н. ФИЛАТОВ, член-корр. РАН, д. г. н., проф.; Н. С. ЧЕРНЕЦОВ, член-корр. РАН, д. б. н.; В. В. ЩИПЦОВ, д. г.-м. н., проф.

Редакционная коллегия серии «Геология докембрия»

Ю. Л. ВОЙТЕХОВСКИЙ, д. г.-м. н., проф.; В. В. КОВАЛЕВСКИЙ, д. г.-м. н.; А. Б. КУЗНЕЦОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; О. А. МАКСИМОВ, к. г.-м. н.; П. В. МЕДВЕДЕВ, к. г.-м. н.; Ю. А. МОРОЗОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н., проф.; А. В. ПЕРВУНИНА, к. г.-м. н.; А. М. ПЫСТИН, д. г.-м. н., проф.; К. А. САВКО, д. г.-м. н., проф.; А. В. САМСОНОВ, член-корр. РАН, д. г.-м. н.; С. А. СВЕТОВ (зам. отв. редактора), д. г.-м. н.; Е. Н. СВЕТОВА (ответственный секретарь), к. г.-м. н.; А. И. СЛАБУНОВ, д. г.-м. н.; А. В. СТЕПАНОВА, к. г.-м. н.; Н. Н. ФИЛАТОВ, чл.-корр. РАН, д. г. н., проф.; В. С. ХЕГДЕ, проф. (Республика Индия); В. В. ЩИПЦОВ (отв. редактор), д. г.-м. н., проф.

Издается с января 2009 г.

Адрес редакции: 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11
Тел. (8142)762018; факс (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru
Электронная полнотекстовая версия: http://transactions.krc.karelia.ru; http://journals.krc.karelia.ru

© ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2026
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2026

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

TRANSACTIONS

of the KARELIAN RESEARCH CENTRE of the RUSSIAN ACADEMY of SCIENCES

No. 10, 2026

PRECAMBRIAN GEOLOGY

Petrozavodsk
2026

Scientific Journal
Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
No. 10, 2026
PRECAMBRIAN GEOLOGY

ISSN 1997-3217 (print)
ISSN 2312-4504 (online)

Editor-in-Chief
A. F. TITOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.), Prof.

Editorial Committee

O. N. BAKHMET (Deputy Editor-in-Chief), RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); N. A. BELKINA, DSc (Geog.); I. N. BOLOTOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); N. S. CHERNETSOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Biol.); N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; H. GAO, PhD (Phys.-Math.), Prof. (China); N. V. ILMAST, DSc (Biol.); Yu. V. ZAIKA, DSc (Phys.-Math.); S. V. KRIVOVICHEV, RAS Academician, DSc (Geol.-Miner.); A. M. KRYSHEN, DSc (Biol.); O. L. KUZNETSOV, DSc (Biol.); Yu. N. LUKINA, DSc (Biol.); V. V. MAZALOV, DSc (Phys.-Math.), Prof.; N. N. NEMOVA, RAS Academician, DSc (Biol.), Prof.; A. N. RETTIEVA, DSc (Phys.-Math.); V. V. SHCHIPTSOV, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; S. A. SVETOV, DSc (Geol.-Miner.); A. I. SLABUNOV, DSc (Geol.-Miner.); N. Yu. SUKHOVILO, PhD (Geog.) (Republic of Belarus); X. LI, PhD (Geol.-Miner.) (China); A. V. VORONIN, DSc (Tech.), Prof.

Editorial Board of the «Precambrian Geology» Series

N. N. FILATOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geog.), Prof.; V. S. HEGDE, Prof. (Geol.-Miner.) (India); V. V. KOVALEVSKY, DSc (Geol.-Miner.); A. B. KUZNETSOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.); O. A. MAKSIMOV, PhD (Geol.-Miner.); P. V. MEDVEDEV, PhD (Geol.-Miner.); Yu. A. MOROZOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; A. V. PERVUNINA, PhD (Geol.-Miner.); A. M. PYSTIN, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; A. V. SAMSONOV, RAS Corr. Fellow, DSc (Geol.-Miner.); K. A. SAVKO, DSc (Geol.-Miner.), Prof.; V. V. SHCHIPTSOV (Editor-in-Charge), DSc (Geol.-Miner.), Prof.; A. I. SLABUNOV, DSc (Geol.-Miner.); A. V. STEPANOVA, PhD (Geol.-Miner.); S. A. SVETOV (Deputy Editor-in-Charge), DSc (Geol.-Miner.); E. N. SVETOVA (Executive Secretary), PhD (Geol.-Miner.); Yu. L. VOYTEKHOVSKIY, DSc (Geol.-Miner.), Prof.

Published since January 2009

Monthly

Editorial Office address: 11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
Tel. (8142)762018; fax (8142)769600
E-mail: trudy@krc.karelia.ru
Full-text electronic version: http://transactions.krc.karelia.ru; http://journals.krc.karelia.ru

© Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2026
© Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, 2026

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 5–23
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 5–23
DOI: 10.17076/geo2229

УДК 553.493.34+553.493(470.22)

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛИТИЯ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ

В. И. Иващенко

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Проведен краткий обзор и анализ минерально-сырьевой базы лития и редкоземельных металлов (РЗМ) мира и России. Россия занимает лидирующие позиции в мире по запасам и ресурсам РЗМ, но не обладает современным технологическим производством для получения и разделения этих металлов в чистом виде. В меньшей степени она обеспечена запасами лития, но имеет реальные перспективы для существенного наращивания его минерально-сырьевой базы. Показаны основные промышленные типы месторождений этих высокотехнологичных металлов и их исключительно важное значение в мировой и российской экономике. Охарактеризованы области использования лития и РЗМ, их незаменимость во многих отраслях промышленности, включая автомобилестроение, компьютерные, космические и медицинские технологии, оборонно-промышленный комплекс и бытовую технику. Приведены результаты металлогенических исследований на эти металлы территории Республики Карелия, где известны несколько перспективных проявлений лития, связанных с редкометалльными LCT-пегматитами со сподуменом и лепидолитом (Иокирантское, Хаутаваарское и Северо-Карельское поля пегматитов) и многочисленные пункты минерализации РЗМ, не относящиеся к основным мировым промышленным типам оруденения этих металлов. Сделаны выводы о промышленных перспективах Карелии на литий (LCT-пегматиты, Li-F граниты, сопутствующий тайниолит на U-Au-Pt-V месторождениях) и крайне низкой вероятности нахождения на ее территории перспективных проявлений РЗМ.

Ключевые слова: литий; редкоземельные металлы; LCT пегматиты; лепидолит; сподумен; тайниолит, Li-F граниты, Республика Карелия

Для цитирования: Иващенко В. И. Ресурсный потенциал лития и редкоземельных металлов Республики Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 5–23. doi: 10.17076/geo2229

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).

V. I. Ivashchenko. LITHIUM AND RARE-EARTH METAL RESOURCE POTENTIAL IN THE REPUBLIC OF KARELIA

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

This article provides a brief overview and analysis of the global and Russian lithium and rare earth metal (REE) mineral resource base. Russia holds global leadership in REE reserves and resources, but lacks modern technological production facilities for extracting and separating these metals in pure form. While known lithium reserves are lower, the country can realistically enlarge its mineral resource base. The article presents the main industrial types of deposits of these high-tech metals and demonstrates their critical importance to the global and Russian economies. It also describes the uses of lithium and REE and their indispensability in many industries, including automotive, computer, space, and medical technologies, the defense industry, and household appliances. The article reports the results of metallogenic studies of these metals in the Republic of Karelia, where several promising lithium occurrences associated with rare-metal LCT pegmatites with spodumene and lepidolite (the Iokiranta, Hautavaara, and North Karelian pegmatite fields) are known, as well as numerous REE mineralization sites beyond the main global industrial types of these metals. Conclusions are drawn regarding Karelia's industrial potential for lithium (LCT pegmatites, Li-F granites, and taeniolite associated with U-Au-Pt-V deposits) and the extremely low probability of finding promising REE occurrences within its territory.

Keywords: lithium; rare earth metal; LCT pegmatites; lepidolite; spodumene; taeniolite; Li-F granites; Republic of Karelia

For citation: Ivashchenko V. I. Lithium and rare-earth metal resource potential in the Republic of Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 5–23. doi: 10.17076/geo2229

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (Institute of Geology KarRC RAS).

Введение

Термин *«редкие металлы»* не имеет канонического определения, а основывается большей частью на исторических и экономических предпосылках – с конца XVIII века считалось, что эти металлы не образуют крупных месторождений и высоких содержаний в руде. К настоящему времени для многих из них это оказалось несоответствующим действительности. В России в число редких металлов включается 40–44 химических элемента [Дробот, Буслаева, 2001; Твердохлебова, Усова, 2011 и др.], которые принято делить на пять групп: *легкие* (Li, Be, Rb, Cs); *рассеянные* (Ga, In, Sc, Ge, Cd, Se, Bi, Te); *редкоземельные* (Y, La и все лантаноиды); *тугоплавкие* (Zr, Hf, V, Nb, Ta, Re); *радиоактивные* (Fr, Ra, Ac, Po, Tc, Th, Pa, U и все трансурановые элементы). В США большинство из вышеперечисленных элементов рассматриваются как группа редкоземельных металлов или редкоземов.

Прогрессивное развитие современной промышленности невозможно без редких металлов. Материалы, получаемые на базе редких металлов, в силу своих уникальных свойств и влияния на прогресс науки и техники получили за рубежом название «advanced materials» (улучшенные или продвинутые материалы). По уровню потребления большинства редких металлов, особенно редкоземельных, Россия отстает от США более чем на порядок [Быховский, 2014]. В последние годы среди редких металлов в силу разных причин, в том числе и геополитических, особое промышленное и научное значение приобрели Li и редкоземельные металлы (РЗМ).

Литий. Содержание Li в континентальной коре составляет 21 г/т [McLennan, 2001]. В России Li относится к стратегическим и дефицитным (критическим) металлам. К настоящему времени известно 114–118 минералов Li [Grew et al., 2019], из которых промышленное значение имеют только сподумен, петалит, лепидолит, амблигонит, гекторит и ядарит. К основным промышленным типам месторождений лития относятся гидроминеральный, представленный рапой соляных озер, и редкометалльные LCT (литий, цезий, тантал) пегматиты со сподуменом. Кроме этого, промышленно перспективными источниками лития могут быть Li-F граниты, гекторитовые глины (кальдерный тип), метаморфизованные вулканогенно-осадочные породы и нефтепромысловые и геотермальные рассолы (рис. 1).

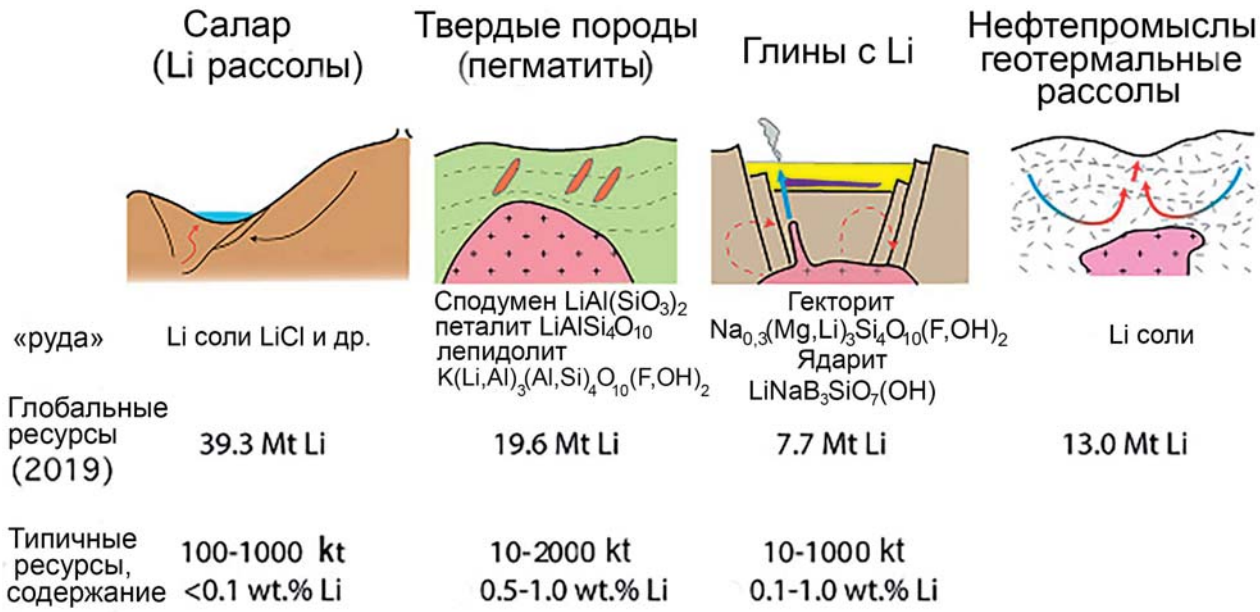


Рис. 1. Характеристика основных промышленных типов месторождений лития и оценка мировых ресурсов по типам на 2019 год [Technical..., 2018; Greenbushes..., 2022; Gardiner et al., 2024; Putzolu et al., 2025]

Fig. 1. Outline of the main industrial Li deposit types and estimated global resources by type in 2019 [Technical..., 2018; Greenbushes..., 2022; Gardiner et al., 2024; Putzolu et al., 2025]

На пегматиты приходится около 75 % мировых запасов лития и более 60 % его добычи, а остальное в основном на салары – рапу соляных озер [Государственный..., 2024].

Содержание Li_2O 0,7–1,0 % в сподуменовых рудах обычно также с экономически значимыми количествами Be, Ta, Cs, W, Sn считается промышленным. Для гидроминеральных месторождений промышленное содержание Li_2O может сильно варьировать в зависимости от множества факторов и рассчитывается для каждого конкретного месторождения.

Мировые ресурсы Li_2O оцениваются в 228,5 млн т, основная часть которых находится на территории Боливии, Аргентины, США и Чили (табл. 1). Разведанные запасы лития сосредоточены в 18 странах и составляют около 17 млн т: в Австралии – 28 %, Аргентине – 16 %, Китае – 11 %, Чили – 6 %, России – 3 % [Государственный..., 2024].

Таблица 1. Минеральные ресурсы лития и его производство в мире [Государственный..., 2024]

Table 1. Lithium mineral resources and its production in the world [State..., 2024]

Страна Country	Минеральные ресурсы*, категория Mineral resources*, category	Минеральные ресурсы, тыс. т Li_2O (тыс. т Li) Mineral resources kt Li_2O (kt Li)	Доля в мировых ресурсах, % (место в мире) Share of global resources, % (rank in the world)	Производство в 2023 г., тыс. т Li_2O (LCE**) Production in 2023, kt Li2O (LCE**)	Доля в мировом производстве в 2023 г., % (место в мире) Share of global production in 2023, % (rank in the world)
Австралия Australia	Измеренные, Выявленные, Предполагаемые Measured, Identified, Estimated	19282 (8956[1])	8,4 (5)	184[1] (455)	44 (1)
Чили Chile	Минеральные ресурсы Mineral resources	23672 (11000[5])	10,4 (4)	103,3[3] (255,5)	24,7 (2)
Китай China	Минеральные ресурсы Mineral resources	10779 (5009[4])	4,7 (6)	71[5] (175,6)	17 (3)
Аргентина Argentina	Минеральные ресурсы Mineral resources	47344 (22000[5])	20,7 (2)	20,7[5] 51,1	5 (4)
Канада Canada	Измеренные, Выявленные Measured, Identified	6456 (3000[5])	2,8 (7)	10,7[2] (26,4)	2,6 (5)

Окончание табл. 1
Table 1 (continued)

Страна Country	Минеральные ресурсы*, категория Mineral resources*, category	Минеральные ресурсы, тыс. т Li_2O (тыс. т Li) Mineral resources kt Li_2O (kt Li)	Доля в мировых ресурсах, % (место в мире) Share of global resources, % (rank in the world)	Производство в 2023 г., тыс. т Li_2O (LCE**) Production in 2023, kt Li2O (LCE**)	Доля в мировом производстве в 2023 г., % (место в мире) Share of global production in 2023, % (rank in the world)
Бразилия Brazil	Минеральные ресурсы Mineral resources	1722 (800[5])	0,8 (9)	10,5[5] (26,1)	2,5 (6)
Зимбабве Zimbabwe	Минеральные ресурсы Mineral resources	1784 (829[2])	0,8 (9)	7,3[5] (18,1)	1,8 (7)
США USA	Измеренные, Выявленные Measured, Identified	30128 (14000[5])	13,2 (3)	5,6[8] (13,8)	1,3 (8)
Боливия Bolivia	Минеральные ресурсы Mineral resources	49496 (23000[5])	21,6 (1)	1,3[7] (3,2)	0,3 (9)
Португалия Portugal	Минеральные ресурсы Mineral resources	596 (277[2])	0,3 (10)	0,9[5] (2,1)	0,2 (10)
Россия Russia	Балансовые запасы кат. $A+B+C_1+C_2$ Balance reserves cat. $A+B+C_1+C_2$	3492,1[6] (1623,8)	1,5 (8)	–	–
Прочие Other	Минеральные ресурсы Mineral resources	33702 (15661[2])	14,8	2,6[2] (6,4)	0,6
Мир World	Минеральные ресурсы Mineral resources	228453 (106156)	100	417,9 (1033,3)	100

Примечание. * – сопоставимы с термином «балансовые запасы» по классификации РФ; ** – LCE – Lithium Carbonate Equivalent – эквивалент карбоната лития – часто используемая единица измерения содержание лития в минеральном сырье и продуктах его переработки. В 1 т LCE заключено 188 кг Li или 404 кг Li_2O; Источники: 1 – Australian Government, 2 – экспертная оценка ФГБУ «ВИМС» по данным геологоразведочных и добывающих компаний, 3 – Servicio Nacional de Geologia y Mineria (Чили), 4 – National Bureau of Statistics of China, 5 – U. S. Geological Survey, 6 – пересчет по данным ГБЗ РФ, 7 – Yacimientos de Litio Bolivianos (Боливия), 8 – Albemarle Corp.

Note. * – comparable with the term "balance reserves" according to the classification of the Russian Federation; ** – LCE – Lithium Carbonate Equivalent – a frequently used unit of measurement of lithium content in mineral raw materials and their processed products. 1 ton of LCE contains 188 kg of Li or 404 kg of Li_2O; Sources: 1 – Australian Government, 2 – expert assessment of FSBI N. M. Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Raw Materials (VIMS) based on data from geological exploration and mining companies, 3 – Servicio Nacional de Geologia y Mineria (Chile), 4 – National Bureau of Statistics of China, 5 – U. S. Geological Survey, 6 – recalculation based on data from the State Reserves of the Russian Federation, 7 – Yacimientos de Litio Bolivianos (Bolivia), 8 – Albemarle Corp.

Около 75% балансовых запасов Li в России приходится на редкометалльные (LCT) пегматиты со сподуменом, ~20% связаны со слюдами в редкометалльных гранитных месторождениях. Из них запасы Li_2O категорий ($A + B + C_1 + C_2$) составляют 3,5 млн т и большая их часть (80%), представленная комплексными (Be, Ta, Nb, Cs) рудами, сосредоточена в Сибирском, Северо-Западном и Дальневосточном федеральных округах. 68,8% балансовых запасов лития России заключены в семи месторождениях редкометалльных пегматитов со сподуменом: Колмозерское (24,18%; Мурманская обл.), Гольцовое (13,42%; Иркутская обл.), Урикское (10,53%; Республика Бурятия), Полмостундровское (10,07%; Мурманская обл.), Завитинское (5,9%; Забайкальский край), Белореченское (4,7%; Иркутская обл.), Тастыгинское (0% балансовых, 596,3 тыс. т забалансовые; Республика Тыва) [Государственный…, 2024; Литий…, 2025].

Мировое производство лития и цена на литиевый концентрат в период с 2015 по 2022 гг. резко возросли (рис. 2) на фоне растущего экономического значения «твердых» источников лития – в основном пегматитовых (Гринбушес в Австралии и др.). После 2022 года резко возросло число проектов по добыче лития из рассолов, а также исследований по разработке Na-ионных технологий для производства аккумуляторов [Домов, 2025].

По данным геологической службы США мировое производство лития в связи с расширением областей его использования и изменением структуры потребления (рис. 3) в последние десятилетия характеризуется высокими темпами роста – до 12–18% в год [Цивадзе и др., 2023]. Литий и его соединения находят также все более широкое применение в военной и космической промышленности, а также в термоядерной энергетике.

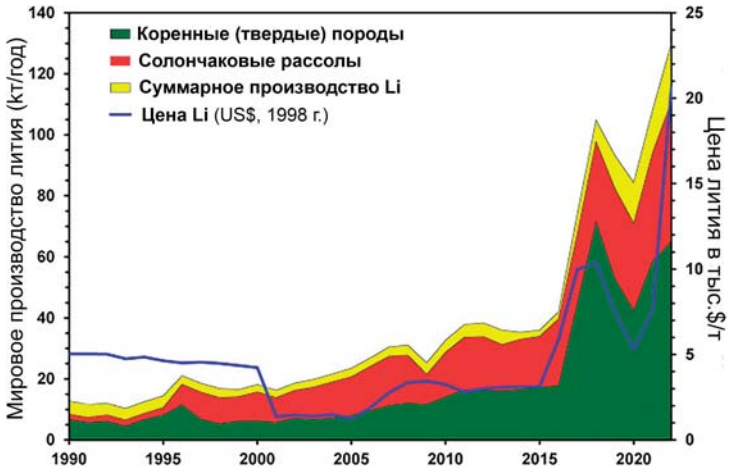


Рис. 2. Производство лития в период с 1990 по 2022 год по типам месторождений и цена на литиевый концентрат [Mudd, 2021; Gardiner et al., 2024]

Fig. 2. Lithium production from 1990 to 2022 by deposit type, and Li concentrate price [Mudd, 2021; Gardiner et al., 2024]

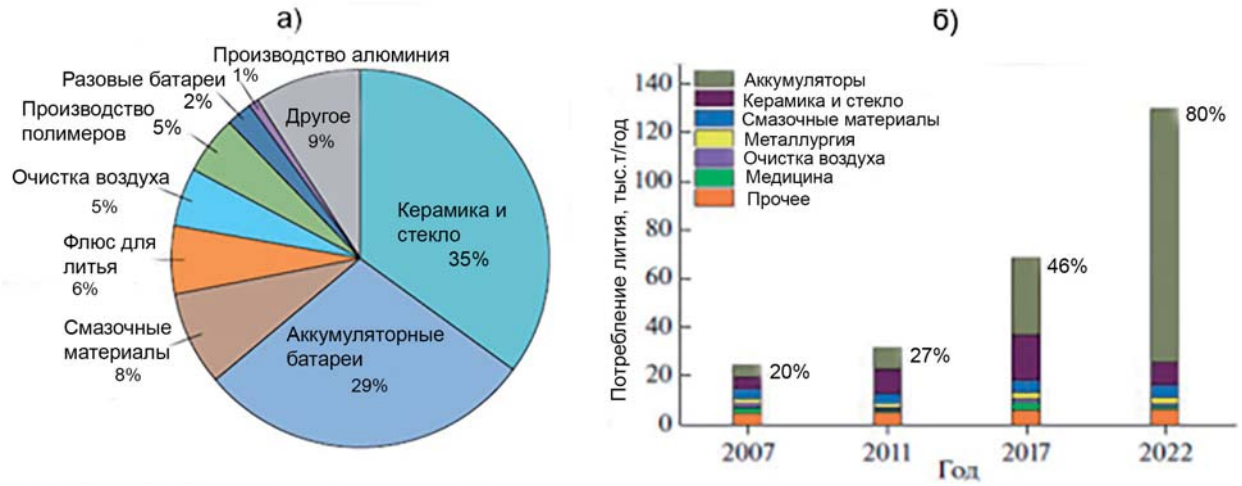


Рис. 3. Изменение структуры мирового потребления лития с 2013–2022 гг.;
а – по [Bradley et al., 2017]; б – по [Цивадзе и др., 2023]

Fig. 3. Changes in the structure of global lithium consumption from 2013 to 2022:
а – according to [Bradley et al., 2017]; б – according to [Tsivadze et al., 2023]

Литий-ионные аккумуляторы в настоящее время являются оптимальным решением по хранению энергии, сочетая высокую емкость, небольшой вес и высокую скорость заряда. Объем мирового рынка литий-ионных аккумуляторов, по состоянию на 2022 год оценивается в $44 млрд. Прогноз на 2028 год – $193 млрд при среднегодовом темпе роста рынка в 23,3 % [Литий-ионные..., 2022]. В России производство литий-ионных аккумуляторов по объемам потребления лития занимает третье место, уступая производству стекла и керамики (34 %), а также смазочных материалов (24 %).

По оценкам International Energy Agency [Государственный..., 2024; с. 443] в 2023 году мировое потребление лития составило 165 тыс. т Li (879 тыс. т LCE), увеличившись относительно 2022 года на 30 %. По прогнозам агентства, к 2030 году оно увеличится более чем в три раза – до 531 тыс. т Li (2827 тыс. т LCE), а к 2040 году – до 1326 тыс. т Li (7060 тыс. т LCE, + 703 % к 2023 году). Резкое колебание цен на литий в последние годы (2022–2024 гг.) от 84000 до 14000 $USA/т) [Обзор..., 2024] является, вероятно, временным и обусловленным, главным образом, геополитическими (военные конфликты, изменение стратегического контроля над поставками) и экономическими (перенасыщение рынка за счет ввода в эксплуатацию многочисленных новых месторождений, снижение роста продаж электромобилей) факторами.

РЗМ. К редкоземельным металлам относятся 15 лантаноидов и иттрий, а в некоторых странах и скандий. Они разделяются на две группы: легких РЗМ (LREE), включающую элементы от лантана до самария,

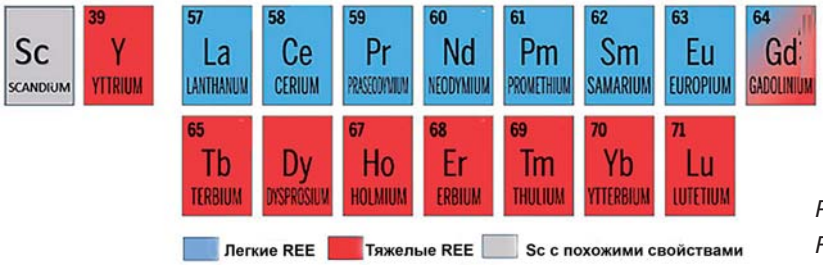


Рис. 4. Разделение РЗМ на две группы
Fig. 4. Division of REE into two groups

и тяжелых РЗМ (HREE) – от европия до лютеция и иттрий (рис. 4). Иногда вводится промежуточная группа средних РЗМ – от самария до гольмия. Группу LREE принято называть цериевой, группу HREE – иттриевой.

Содержание РЗМ в земной коре сильно варьирует: от 0,003 % для лантана до 0,00008 % для туллия и лютеция [McLennan, 2001]. Тысячи минералов в природе содержат РЗМ. При этом в обогащенных ими минералах отдельные редкоземельные элементы всегда сопутствуют друг другу, ввиду схожести химических свойств их раздельное получение представляется весьма сложным и затруднительным. Основными источниками промышленного получения РЗМ являются бастнезитовые карбонатиты, прибрежно-морские и погребенные россыпи (монацит), глинистые минералы кор выветривания (ионно-абсорбционные руды).

Мировые ресурсы РЗМ оцениваются в 378,4 млн т (табл. 2). Самые значительные балансовые запасы редкоземельных металлов в мире, по оценке Геологической службы США, сосредоточены, млн т: в Китае – 44;

Таблица 2. Минеральные ресурсы РЗМ и их товарная добыча в мире [Государственный..., 2024]
Table 2. Mineral resources of rare earth metals and their commercial production in the world [State..., 2024]

Страна Country	Минеральные ресурсы, категория Mineral resources*, category	Минеральные ресурсы, млн т ΣTR_2O_3 Mineral resources Mt ΣTR_2O_3	Доля в мировых минеральных ресурсах, % (место в мире) Share of global resources, % (rank in the world)	Товарная добыча в 2023 г., тыс. т ΣTR_2O_3 Commercial production in 2023, kt ΣTR_2O_3	Доля в мировой добыче, % (место в мире) Share of global production,% (rank in the world)
Китай China	Минеральные ресурсы Mineral resources	164[1]	43,3 (1)	255[2*]	70,8 (1)
США USA	Минеральные ресурсы Mineral resources	14[1]	3,7 (7)	43[2]	11,9 (2)
Мьянма Myanmar	Минеральные ресурсы Mineral resources	н/д n/a	н/д n/a	38[2]	10,6 (3)
Австралия Australia	Измеренные, Выявленные, Предполагаемые Measured, Identified, Estimated	28,8[3]	7,6 (3)	16,8[2]	4,7 (4)
Индия India	Резервы** Reserves**	6,9[2]	1,8 (9)	2,9[2]	0,8 (5)
Россия Russia	Балансовые запасы кат. $A+B+C_1+C_2$ Balance reserves cat. $A+B+C_1+C_2$	28,5[4]	7,5 (4)	2,6[4]	0,7 (6)
Вьетнам Vietnam	Минеральные ресурсы Mineral resources	71,2[5]	18,8 (2)	0,6[2]	0,2 (8)
Прочие Other	Минеральные ресурсы Mineral resources	65[6]	17,2	1,1[2]	0,3
Мир World	Минеральные ресурсы Mineral resources	378,4	100255	360	100

Примечание. н/д – данные не доступны; * – производственная квота; ** – данные о минеральных ресурсах не доступны. Источники: 1 – Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies, 2 – U.S. Geological Survey, 3 – Australian Government, 4 – ГБЗ РФ, 5 – Ministry of Natural Resources and Environment (Vietnam), 6 – экспертная оценка ФГБУ «ВИМС».

Note. n/a – data is not available; * – production quota; ** – mineral resource data is not available. Sources: 1 – Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies, 2 – U.S. Geological Survey, 3 – Australian Government, 4 – State Reserves Committee of the Russian Federation, 5 – Ministry of Natural Resources and Environment (Vietnam), 6 – expert assessment of FSBI N. M. Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Raw Materials (VIMS).

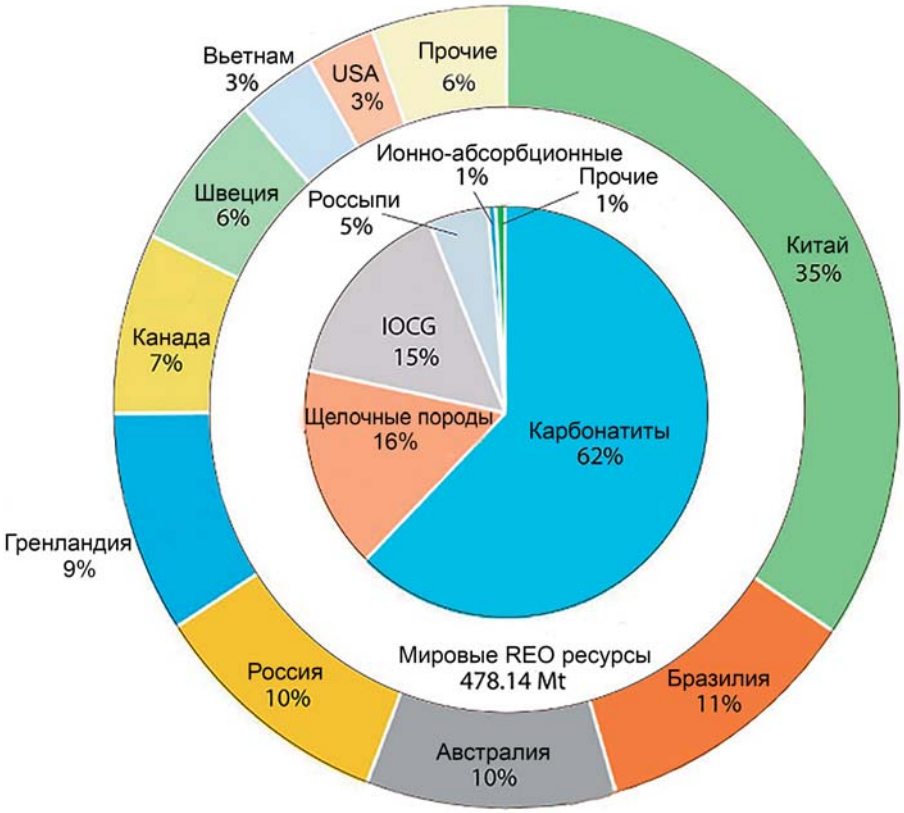


Рис. 5. Распределение мировых ресурсов РЗМ по типам месторождений и странам, по данным: [Batapola et al., 2020]

Fig. 5. Distribution of world REE resources by deposit types and countries, according to [Batapola et al., 2020]

Бразилии – 22; Индии – 6,9; Австралии – 5,7; Вьетнаме – 3,5. Наибольшая часть мировых извлекаемых запасов РЗМ сосредоточена в бастнезитовых месторождениях КНР. Крупные запасы связаны также с месторождениями монацита в Австралии, Бразилии, КНР, Индии, Малайзии, ЮАР, Шри Ланке, Тайланде и США. Остальные запасы связаны с месторождениями ксенотима, ионно-абсорбционных руд, лопарита, фосфоритов, апатита, эвдиалита, чералита и с жидкими отходами при добыче урана (рис. 5)

По данным федерального агентства по недропользованию «Роснедра» [Редкоземельные..., 2025а, б] на 1 января 2023 года балансовые запасы РЗМ в России составляют 28,7 млн т (18 месторождений), забалансовые – 11,6 млн т (2 месторождения). По этому показателю Россия занимает второе место в мире после Китая. Большинство российских месторождений, как и мировых – комплексные, в которых РЗМ являются преимущественно попутными (рис. 6). Исключение – лопаритовые руды Ловозерского месторождения на Кольском п-ове.

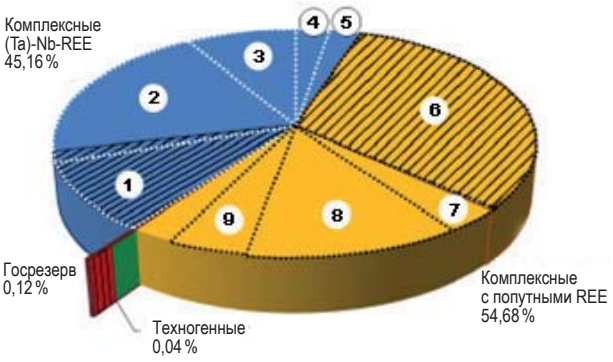


Рис. 6. Структура запасов ($\sum$ кат. A+B+C_1+C_2) сырьевых источников REE России [Быховский и др., 2020]:

Заштрихованные сегменты – запасы в распределенном фонде недр. 1 – Томтор, уч. Буранный; 2 – Ловозеро; 3 – Чуктукон; 4 – Томтор, уч. Северный и Южный; 5 – Катугинское; 6 – апатит Хибин; 7 – Ярега; 8 – Селигдар; 9 – Белозиминское

Fig. 6. Structure of reserves ($\sum$ cat. A+B+C_1+C_2) of raw material sources of REE in Russia [Bykhovsky et al., 2020]:

The shaded segments are reserves in the distributed subsoil fund. 1 – Tomtor, Burannyi site; 2 – Lovozero; 3 – Chuktukon; 4 – Tomtor, North and South sites; 5 – Katuginskoe; 6 – Khibiny apatite; 7 – Yarega; 8 – Seligdar; 9 – Beloziminskoe

За последние 20 лет мировая добыча РЗМ выросла в четыре раза и составляет 360 тыс. т в 2023 году [Государственный..., 2024], а соответствующие масштабы их запасов более чем в 100 раз превышают текущую годовую добычу.

В России товарная добыча РЗМ ведется только на одном месторождении – Ловозерском в Мурманской обл. и составила в 2023 году 2,6 тыс. т (см. табл. 2). До 1990 года СССР занимал второе место в мире по производству редких земель – 8,5 тыс. т/год при потреблении 6 тыс. т, остаток направлялся на экспорт [Быховский и др., 2020].

РЗМ используются в радиоэлектронике, приборостроении, атомной технике, машиностроении, химической промышленности, металлургии, в производстве аккумуляторных батарей, магнитов электродвигателей, оптического стекла, керамики и др. (табл. 3).

Таблица 3. Основные области применения РЗМ, по: [Bru et al., 2015; Sebastiaan et al., 2017]
Table 3. Main areas of application of REE according to [Bru et al., 2015; Sebastiaan et al., 2017]

Элемент Element	Использование Use
Y	Люминофоры, керамика, металлургические сплавы, лазеры, катализ Luminophors, ceramics, metallurgical alloys, lasers, catalysis
La	Катализ крекинга тяжелой нефти, аккумуляторы, металлургические сплавы, оптика, люминофоры, мишметалл Heavy oil cracking catalysis, batteries, metallurgical alloys, optics, luminophors, mischmetal
Ce	Полировка стекла, металлургические сплавы, автомобильный катализ, оптика, люминофоры, мишметалл Glass polishing, metallurgical alloys, automotive catalysis, optics, luminophors, mischmetal
Pr	Постоянные магниты, люминофоры, керамика, мишметалл, металлургические сплавы, катализаторы окисления Permanent magnets, phosphors, ceramics, mischmetal, metallurgical alloys, oxidation catalysts
Nd	Постоянные магниты, керамика, металлургические сплавы, мишметалл, люминофоры, лазеры Permanent magnets, ceramics, metallurgical alloys, mischmetal, luminophors, lasers
Pm	Радиоизотопные источники питания, приборостроение (толщинометры), радиолюминесцентные материалы Radioisotope power sources, instrumentation (thickness gauges), photoluminescent materials
Sm	Постоянные магниты, оптика, медицина, ядерные технологии Permanent magnets, optics, medicine, nuclear technology
Eu	Люминофоры, оптика, ядерные технологии Luminophors optics, nuclear technologies
Gd	Постоянные магниты, металлургические сплавы, люминофоры, медицинская визуализация, лазеры Permanent magnets, metallurgical alloys, luminophors, medical imaging, lasers
Tb	Люминофоры, постоянные магниты, металлургические сплавы, легирование электронных компонентов Luminophors, permanent magnets, metallurgical alloys, doping of electronic components
Dy	Постоянные магниты, металлургические сплавы, оптика, ядерные технологии Permanent magnets, metallurgical alloys, optics, nuclear technologies
Ho	Окрашивание стекла, легирование лазерных кристаллов Glass coloring, laser crystal doping
Er	Окрашивание стекла, люминофоры, оптические телекоммуникации, медицинские лазеры Glass coloring, luminophors, optical telecommunications, medical lasers
Tm	Легирование лазерных волокон и некоторых люминофоров Doping of laser fibers and some luminophors
Yb	Составная часть лазерных кристаллов, сейсмические измерения, металлургия Component of laser crystals, seismic measurements, metallurgy
Lu	Медицинская томография, керамика, металлургические сплавы, лазеры, катализ Medical tomography, ceramics, metallurgical alloys, lasers, catalysis

По востребованности промышленностью РЗМ подразделяются на три группы: дефицитные и потенциально дефицитные – Nd, Tb, Dy, Y, Eu, Er; недефицитные – La, Pr, Sm, Gd; избыточные – Ce, Ho, Tm, Yb, Lu [Середин, 2010]. К настоящему времени такое подразделение РЗМ по промышленной значимости в целом сохраняется, сопровождаясь неуклонным возрастанием потребления «магнитных» и тяжелых РЗМ.

По объему потребления в промышленности лидирует неодим. Широким спросом также пользуются тяжелые РЗМ – тербий, диспрозий и легкие – празеодим, европий. Диспрозий применяется в производстве оборонных систем, в том числе систем наведения и управления ракетами, радаров и беспилотных систем. В сфере ОПК иттрий необходим для лазерных технологий и бронекерамики. В мире наиболее востребованы «магнитные» металлы: Nd, Pr, Dy, Eu, Tb. По оценкам агентства *Adamas Intelligence* [Государственный..., 2024], в 2023 году мировое потребление постоянных магнитов, для производства которых применяются в основном Nd и Pr, выросло на 13,3 % и будет расти в пределах 8–10 % в год.

По оценкам консалтинговой компании Mordor Intelligence [Государственный..., 2024; с. 494], рынок РЗМ в 2023 году составил 175 тыс. т. Прогнозируется, что в 2024 году он увеличится до 182,4 тыс. т, а в 2029 году достигнет 214,9 тыс. т (среднегодовые темпы роста – 4,19 %). Однако реальные данные производства РЗМ значительно отличаются от прогнозируемых – в 2024 году 390 тыс. т Mineral..., 2024]. В настоящее время Китай контролирует 60–70 % мировой добычи и 90 % переработки редкоземельных руд, в том числе добываемых в США.

Результаты исследований: литий и РЗМ Карелии

Геолого-поисковые работы и научные исследования по оценке металлогенических перспектив территории Карелии на редкие металлы, включая литий и РЗМ, проводились в основном в прошлом веке, соответственно, с применением недостаточно точных аналитических методов и носили преимущественно рекогносцировочный и прогнозный характер. Результаты этих работ систематизированы в монографиях [Хазов и др., 1993; Минерально-сырьевая..., 2005]. Позднее проводились преимущественно минералого-геохимические исследования некоторых редкометалльных проявлений, расположенных в южных и северных районах Карелии [Кулешевич и др., 2014; Кулешевич, 2016]. Впоследствии систематизация и ревизия всей имеющейся информации по редкометалльным проявлениям региона послужили основой для проведения их рудно-формационного анализа и определения металлогенического потенциала [Иващенко, 2016]. Всего на территории Карелии было выявлено около 50 редкометалльных рудных объектов, относящихся к 18 рудно-формационным типам (рис. 7), среди которых семь редкоземельных (15 рудных объектов), два комплексных с Li (14 рудных объектов). Большинство из них являются неперспективными, вследствие низких содержаний Li и РЗМ, не соответствующих понятию «проявления» [Российский..., 2003] и не относятся к основным мировым промышленным типам редкометалльного оруденения.

Литий Карелии

На территории Карелии известно несколько перспективных проявлений лития, связанных с редкометалльными LCT-пегматитами со сподуменом и лепидолитом – основного промышленного типа оруденения этого широко востребованного в современном мире и крайне дефицитного в России металла. Это Иокирантское поле редкометалльных пегматитов [Иващенко, Лавров, 1993], лепидолитовые пегматиты в обрамлении Маткасельского, Кюренлампинского и Кааламского массивов в Ладожской структуре, пегматиты со сподуменом в Хаутоваарской структуре [Сафронова, Рыбаков, 1978] и две крупные пегматитовые жилы – Аськиярви и Визиполуостров [Солдатенко и др., 1999] на севере Карелии (см. рис. 7).

Редкометалльные лепидолитовые пегматиты северо-восточного обрамления Иокирантского гнейсогранитного купола [Иващенко, Лавров, 1993] локализованы в верхних частях разреза основных вулканитов сортавальской серии, метаморфизованных в амфиболитовой фации (рис. 8). Они имеют субсогласное и резко дискордантное соотношение с вмещающими вулканитами. Пегматиты характеризуются кварц-мусковит-микроклиновым составом, блоковой структурой и слабо выраженной зональностью с обособлением в осевой части жил зон с содержанием Li_2O около 2 %, обогащенных альбитом (клевеландитом), спессартиновым гранатом (MnO до 19 %), эльбаитом, циннвальдитом, лепидолитом и уплощенными кристаллами танталит-колумбита размером до 1 см.

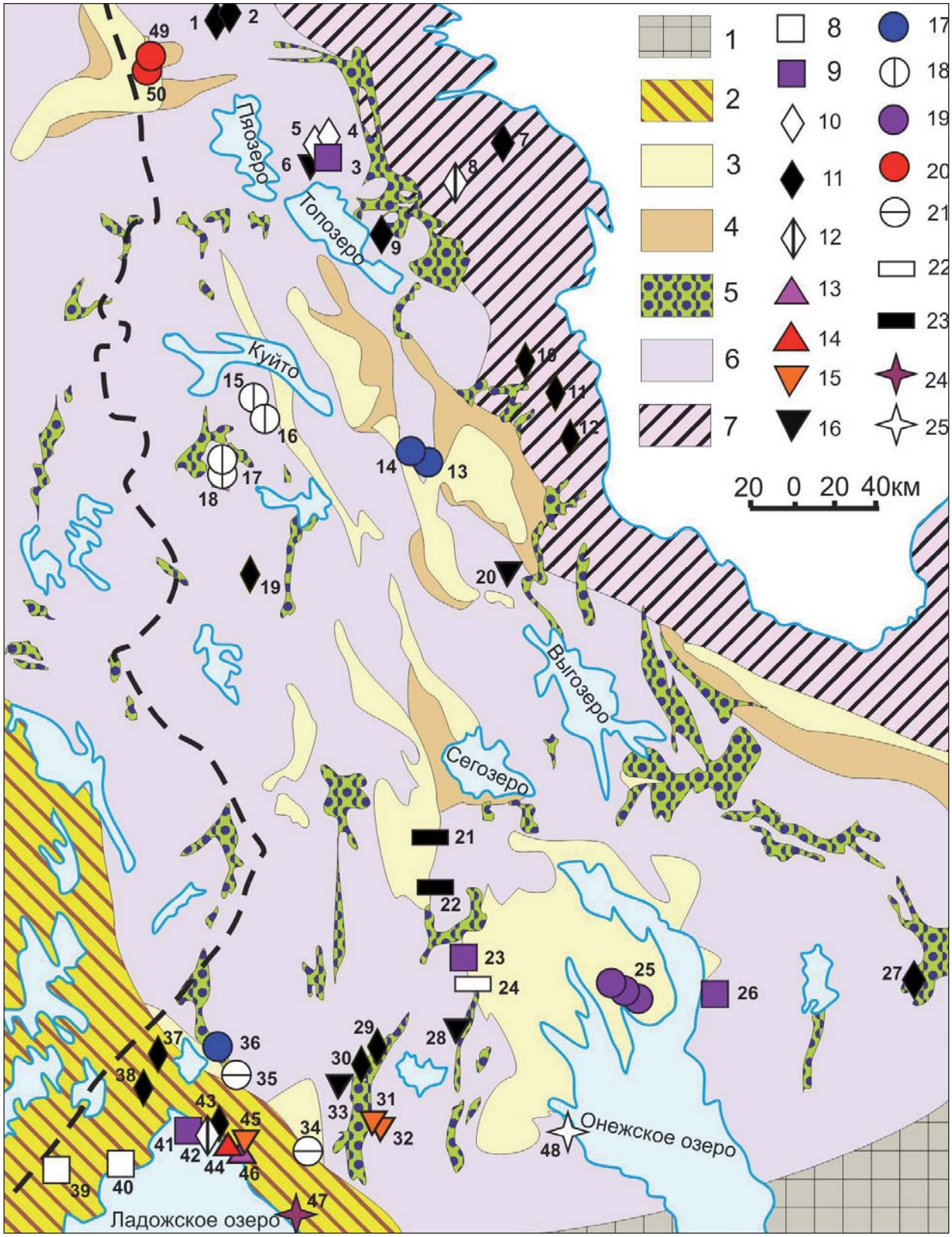

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
20 0 20 40км
Пяозеро
Топозеро
Куйто
Выгозеро
Сегозеро
Онежское озеро
Ладожское озеро

Рис. 7. Схема размещения редкометалльных рудных объектов на территории Карелии (с использованием данных Карельской геологической экспедиции) [Иващенко, 2016].

1 – платформенный чехол; 2 – Свекофеннский складчатый пояс; 3–6 – Карельская гранит-зеленокаменная область: 3 – ятулий, людиковий, калевий, вепсий нерасчлененные, 4 – сумий и сариолий нерасчлененные, 5 – лопий, 6 – комплекс архейского основания (TTG); 7 – Беломорский мобильный пояс. Рудно-формационные типы редкометалльного оруденения. 8, 9 – позднемагматические: 8 – редкоземельно (Ce, La)-фосфатный шошонитовый, 9 – ванадий-титан-железорудный (с Pd, Pt, Au) базитовый; 10–12 – пегматитовые: 10 – редкометалльный (Nb, Ta ± Zr, Ce, La) щелочногабброидный, 11 – редкометалльный (Li, Be, Ta, Nb) гранитогенный, 12 – редкоземельный (Ce, La, Y) гранитогенный; 13, 14 – апоскарново-грейзеновые (с гранитами рапакиви): 13 – бериллиевый, 14 – индий-полиметалльный; 15 – редкометалльно-гранитный (Ta, Nb, REE) (с гранитами рапакиви); 16 – альбититовый редкоземельный (Y); 17 – порфировый рений-медно-молибденовый с Au; 18–20 – субщелочные приразломные метасоматиты: 18 – редкоземельный (Ce, La, Y), 19 – уран-благороднометалльно-ванадиевый (с Li), 20 – золото-урановый (с Pd, Pt); 21 – черносланцевый молибден-благороднометалльно-ванадиевый; 22, 23 – конгломератовые: 22 – золото-редкоземельный (Y), 23 – золото-урановый; 24, 25 – эпигенетические инфильтрационные: 24 – урановый типа несогласий, 25 – уран-битумный (в кварцитопесчаниках). Цифры у значков – названия месторождений и проявлений. 1 – Визиполуостров; 2 – Аськиярви; 3 – Елетьозеро; 4 – Елетьозерское; 5 – Елетьозерское-1; 6 – Копанецкое; 7 – Плотнолямбинское; 8 – Кинаж; 9 – Пиртима; 10 – Урам; 11 – Торловручей; 12 – Слюдяноборское; 13 – Лобаш; 14 – Пяяваара; 15 – Рукосалма; 16 – Длинное; 17 – Берег; 18 – Гора; 19 – Кайдоярви; 20 – Ю. Идельское; 21 – Маймъярви; 22 – Совдозерское; 23 – Койкарско-Святнаволокское; 24 – Черный Наволок; 25 – Падминская группа; 26 – Пудожгорское; 27 – оз. Долгое; 28 – Липчагское; 29–30 – Хаутоваарская структура: 29 – Вершинное; 30 – Случайное; 31–32 – Улялегский массив рапакиви: 31 – Мюзилампи; 32 – Камень Наволок; 33 – Магоярви; 34 – Ковадъярви; 35 – Леппясюрское; 36 – Ялонваара, 37 – Маткаселька; 38 – Туоксъярви (Иокирантское поле редкометалльных пегматитов); 39 – Элисенваара (Кайвомякский и Райвимякский шошонитовые массивы); 40 – Акионсалми; 41 – Вялимяки; 42 – Нуолайниеми; 43 – Линнаваара; 44 – Хопунваара; 45–46 – Салминский массив рапакиви: 45 – Хепаоя; 46 – Люпикко; 47 – Карку; 48 – Птицефабрика; 49 – Озерное; 50 – Лагерное

Fig. 7. Rare-metal ore objects in Karelia (with the use of the data from the Karelian Geological Expedition) [Ivashchenko, 2016].

1 – Platform cover; 2 – Svecofennian Fold Belt; 3–6 – Karelian Granite-Greenstone Region: 3 – Jatulian, Ludicovian, Kalevian, and Vepsian, unspecified; 4 – Sumian and Sariolian, unspecified; 5 – Lopian, 6 – complex of the Archean basement (TTG); 7 – Belomorian Mobile Belt. Types of rare-metal mineralization. 8, 9 – Late magmatic: 8 – rare-earth(Ce, La)-phosphate shoshonitic, 9 – vanadium-titanium-iron basic; 10–12 – pegmatitic: 10 – rare-metal (Nb, Ta ± Zr, Ce, La) alkaline gabbroic, 11 – rare-metal (Li, Be, Ta, Nb) granitogenic, 12 – rare-earth (Ce, La, Y) granitogenic; 13, 14 – post-skarn-greisen (with rapakivi granite): 13 – beryllium (with rapakivi granite), 14 – indium-polymetallic; 15 – rare-metal-granite (Ta, Nb, REE) (with rapakivi granite); 16 – rare-earth (Y) albitite; 17 – porphyry rhenium-copper-molybdenum with Au; 18–20 – subalkaline fault line metasomatic rocks: 18 – rare-earth (Ce, La, Y), 19 – uranium-noble metals-vanadium (with Li); 20 – gold-uranium (with Pd, Pt); 21 – molybdenum-noble metals-vanadium black shale; 22, 23 – conglomerate: 22 – gold–rare-earth (Y), 23 – gold-uranium; 24, 25 – epigenetic infiltration: 24 – uranium unconformity type, 25 – uranium-bitumen in quartzitic sandstone. Deposits and occurrences (numerals in figure): 1 – Vizipoluostrov; 2 – Aashiquijarvi; 3 – Eletozero; 4 – Eletozersky; 5 – Eletozersky-1; 6 – Kopanets; 7 – Plotnolambinsky; 8 – Kinazh; 9 – Pirtima; 10 – Uram; 11 – Torlovruchei; 12 – Slyudyanoborsky; 13 – Lobash; 14 – Päävaara; 15 – Ruokosalma; 16 – Dlinnoe; 17 – Bereg; 18 – Gora; 19 – Kaidojarvi; 20 – S. Idel; 21 – Maimjarvi; 22 – Sovdozero; 23 – Koykar–Svyatnavolok; 24 – Cherny Navolok; 25 – Padma group; 26 – Pudozhgorsky; 27 – Lake Dolgoe; 28 – Lipchag; 29–30 – Hautovaara structure: 29 – Vershinnoe; 30 – Sluchainoe; 31–32 – Ulyalegsky rapakivi massif: 31 – Muzilampi; 32 – Kamen Navolok; 33 – Magojarvi; 34 – Kovadjarvi; 35 – Leppäsurja; 36 – Jalonvaara; 37 – Matkaselka; 38 – Tuoksjarvi (Iokirant field of rare metal pegmatites); 39 – Eliseenvaara (Kaivomyaksky and Raivimyaksky shoshonite massifs); 40 – Akionsalmi; 41 – Velimäki; 42 – Nuolainiemi; 43 – Linnavaara; 44 – Hopunvaara; 45–46 – Salmi rapakivi massif: 45 – Haapaoja; 46 – Lyupikko; 47 – Karku; 48 – Ptitsefabrika; 49 – Ozernoe; 50 – Lagernoe

В целом Иокирантские пегматитовые жилы имеют ярко выраженную редкощелочнометалльную специализацию. Большинство минералов, слагающих эти пегматиты, имеют высокие содержания лития, рубидия, цезия. Турмалин, представленный радиально-лучистыми сростками размером до 15 × 20 см^2, содержит около 1,5% двуокиси лития, а также 0,022% галлия и 0,046% цинка. Он относится к эльбаитовому ряду (содержание эльбаита – 66%) с незначительными долями шерлового (13%), бюргеритового (11%), тсилазитового (6%) и увитового (4%) миналов. В пегматитах содержится разнообразная акцессорная минерализация: апатит, циркон, титанит, рутил, анатаз, флюорит, ганит, касситерит, ортит, монацит, ксенотим, гранат (спессартин), сульфиды железа, меди, молибдена (пирит, пирротин, молибденит). Содержание касситерита варьирует от 20 до 2500 г/т.

В Хаутоваарской структуре выявлено редкометалльное пегматитовое поле в составе 8 жил [Сафронова, Рыбаков, 1978], одна из которых содержит гигантские кристаллы (до 1,9 м в псевдоморфозах) сподумена. Эта жила сечет контакт амфиболита и феррогаббро. Ее размеры не выяснены, но судя по коренным выходам, составляют не менее 20 м по мощности и 100 м протяженности. Жила зональна, с хорошо развитыми кварц-клевеландит-сподуменовой и сопряженной с ней кварц-альбитовой зонами. В последней доминирующее распространение имеет мелкопластинчатый альбит, а сподумен нацело замещен циматолитом (мусковит-альбитовый агрегат). Суммарная видимая мощность обеих зон составляет 2,5–5 м. Содержание сподумена в кварц-клевеландит-сподуменовой зоне достигает 20–25%. Альбит в обеих зонах

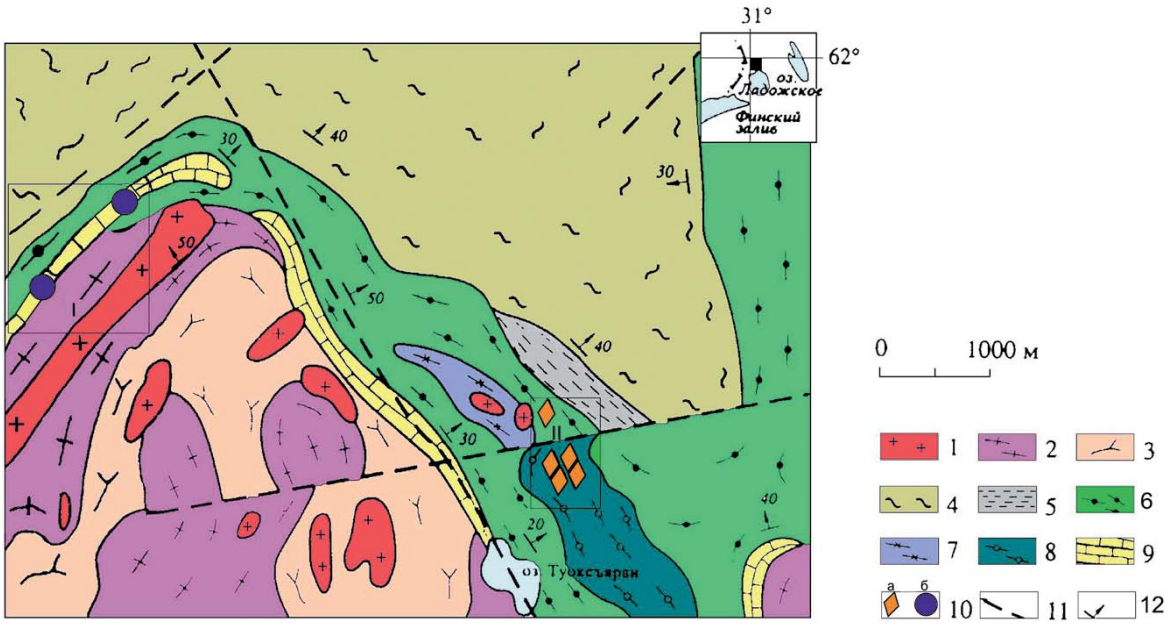


Рис. 8. Схема геологического строения северной части Иокирантского гнейсо-гранитного купола:

1 – плагиомикроклиновые и микроклиновые граниты; 2 – гнейсограниты и мигматиты по вулканогенно-терригенным образованиям кислого и среднего состава сортавальской и ладожской серий; 3 – мигматиты по основным вулканитам сортавальской серии; 4 – гранат- и андалузитсодержащие кварц-биотитовые сланцы с прослоями кварцитов и кварцитопесчаников (ладожская серия); 5–9 – сортавальская серия: 5 – графитсодержащие кварц-слюдистые и амфиболовые (апотуфовые) сланцы, 6 – амфиболовые сланцы и полевошпатовые амфиболиты с прослоями кварц-слюдистых сланцев, 7 – плагиофировые базальты и амфиболовые сланцы по ним, 8 – шаровые лавы базальтов, 9 – мраморизованные и скарнированные карбонатные породы, скарны с прослоями амфиболовых и слюдистых сланцев; 10 – рудопроявления: а – редкометалльные пегматиты, б – скарновые полиметаллические с W; 11 – тектонические нарушения; 12 – элементы залегания (сланцеватости) пород

Fig. 8. Geological scheme of the northern part of the Iokirant gneiss-granite dome:

1 – plagiomicrocline and microcline granites; 2 – gneiss-granites and migmatites after felsic and intermediate volcanic-terrigenous rocks of the Sortavala and Ladoga series; 3 – migmatites after basic volcanics of the Sortavala series; 4 – garnet- and andalusite-bearing quartz-biotite schists with interlayers of quartzite and quartzitesandstone (Ladoga series); 5–9 – Sortavala series: 5 – graphite-bearing quartz-micaceous and amphibole (apotuff) schists, 6 – amphibole schists and feldspar amphibolites with interlayers of quartz-mica schists, 7 – plagiophyric basalts and amphibole schists after them, 8 – basalt pillow lavas, 9 – marbleized and scarnified carbonate rocks, skarns with interlayers of amphibole and mica schists; 10 – ore occurrences: a – rare-metal pegmatites, b – polymetallic skarns with W; 11 – tectonic faults; 12 – elements of rock bedding (schistosity)

представлен несколькими генерациями, отличающимися морфологически и по содержанию редких щелочных металлов. Альбит содержит (г/т) Li – 3–148, Rb – 4–8427, Cs – 1–689; мусковит (%), Li – 0,04–1,2, Rb – 0,1–2,0 %, Cs – 0,08–0,64; сподумен (%) Li – 3,2–3,8, Rb – 0,07–0,12, Cs – 0,03–0,06 [Сафронова, Рыбаков, 1978]. В жиле установлены также спессартин, турмалин (Li 1,35 %), берилл (Li 0,16 %, Cs 0,7 %), танталит-колумбит. Другие пегматитовые жилы остались минералогически практически не изученными, вследствие плохой обнаженности, но контрастные ореолы повышенных содержаний редких щелочных элементов (Li 0,2 %, Rb 0,04 %) в их экзоконтактах свидетельствуют об их редкометалльной специализации.

Пегматитовые жилы Аськиярви и Визиполуостров прогнозируемого Северо-Карельского пегматитового поля расположены в СЗ части Беломорского пояса (см. рис. 7). Они прорывают архейские биотитовые гнейсы и амфиболиты и, вероятно, имеют протерозойский возраст. Простирание пегматитов субмеридиональное, мощность 35–45 м, прослеженная по обнажениям протяженность 140–440 м. Жилы зональны, с четко выделяющейся ядерной частью (до 20 м мощностью), сложенной гигантскими кристаллами (до 5 м) кварца, микроклина, альбита и редкометалльно-слюдистыми (цирголит, пирохлор, самарскит, эвксенит и др.) гнездами. По данным бороздового опробования (на 0,7 м) максимальные содержания Nb составляют 15–20 %, Zr – 2–10 %, Hf – до 1 %, Y – 2–3 %,

Ta – 0,05–1 %, Pb – 0,2–2 %, U – 1,32–1,93 %, Th – до 1,2 %, Ti – до 10 %, Rb – 0,36 %, Cs – 0,12 %, Li – 0,27 %, Sc – до 0,05 % [Солдатенко и др., 1999].

Повышенные содержания лития отмечаются также в Li-F гранитах Салминского и Улялегского массивов гранитов рапакиви, а также в метасоматитах с комплексным уранблагороднометалльно-ванадиевым оруденением (Падминский тип) Онежской структуры.

Минералами-концентраторами лития в Li-F гранитах являются слюды (Li-сидерофиллит, циннвальдит, протолитионит) с максимальными содержаниями Li до 2 % [Руб, Руб, 1986; Конышев и др., 2019].

В рудных метасоматитах Падминской группы месторождений литиевой минеральной фазой является тайниолит – высокофтористая (F 7 %) магнезиальная слюда с содержанием Li_2O 2,5 % [Румянцева и др., 1984]. На U-V проявлении Яндомозерское тайниолит слагает зону слюдитов мощностью 0,4 м с содержанием Li 0,2–2,0 % [Солдатенко и др., 1999]. Масштабы распространения тайниолита и содержания лития в Падминских месторождениях неизвестны.

РЗМ Карелии

К наиболее «крупным» проявлениям с содержаниями РЗМ, достигающими 0,4–0,5 %, относятся Елетьозерское щелочно-габброидное пегматитовое, Длинное – субщелочных приразломных метасоматитов и Элисенваарская группа позднемагматических апатит-шошонитовых проявлений (см. рис. 7). Остальные, так называемые проявления являются всего лишь пунктами минерализации с содержаниями РЗМ (преимущественно легких), не превышающих 0,2 %.

Елетьозерское проявление приурочено к щелочно-габброидным пегматитам мощностью до 30 м и протяженностью 100–300 м. Редкометалльная минерализация представлена пирохлором, ферсмитом, колумбитом, цирконом, малаконом. Содержания полезных компонентов в рудах составляют: Nb_2O_5–0,1–0,56 %, Zr – до 1 %, Ta_2O_5 – до 0,015 %, РЗМ – до 0,36 % [Минерально-сырьевая…, 2005].

Проявление Длинное и несколько аналогичных ему, расположенные в Центральной Карелии (см. рис. 7), связаны с субщелочными и щелочными (?) пироксен-амфибол-микроклиновыми метасоматитами и альбититами, контролируемыми разломами и зонами милонитизации. Они содержат Nb 0,05–0,1 %, Zr 0,08–0,25 %, Ce 0,02–0,5 %, Hf до 0,01 %, La до 0,3 %, Y до 0,05 %, Yb до 0,03 % [Минерально-сырьевая…, 2005].

В настоящее время достоверными сведениями о минерагеническом потенциале Элисенваарской группы шошонитовых интрузий считается [Ладожская…, 2020] наличие нескольких комплексных (P_2O_5, редкоземельные металлы Се-й группы, полевошпатовое сырье) проявлений, из которых наиболее крупными являются Кайвомякское и Райвимякское (см. рис. 7).

Кайвомякское проявление связано с интенсивно биотитизированными и амфиболизированными умеренно щелочными меланогабброидами одноименного дифференцированного (до щелочнополевошпатовых сиенитов) массива площадью ~8 км^2. Рудоносные породы при бортовом содержании P_2O_5 1,5 % слагают залежь протяженностью до 1000 м, шириной до 800 м. Минеральный состав руд фторапатит (5–20 %), полевые шпаты (5–30 %), амфибол, пироксен и биотит (30–60 %), титанит, алланит и магнетит (до 5–10 %). Содержание P_2O_5 в рудах варьирует от 1,5 до 9 % (среднее 2,33 %), РЗМ – 0,2–0,4 %, изредка достигая 1–1,5 %. Прогнозные ресурсы пентоксида фосфора по категориям $P_1 + P_2$ до глубины 300 м составляют 10760 тыс. т, в том числе P_1 до глубины 150 м – 5400 тыс. т [Минерально-сырьевая…, 2006].

Райвимякское проявление приурочено к меланократовым породам одноименной интрузии площадью ~6 км^2, во многом тождественной Кайвомякской, отличаясь значительным распространением более кремнекислотных пород – вплоть до умеренно щелочных гранитов. Апатитоносные породы характеризуются невыдержанностью минерального и химического составов и широкими вариациями содержаний P_2O_5 (0,5–8 %) и РЗМ (до 1,5–2 % в пегматитах). Прогнозные ресурсы пентоксида фосфора категории P_3 до глубины 300 м, оцененные в контуре массива по бортовому содержанию 1,5 %, составляют 21000 тыс. т при среднем содержании 3,0 % [Минерально-сырьевая…, 2006].

Средние содержания РЗМ в апатитоносных породах обоих проявлений составляют 0,2–0,4 % и определяются наличием соответствующей минерализации (алланит, апатит, титанит, циркон, монацит, бастнезит, церианит, Се-стетиндит и др. цериево-редкоземельные минералы). В составе РЗМ доля широко востребованных «магнитных» и остродефицитных ^{Y}РЗМ (тяжелых) составляет как в породе в целом, так и в их главных минералах-концентраторах (апатите, титаните, алланите) всего лишь 1–9 % (табл. 4).

Таблица 4. Содержание РЗМ в апатитоносных породах и минералах-концентраторах редких земель Элисенваарской группы интрузий [Ладожская..., 2020]

Table 4. REE content in apatite-bearing rocks and rare earth minerals of the Elisenvaara group of intrusions [Ladoga..., 2020]

Порода, минерал Rock, mineral	∑РЗМ, масс. % ∑REE, mass %	^{Y}РЗМ, масс. % ^{Y}REE, mass %	Доля ^{Y}РЗМ, % Share of ^{Y}REE, %
Апатитоносные мафиты и ультрамафиты Apatite-bearing mafites and ultramafites	0,2–0,4	0,011–0,026	5,5–6,5
Апатит Apatite	0,5–2,3	0,04–0,2	8,0–8,7
Титанит Titanite	0,8–1,2	0,04–0,08	5,0–6,7
Алланит Allanite	15,1–17,4	0,1–0,17	0,7–1,0

Обсуждение результатов и выводы

Литий. Согласно Распоряжениям Правительства РФ № 2473-р от 30.08.2022 и № 939-р от 16.04.2024 литий включен в перечень основных видов дефицитного (критического) стратегического минерального сырья. В соответствии со «Стратегией развития минерально-сырьевой базы РФ до 2050 г.», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 11.07.2024 № 1838-р, литий относится к третьей группе полезных ископаемых, объединяющей импортозависимые дефицитные виды, внутреннее потребление которых существенно зависит от импорта. В то же время Россия, развивая высокотехнологичную индустрию, будет использовать Li все в более возрастающих количествах.

В 2021 году Правительством РФ утверждена «Концепция по развитию и использованию электрического автомобильного транспорта в РФ на период до 2030 года», согласно которой к 2030 году планируется производить не менее 217 тыс. электромобилей, а для этого согласно Минпромторгу РФ годовая потребность России в литии составит 85 тыс. т. Правительство РФ согласно стратегии развития металлургической промышленности России поставило задачу до 2030 года вовлечь в освоение пять крупных литиевых месторождений на территории страны (пегматитовые – Колмозерское, Полмостундровское, Тастыгское; гидроминеральные – Ковыктинское, Ярактинское), возобновить добычу на Завитинском месторождении и обеспечить внутренние потребности в литиевом сырье [Литий..., 2025]. Однако с учетом современной геополитической обстановки в мире Минпромторг России снизил годовой спрос на литий в стране до 10 тыс. т к 2030 году [Полярному..., 2026]. Вследствие этого всем российским литиевым проектам, в том числе и крупнейшему – «Полярному литию» требуется существенная государственная поддержка. Этот и другие актуальные вопросы развития литиевой отрасли, обсуждавшиеся на Форуме Creon Group «Литий-2025» [Домов, 2025], обозначили ряд проблем в наращивании производства лития в России, на решении которых необходимо сосредоточиться в ближайшем будущем.

На Колмозерском и Полмостундровском месторождениях, расположенных по соседству с Карелий, в Мурманской обл., уже начались соответствующие работы по их освоению компанией «Полярный литий» – совместное предприятие «Росатома» и «Норникеля». Запасов при годовой добыче руды 2 млн т хватит на 40 лет.

Для успешной деятельности любого горнодобывающего и перерабатывающего производства в перспективе требуется наращивание используемой минерально-сырьевой базы. Соответственно, для проекта «Полярный литий» это условие в будущем может выполняться как за счет доразведки Колмозерского месторождения, так и привлечением редкометалльных ресурсов пегматитовых рудных объектов на территории Карелии. В первую очередь, это пегматитовые проявления Аськиярви и Визиполуостров, которые по настоящее время остаются практически не изученными. Однако высокие содержания в них Nb, Ta, близкие к промышленным – Li, Cs и других редких элементов с учетом структурных особенностей (размер кристаллов до 5 м), сопоставимых с Колмозерскими пегматитовыми жилами, и признаки зонального строения позволяют предполагать наличие в этих пегматитовых жилах зон с лепидолитом и сподуменом.

Редкометалльные пегматиты с лепидолитом и сподуменом в Ладожской (Иокирантское) и Хаутаваарской (Случайное) структурах

(см. рис. 7) изучены слабо и только с поверхности [Сафронова, Рыбаков, 1978; Иващенко, Лавров, 1993], но даже по этим ограниченным данным усматривается их большое сходство с LCT-пегматитами районов Каустинен и Сомеро-Таммела в Финляндии, которые готовятся к разработке [Sarapää et al., 2015]. На современном эрозионном срезе пегматиты Иокиранты имеют лепидолит-кварц-клевеландитовый и Li-мусковит-кварц-калиевополевошпатовый минеральный состав, что в соответствии с установленными особенностями зональности некоторых LCT-пегматитов в других регионах мира [Bradley et al., 2017a; Liu et al., 2022; Wang et al., 2022] может предопределять вероятное нахождение на более глубоких уровнях Иокирантских пегматитов зон, обогащенных сподуменом.

Li-F граниты Салминского и Улялегского массивов рапакиви в местах их обогащения литий-обогащенными слюдами отвечают гранитному промышленному типу месторождений лития, наиболее известным представителем которого является месторождение Ичунь в Китае [USGS, 2012]. Месторождение связано с Ичуньским гранитным интрузивом, имеющим зональное строение (снизу вверх): средне-крупнозернистые протолитионитовые граниты → среднезернистые микроклин-альбитовые протолитионит-мусковитовые граниты → мелкозернистые альбитизированные мусковит-лепидолитовые граниты → мелкозернистые альбит-лепидолитовые граниты → альбитизированные и грейзенизированные топаз-лепидолитовые граниты и грейзены [USGS, 2012]. Li-F гранитные интрузии Ладожской структуры имеют ряд минералого-геохимических особенностей [Конышев и др., 2019; Ivashchenko, 2023], сходных с таковыми Ичуньского интрузива, но для определения их рудного потенциала на литий необходимы дополнительные данные, главным образом, об их вертикальном строении. Наиболее вероятным местом нахождения перспективных на промышленный литий гранитов, исходя из данных буровых работ, проведенных в Питкярантском рудном районе более 50 лет назад, является Уксинская купольная структура.

Специальное опробование на литий на месторождениях Падминской группы не проводилось, Тайниолит макроскопически – светлая слюда, похожая на серицит или флогопит. Высокие содержания лития на Яндомозерском проявлении получены случайно. На Падминских месторождениях внешние безрудные зоны метасоматитов со светлой слюдой, принимавшейся, вероятно, за серицит, которая, возможно, была тайниолитом, не опробовались. В случае подтверждения широкого распространения тайниолита в падминских рудах их ценность может существенно возрасти за счет лития как попутного компонента, тем самым повышая экономическую привлекательность Падминских месторождений для комплексного промышленного освоения.

РЗМ. В России в настоящее время добыча редкоземельных руд производится только на Ловозерском месторождении. Ловозерский ГОК работает на 1/3 проектной мощности с низкой экономической эффективностью [Государственный…, 2024]. Это обусловлено низкой годовой производительностью (13 тыс. т) Соликамского завода в Пермской обл., куда направляется получаемый ГОКом лопаритовый концентрат и отсутствием в России разделительного производства РЗМ. Конечный продукт на Соликамском заводе – 2 тыс. т неразделенного карбоната РЗМ, 600 т пентоксида Nb и 40 т пентоксида Ta. Коллективный концентрат РЗМ экспортируется в Китай, а потом Россия покупает у Китая готовые изделия, содержащие РЗМ. В СССР разделительные производства РЗМ были в Эстонии, Казахстане, Киргизии. В настоящее время небольшое производство разделенных РЗМ осуществляет «Росатом». Сдерживающим фактором развития редкоземельной промышленности в России является отсутствие технологических цепочек для получения разделенных РЗМ. Поэтому, несмотря на громадные запасы РЗМ и наличие таких уникальных месторождений как Томторское (3,23 млн т РЗМ с содержанием 11,99 %), Россия обеспечивает себя РЗМ в основном только за счет импорта [Государственный…, 2024].

Согласно госпрограмме по разработке РЗМ, Россия к 2030–2035 гг. должна выйти на самообеспечение и полностью отказаться от импорта РЗМ. В ближайшем будущем планируется освоение крупных месторождений комплексных руд, связанных с карбонатитами и корами выветривания по ним (Томторское в Республике Саха (Якутия), Чуктуконское в Красноярском крае и Белозиминское в Иркутской обл.), а также создание производственных линий по переработке этих руд с получением разделенных РЗМ [Государственный…, 2024]. Более того, потенциальные возможности России в увеличении объемов производства РЗМ могут удовлетворить почти половину мировой потребности в этих металлах за счет их получения из апатитового концентрата Хибинских месторождений по технологии, патентом на которую владеет «Росатом».

Таким образом, в России проблем с запасами и ресурсами РЗМ нет. Они есть только в технологиях производства и разделения РЗМ. Следовательно, незначительные по масштабам и с бедными рудами проявления РЗМ на территории Карелии, не относящиеся к ведущим промышленным типам редкоземельного оруденения, в долгосрочной перспективе промышленного интереса не представляют.

Ситуация с литием Карелии несколько иная. При успешном освоении в ближайшем будущем комплексных литиевых месторождений на Кольском п-ове и в Финляндии их формационно-возрастные аналоги на территории Карелии при соответствующем доизучении могут перейти в категорию экономически значимых рудных объектов.

Литература

Быховский Л. З. Реальные, потенциальные и перспективные источники редкоземельного сырья в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2014. № 4. С. 2–8.

Быховский Л. З., Пикалова В. С., Лихникевич Е. Г. Редкоземельное и скандиевое сырье: алгоритм освоения природных и техногенных источников // Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование: Тр. науч.-практ. конф. М.: ФГБУ ВИМС, 2020. С. 24–33.

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году. М.: ВИМС, 2024. 710 с.

Домов А. Литиевый парадокс: куда повернет отрасль после падения спроса. Редкие земли. 22.10.2025. URL: https://rareearth.ru/ru/pub/20251022/04462.html (дата обращения: 25.11.2025).

Дробот Д. В., Буслаева Т. М. Редкие и платиновые металлы в XX–XXI вв. // Рос. хим. журн. 2001. Т. XLV, № 2. С. 46–55.

Иващенко В. И. Главные руднoформационные типы редкометалльного оруденения Карелии // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 2. С. 189–194.

Иващенко В. И., Лавров О. Б. Новое Иокирантское поле редкометалльных пегматитов в Приладожье (Карелия) // Геология рудных месторождений. 1993. Т. 35, № 6. С. 544–546.

Конышев А. А., Алферьева Я. О., Аносова М. О., Русак А. А., Корепанов Я. И. Состав слюд гранитов Салминского батолита как индикатор формирования Nb–Ta минерализации // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 3. С. 69–77.

Кулешевич Л. В. Редкоземельная минерализация Тикшеозерско-Елетьозерского щелочного комплекса (Северная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии: сб. ст. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. Вып. 18. С. 71–87.

Кулешевич Л. В., Дмитриева А. В., Хазов Р. А. Ba-Sr-P-Ti-TR-полевошпатовое сырье Элисенваарского щелочного комплекса (Карелия): геохимия и минералогия редкоземельных элементов // Ученые записки ПГУ. 2014. № 4. С. 67–70.

Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.

Литий России // ВМ NEDRADV. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/ratings?rubric=10bf605261c2320b59dda400e8a644e6#8d563 (дата обращения: 18.09.2025).

Литий-ионные аккумуляторы: мировой рынок и тренды развития. URL: https://xn-80aplem.xn-p1ai/analytics/Litij-ionnye-akkumulatory-mirovoj-rynok-i-trendy-razvitia/ (дата обращения: 18.09.2025).

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 1 / Ред. В. П. Михайлов, В. Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2005. 278 с.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2 / Ред. В. П. Михайлов, В. Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.

Обзор рынка лития – 2024 год. URL: https://longterminvestments.ru/lithium-market-2024/ (дата обращения: 21.11.2025).

«*Полярному* литию» потребуется господдержка из-за падения прогноза спроса. URL: https://www.rbc.ru/business/21/05/2026/6a0de6e39a7947402fecfe00 (дата обращения: 23.09.2026).

Редкоземельные металлы в мире: в поисках сокровищ. Добывающая промышленность. URL: https://dprom.online/mining/redkozemelnye-metally-v-mire-v-poiskah-sokrovishh/ (дата обращения: 12.05.2025а).

Редкоземельные металлы в России: действующие проекты и перспективы. URL: https://dprom.online/mining/ryedkozyemyelniye-myetalli-v-rosseeee/ (дата обращения: 12.05.2025б).

Российский металлогенический словарь. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003. 320 с.

Руб М. Г., Руб А. К. Слюды редкометалльных, оловоносных и вольфрамоносных магматических ассоциаций как индикаторы их генезиса и рудоносности // Особенности породообразующих минералов магматических пород. М.: Наука, 1986. С. 101–126.

Румянцева Е. В., Мищенко К. С., Калиничева Л. И. Тайниолит и хромованадиевые слюды в метасоматитах Карелии // Записки ВМО. 1984. Вып. 1. С. 68–75.

Сафронова Г. П., Рыбаков С. И. Новое редкометалльное пегматитовое поле в Восточной части Балтийского щита // Геология, минералогия и геохимия пегматитовых полей Карелии. Петрозаводск: Кар. ФАН СССР, 1978. С. 62–71.

Середин В. В. Новый метод первичной оценки перспективности редкоземельных руд // Геология рудных месторождений. 2010. № 52(5). С. 475–480.

Солдатенко В. Е. и др. Регистрационная карта полезных ископаемых Республики Карелия по результататм работ ГП «Невскгеология». (Отчет по договору № 8-097 с Карелприродресурсом). 1999 г. Кар. ТФГИ.

Твердохлебова Т. В., Усова Е. А. Экономическая глобализация и проблемы национальной и международной безопасности // Пробл. совр. экономики. 2011. № 4. С. 34–37.

Хазов Р. А., Попов М. Г., Бискэ Н. С. Рифейский калиевый щелочной магматизм южной части Балтийского щита. СПб.: Наука, 1993. 217 с.

Цивадзе А. Ю., Бездомникова А. А., Костикова Г. В. Литиевый бум: источники лития и перспективы российской литиевой промышленности // Геол. рудных месторождений. 2023. Т. 65, № 5. С. 444–449.

Batapola N. M., Dushyantha N. P., Premasiri H. M. R., Abeysinghe A. M. K. B., Rohitha L. P. S., Ratnayake N. P., Dissanayake D. M. D. O. K., Ilankoon I. M. S. K., Dharmaratne P. G. R. A comparison of global rare earth element (REE) resources and their mineralogy with REE prospects in Sri Lanka // Journal of Asian Earth Sciences 200. 2020. 104475. doi: 10.1016/j.jseaes.2020.104475

Bradley D. C., McCauley A. D., Stillings L. M. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-0, 2017a. 48 p. doi: 10.3133/sir201050700

Bradley D. C., Stillings L. L., Jaskula B. W., Munk Lee-Ann, McCauley A. D. Lithium, chap. K. Eds.: K. J. Schulz, J. H. Jr. DeYoung, R. R. Seal, D. C. Bradley. Critical mineral resources of the United States–Economic and environmental geology and prospects for future supply: U. S. Geological Survey Professional Paper 1802. 2017b. P. K1–K21. doi: 10.3133/pp1802K

Bru K., Christmann P., Labbé J. F., Lefebvre G. Panorama mondial 2014 du marché des Terres Rares. Rapport BRGM RP-64330-FR. 2015.

Gardiner N. J., Jowitt S. M., Sykes J. P. Lithium: critical, or not so critical? Geoenergy 2023-045. 2024. Vol. 2. doi: 10.1144/geoenergy2023-045

Greenbushes home to the world's premier lithium mineral asset. August 2022. URL: https://www.talison-lithium.com (дата обращения: 21.12.2022).

Grew E. S., Hystad G., Toapanta M. P. C., Eleish A., Ostroverkhova A., Golden J., Hazen R. M. Lithium mineral evolution and ecology: comparison with boron and beryllium // Eur. J. Mineral. 2019. no. 31. P. 755–774.

Ivashchenko V. I. Critical metals mineralization in the late-stage intrusions of Salmi Batholith, Ladoga Karelia, Russia // Minerals. 2023. no. 13. 648 p. doi: 10.3390/min13050648

Liu C. X., Sun F. Y., Li J. Q., Han J., Qian Y., Zhang Y. J., Hui C., Bakht S. The petrogenesis and metallogenesis of the Chakabeishan Li-Be pegmatitic deposit in Qinghai, NW China: Evidence from Geochronology, Geochemistry, and mineral geochemistry // Ore Geology Reviews. 2022. no. 150. P. 105–186.

McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2001. Vol. 2, no. 4. 24 p. [Also available at doi: 10.1029/2000GC000109]

Mineral Commodity Summaries. 2024. U. S. Geological Survey, Washington. 2024. 210 p.

Mudd G. M. Assessing the Availability of Global Metals and Minerals for the Sustainable Century: From Aluminium to Zirconium // Sustainability. 2021. no. 13. P. 10855. doi: 10.3390/su131910855

Putzolu F., Armstrong R. N., Boyce A. J., Hepburn L. E., Bompard N., Najorka J., Lefebvre-Desanois M., Milton A. J., Salge T., Erak D., Abad I., Herrington R. J. Origin of the Jadar Volcano-Sedimentary Li-B Deposit, Serbia // Economic Geology. 2025. 27 p. doi: 10.5382/econgeo.5132

Sarapää O., Lauri L. S., Ahtola T., Al-Ani T., Grönholm S., Kärkkäinen N., Lintinen P., Torppa A., Turunen P. Discovery potential of hi-tech metals and critical minerals in Finland. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 219. Espoo, 2015. 54 p.

Sebastiaan D., Mancheri N., Tukker A., Brown T., Petavratzi E., Espinoza L. Report on the current use of critical raw materials. Solutions for CRitical Raw materials. European Expert Network. 2017. 91 p.

Technical Report on the Pre Feasibility for the Thacker Pass Project, Humboldt Country, Nevada, USA. 2018. 266 p.

USGS. Mineral Commodity Summaries, W. 2012. P. 94–95.

Wang Z., Li J., Chen Z., Yan Q., Xiong X., Li P., Deng J. Evolution and Li Mineralization of the No. 134 Pegmatite in the Jiajika Rare-Metal Deposit, Western Sichuan, China: Constrains from Critical Minerals // Minerals. 2022. no. 12. P. 45. doi.10.3390/min12010045

References

Batapola N. M., Dushyantha N. P., Premasiri H. M. R., Abeysinghe A. M. K. B., Rohitha L. P. S., Ratnayake N. P., Dissanayake D. M. D. O. K., Ilankoon I. M. S. K., Dharmaratne P. G. R. A comparison of global rare earth element (REE) resources and their mineralogy with REE prospects in Sri Lanka. *J. Asian Earth Sci*. 2020;200:104475. doi: 10.1016/j.jseaes.2020.104475

Bradley D. C., McCauley A. D., Stillings L. M. Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites: *U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-0.* 2017a. 48 p. doi: 10.3133/sir201050700

Bradley D. C., Stillings L. L., Jaskula B. W., Munk Lee-Ann, McCauley A. D. Lithium, chap. K. Eds. Schulz K. J., DeYoung J. H. Jr., Seal R. R., Bradley D. C. Critical mineral resources of the United States. *Economic and environmental geology and prospects for future supply: U. S. Geological Survey Professional Paper 1802.* 2017b. P. K1–K21. doi: 10.3133/pp1802K

Bru K., Christmann P., Labbé J. F., Lefebvre G. Panorama mondial 2014 du marc*hé* des Terres Rares. *Rapport BRGM RP-64330-FR*. 2015.

Bykhovskii L. Z. Real, potential and promising sources of rare earth raw materials in Russia. Mineral'nye resursy Rossii. *Ehkonomika i upravlenie = Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2014;4:2–8. (In Russ.)

Bykhovskii L. Z., Pikalova V. S., Likhnikevich E. G. Rare earth and scandium raw materials: an algorithm for developing natural and man-made sources. *Mineral'no-syr'evaya baza metallov vysokikh tekhnologii. Osvoenie, vosproizvodstvo, ispol'zovanie = Mineral resource base of high-tech metals. Development, reproduction, use.* Proceed. of the scientific and practical conf. Moscow: FGBU VIMS; 2020. P. 24–33. (In Russ.)

Domov A. The lithium paradox: where the industry will turn after the drop in demand. *Redkie zemli = The Rare Earth Magazine*. October 22, 2025. URL: https://rareearth.ru/ru/pub/20251022/04462.html (accessed: 23.11.2025). (In Russ.)

Drobot D. V., Buslaeva T. M. Rare and platinum metals in the XX–XXI centuries. *Ros. khim. zhurnal = Russ. Chemical J.* 2001; XLV(2):46–55. (In Russ.)

Gardiner N. J., Jowitt S. M., Sykes J. P. Lithium: critical, or not so critical? *Geoenergy.* 2023-045. 2024;2. doi: 10.1144/geoenergy2023–045

Greenbushes home to the world's premier lithium mineral asset. August 2022. URL: https://www.talison-lithium.com (accessed: 21.12.2022).

Grew E. S., Hystad G., Toapanta M. P. C., Eleish A., Ostroverkhova A., Golden J., Hazen R. M. Lithium mineral evolution and ecology: comparison with boron and beryllium. *Eur. J. Mineral.* 2019;31:755–774.

Ivashchenko V. I. Main ore-formation types of rare-metal mineralization in Karelia. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits.* 2016;58 (2):189–194. (In Russ.)

Ivashchenko V. I. Critical metals mineralization in the late-stage intrusions of Salmi Batholith, Ladoga Karelia, Russia. *Minerals.* 2023;13:648. doi: 10.3390/min13050648

Ivashchenko V. I., Lavrov O. B. A new rare-earth pegmatite field at Iokiranta in the Ladoga region (Karelia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits*. 1993;35(6):44–546. (In Russ.)

Khazov R. A., Popov M. G., Biske N. S. Riphean potassic alkaline magmatism of the Southern Baltic Shield. St. Petersburg: Nauka; 1993. 217 p. (In Russ.)

Konyshev A. A., Alfer'eva Ya. O., Anosova M. O., Rusak A. A., Korepanov Ya. I. Composition of micas from granites of the Salmi batholith as an indicator of Nb–Ta mineralization formation. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geologiya = Moscow University Geology Bulletin*. 2019;3:69–77. (In Russ.)

Kuleshevich L. V. Rare-earth mineralization of the Tiksheozero-Eletozero alkaline complex (Northern Karelia). *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Mineral Resources of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2016. Iss. 18. P. 71–87. (In Russ.)

Kuleshevich L. V., Dmitrieva A. V., Khazov R. A. Ba-Sr-P-Ti-REE-feldspar raw materials of the Elisenvaara alkaline complex (Karelia): geochemistry and mineralogy of rare-earth elements. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gos. universiteta = Proceed. Petrozavodsk State University*. 2014;4:67–70. (In Russ.)

Lithium of Russia. BM NEDRADV. URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/ratings?rubric=10bf605261c2320b59dda400e8a644e6#8d563 (accessed: 18.09.2025). (In Russ.)

Lithium-ion batteries: global market and development trends. URL: https://xn-80aplem.xn-p1ai/analytics/Litij-ionnye-akkumulatory-mirovoj-rynok-i-trendy-razvitia (accessed: 18.09.2025). (In Russ.)

Lithium market overview – 2024. URL: https://longterminvestments.ru/lithium-market-2024/ (accessed: 22.11.2025). (In Russ.)

Liu C. X., Sun F. Y., Li J. Q., Han J., Qian Y., Zhang Y. J., Hui C., Bakht S. The petrogenesis and metallogenesis of the Chakabeishan Li-Be pegmatitic deposit in Qinghai, NW China: evidence from geochronology, geochemistry, and mineral geochemistry. *Ore Geology Reviews*. 2022;150:105186.

McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2001;2(4):24. doi: 10.1029/2000GC000109

Mikhailov V. P., Aminov V. N. (eds.). Mineral resource base of the Republic of Karelia. Book 1. Petrozavodsk: Karelia Publ.; 2005. 278 p. (In Russ.)

Mikhailov V. P., Aminov V. N. (eds.). Mineral resource base of the Republic of Karelia. Book 2. Petrozavodsk: Karelia Publ.; 2006. 356 p. (In Russ.)

Mineral Commodity Summaries, 2024. U. S. Geological Survey, Washington. 2024. 210 p.

Mudd G. M. Assessing the availability of global metals and minerals for the sustainable century: from aluminium to zirconium. *Sustainability.* 2021;13:10855. doi: 10.3390/su131910855

'Polar Lithium' will require state support due to lowered demand forecast. URL: https://www.rbc.ru/business/21/05/2026/6a0de6e39a7947402fecfe00 (accessed: 23.09.2026). (In Russ.)

Putzolu F., Armstrong R. N., Boyce A. J., Hepburn L. E., Bompard N., Najorka J., Lefebvre-Desanois M., Milton A. J., Salge T., Erak D., Abad I., Herrington R. J. Origin of the Jadar volcano-sedimentary Li-B deposit, Serbia. *Economic Geology.* 2025. 27 p. doi: 10.5382/econgeo.5132

Rare earth metals in the world: in search of treasures. Mining industry. URL: https://dprom.online/mining/redkozemelnye-metally-v-mire-v-poiskah-sokrovishh (accessed: 12.05.2025a.) (In Russ.)

Rare earth metals in Russia: current projects and prospects. URL: https://dprom.online/mining/ryedkozyemyelniye-myetalli-v-rosseeee/ (accessed: 12.05.2025б.). (In Russ.)

Rub M. G., Rub A. K. Micas of rare-metal, tin-bearing and tungsten-bearing igneous associations as indicators of their genesis and ore content. *Osobennosti porodoobrazuyushchikh mineralov magmaticheskikh porod = Features of rock-forming minerals of igneous rocks.* Moscow: Nauka; 1986. P. 101–126. (In Russ.)

Rumyantseva E. V., Mishchenko K. S., Kalinicheva L. I. Tainiolit and chromium-vanadium micas in Karelian metasomatites. *Zapiski VMO = Zapiski of the All-Union Mineralogical Society*. 1984;1:68–75. (In Russ.)

Russian metallogenic dictionary. St. Petersburg: VSEGEI Publ.; 2003. 320 p. (In Russ.)

Sarapää O., Lauri L. S., Ahtola T., Al-Ani T., Grönholm S., Kärkkäinen N., Lintinen P., Torppa A., Turunen P. Discovery potential of hi-tech metals and critical minerals in Finland. Geological Survey of Finland, *Report of Investigation 219*. Espoo. 2015. 54 p.

Sebastiaan D., Mancheri N., Tukker A., Brown T., Petavratzi E., Espinoza L. Report on the current use of critical raw materials. *Solutions for CRitical Raw materials. European Expert Network.* 2017. 91 p.

Safronova G. P., Rybakov S. I. New rare-metal pegmatite field in the eastern part of the Baltic Shield. *Geologiya, mineralogiya i geokhimiya pegmatitovykh polei Karelii = Geology, mineralogy, and geochemistry of pegmatite fields of Karelia.* Petrozavodsk: Kar. Br. AS USSR; 1978. P. 62–71. (In Russ.)

Seredin V. V. A new method for primary assessment of rare earth ores prospects. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits.* 2010;52(5):475–480. (In Russ.)

Sharov N. V. (ed.). Ladoga Proterozoic structure (geology, deep structure, and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 435 p. (In Russ.)

Soldatenko V. E. et al. Registration map of mineral resources of the Republic of Karelia based on the results of work by the Nevskgeologiya state enterprise. (Report on contract No. 8-097 with Karelprirodresurs). 1999. Kar. TFGI. (In Russ.)

State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023. Moscow: VIMS; 2024. 710 p. (In Russ.)

Technical Report on the Pre Feasibility for the Thacker Pass Project, Humboldt Country, Nevada, USA. 2018. 266 p.

Tverdokhlebova T. V., Usova E. A. Economic globalization and problems of national and international security. *Probl. sovr. ehkonomiki = Problems of Modern Economics.* 2011;4:34–37. (Russ.)

Tsivadze A. Yu., Bezdomnikova A. A., Kostikova G. V. Lithium Boom: Lithium Sources and Prospects of the Russian Lithium Industry. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits.* 2023;65(5):444–449. (In Russ.)

USGS. Mineral Commodity Summaries, W. 2012. P. 94–95.

Wang Z., Li J., Chen Z., Yan Q., Xiong X., Li P., Deng J. Evolution and Li mineralization of the No. 134 Pegmatite in the Jiajika rare-metal deposit, Western Sichuan, China: constrains from critical minerals. *Minerals.* 2022;12:45. doi: 10.3390/min12010045

Поступила в редакцию / received: 30.09.2025; принята к публикации / accepted: 01.10.2026.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Иващенко Василий Иванович

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: ivashche@krc.karelia.ru

CONTRIBUTOR:

Ivashchenko, Vasily

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 24–53
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 24–53
DOI: 10.17076/geo2458

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ
Reviews

УДК 55:502.64(470.22)

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И РОЛЬ В РАЗВИТИИ РЕГИОНА

С. А. Светов

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Республика Карелия, расположенная в пределах Фенноскандинавского щита, представляет собой уникальный геологический «архив», охватывающий более 3,5 млрд лет истории Земли – от формирования ранней континентальной коры, архейских зеленокаменных поясов, протерозойских вулканогенно-осадочных комплексов, уникальных минеральных систем до поздних голоценовых ледниковых событий. Геологическая история формирования территории Карелии находит свое отражение в многочисленных объектах геологического наследия, включающих стратотипические разрезы, палеонтологические местонахождения, минералого-петрографические памятники, геоморфологические и тектонические объекты, астроблемы, а также исторические горнопромышленные комплексы. На основе инвентаризации ранее выделенных объектов геонаследия Карелии и кластерного подхода к рекреационному освоению территории выделены перспективные, географически и тематически связанные геокластеры, различающиеся по геологическому нарративу и рекреационному потенциалу. На примере Горного парка «Рускеала» продемонстрирована эффективность коммерциализации геологического наследия, основанная на интеграции научного, предпринимательского и общественного потенциалов. Предложено обоснование концепции геологического наследия как нового вида природного ресурса, принципиально отличающейся от невозобновляемых сырьевых запасов тем, что его ценность не убывает при использовании, а возрастает при сохранении, интерпретации и изучении. Обсуждается идея создания в Карелии сети геопарков и визит-центров, в том числе в столице республики – г. Петрозаводске как триггеров комплексного регионального развития. Показано, что геологическая история и объекты геонаследия могут стать основой для формирования региональной идентичности и нового имиджа территории как музея под открытым небом, как центра природного туризма и просвещения.

Ключевые слова: Республика Карелия; Фенноскандинавский щит; геологическое наследие; геотуризм; геокластеры; геопарки; устойчивое развитие

Для цитирования: Светов С. А. Геологическое наследие Республики Карелия: современное состояние, перспективы использования и роль в развитии региона // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 24–53. doi: 10.17076/geo2458

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания по теме НИР ИГ КарНЦ РАН.

S. A. Svetov. GEOLOGICAL HERITAGE OF THE REPUBLIC OF KARELIA: CURRENT STATE, PROSPECTS FOR USE, AND ROLE IN REGIONAL DEVELOPMENT

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

The Republic of Karelia, situated within the Fennoscandian Shield, represents a unique geological archive spanning more than 3.5 billion years of Earth's history – from the formation of early continental crust and Achaean greenstone belts, through Proterozoic volcanic-sedimentary complexes and unique mineral systems, to late glacial events. The geological evolution of Karelia is reflected in numerous geoheritage objects, including stratotype sections, paleontological localities, mineralogical-petrographic monuments, geomorphological and tectonic features, astroblemes, as well as historical mining and industrial complexes. Based on an inventory of previously identified geoheritage sites and a cluster approach to recreational land use, several geographically and thematically coherent geoclusters have been distinguished, each with its own geological narrative and recreational potential. The case of the Ruskeala Mining Park demonstrates the effectiveness of geoheritage commercialization through the integration of scientific, entrepreneurial and public potentials. The paper substantiates the concept of geological heritage as a new type of natural resource – one fundamentally different from non-renewable raw material reserves in that instead of diminish with use, its value grows through conservation, interpretation and ongoing scientific study. The idea of establishing a network of geoparks and visitor centers in Karelia, including in the republic's capital, Petrozavodsk, is proposed as a driver for integrated regional development. It is shown that geological history and geoheritage sites can serve as a foundation for shaping the regional identity and a new image of the territory – as an open-air museum, and as a center for nature-based tourism and education.

Keywords: Republic of Karelia; Fennoscandian Shield; geoheritage; geotourism; geoclusters; geoparks; sustainable development

For citation: Svetov S. A. Geological heritage of the Republic of Karelia: current state, prospects for use, and role in regional development. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026. No. 10. P. 24–53. doi: 10.17076/geo2458

Funding. The work was carried out under state assignment to the Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

Введение

В научной практике под геологическим наследием понимается совокупность уникальных геологических объектов, которые служат естественными свидетельствами истории формирования и развития Земли, эволюции ранней биосферы, а также развития технологий освоения минеральных ресурсов. Такие объекты обладают выдающейся научной, культурной, эстетической и просветительской ценностью и нуждаются в сохранении *in situ* (в месте их естественного нахождения) [Лапо и др., 1993, 1997; Gray, 2004; Макарихин и др., 2007; Геологическое наследие…, 2008; Geoheritage…, 2025].

Термин «геологическое наследие» был впервые анонсирован на первом Международном симпозиуме, посвященном сохранению геологических объектов, состоявшемся в 1991 году во французском г. Digne-les-Bain [Actes…, 1994]. Этот форум стал знаковой вехой в развитии наук о Земле, заложив основные идеи в концепцию охраны геологических памятников природы и положив начало работе по созданию геопарков. По итогам работы симпозиума была принята «Digne Declaration» [Digne-les-Bains declaration…, 1991], в которой мировое геологическое сообщество впервые обратилось к властям всех уровней с призывом признать геологическое наследие неотъемлемой частью истории человечества и обеспечить его охрану наравне с объектами биосферы. Успех мероприятия способствовал учреждению в 1993 году Европейской ассоциации по охране геологического наследия («European Association for the Conservation of Geological Heritage»). Окончательное оформление этого научного направления произошло в 2004 году, когда на Международном геологическом конгрессе во Флоренции была проведена специальная сессия «Геология – источник культурного и геологического наследия», с этого

момента изучение геонаследия стало полноценной научной дисциплиной.

В России под «геологическим наследием» понимают широкий круг объектов, отражающих многообразие геологических событий в истории Земли: эталонные и уникальные разрезы, характерные элементы ландшафта или их сочетание, указывающие на отдельные этапы формирования современного облика планеты, проявления минералов, минеральных или породных ассоциаций, текстурных или структурных особенностей горных пород. К объектам геонаследия относятся следы жизнедеятельности и останки древних организмов, выходы подземных вод, водопады, карстовые пещеры и лабиринты, местонахождения, связанные с работой выдающихся естествоиспытателей и первопроходцев, свидетельства ранних горнопромышленных разработок, исторические карьеры и отвалы, участки ныне действующих карьеров и даже дорожные выемки, вскрывающие редкие породные последовательности [Лапо и др., 1993, 1997; Макарихин и др., 2007; Геологическое наследие..., 2008].

В настоящее время существует классификация объектов геонаследия, в которой применяется во многом близкая типизация на следующие виды: стратиграфические, палеонтологические, минералогические, рудно-петрологические, вулканологические, палеотектонические, структурно-геологические, палеогеографические, геоморфологические, гидрогеологические, историко-горно-геологические и др. [Лапо и др., 1997; Макарихин и др., 2007].

При выделении объектов геологического наследия используют такие критерии: редкость, наилучшая выраженность или масштабность проявленного на объекте геологического феномена; возможность использования объекта в качестве эталона; георазнообразие – разнообразие представленных элементов (фоссилий, минералов, горных пород, форм рельефа и т. д.); наиболее древнее или наиболее позднее проявление на объекте того или иного геологического феномена; активное протекание современных геологических процессов; наличие документированных наблюдений недавних геологических событий; значение объекта в истории становления геологии как науки или в развитии горного, инженерного дела; образовательное значение объекта; эстетическая и рекреационная привлекательность объекта [Cowie, Wimbledon, 1994; Макарихин и др., 2007; Геологическое наследие..., 2008; Gordon, 2019; Geoheritage..., 2025].

Геологическое наследие относится к числу невосполнимых природных ресурсов, подверженных риску деградации, нуждается в изучении, государственном учете и охране [Gray, 2004; Геологическое наследие..., 2008]. Объекты геонаследия, попадая под государственную охрану, приобретают статус особо охраняемых геологических памятников природы и становятся частью ООПТ; их наличие учитывается при развитии территорий и землепользовании. В отличие от заказников и заповедников, участки с геологическими памятниками природы обычно не изымаются из хозяйственного использования при условии защиты объектов от неблагоприятных воздействий. Реже они получают статус памятников археологии (пещеры, древние горные выработки) или входят в состав музеев-заповедников, заповедников и национальных парков.

По инициативе Международного союза геологических наук (IUGS) в ряде европейских стран осуществляется проект «Geosites», главная цель которого – создание международного реестра геонаследия, имеющего национальное и международное значение. Данный реестр призван помочь в его защите, геоконсервации и туристическом продвижении [Cleal et al., 2001].

Дополнительно к геонаследию могут относиться геологические объекты *ex situ* (вне естественного местоположения), т. е. те, которые были извлечены из естественного места залегания и перемещены для хранения, экспозиционирования и изучения. Чаще всего в такой роли выступают образцы минералов, горных пород, окаменелостей, керн скважин, ледниковые валуны и пр. Это делается, если объект находится под угрозой разрушения из-за эрозии, добычи полезных ископаемых, строительства и пр. Согласно современным принципам сохранения геонаследия, к *ex situ* прибегают только в крайних случаях, когда объект невозможно защитить на месте. Главный принцип геоконсервации – оставлять объект в естественной среде (*in situ*) для максимальной сохранности его геологического контекста.

Комплексное развитие идеи охраны и использования объектов геонаследия в мире привело к созданию сети крупных геопарков [Jones, 2008; Henriques & Brilha, 2017; Brilha, 2018; Geoheritage..., 2025]. В отличие от объектов геонаследия, геопарк представляет собой обширные территории, имеющие важное геологическое значение и при этом обладающие научной, образовательной ценностью и что крайне важно – социальной полезностью, т. е. способствуют глубокому пониманию истории эволюции Земли и его сохранению для будущих поколений. Геопарки акцентируют свою деятельность

на сохранении геологических объектов, образовании, геотуризме и популяризации геологических и естественно-научных знаний [Chen et al., 2015; Brilha, 2018; Ferdowsi, Nemeth, 2026].

В настоящее время (к середине 2026 года) в 51 стране мира насчитывается 241 действующий глобальный геопарк мирового уровня [https://www.unesco.org/en/iggp], в России к настоящему времени таких два: «Янган-Тау» и «Торатау» (Республика Башкортостан), которые первыми в стране получили данный статус. Каждый подобный объект играет особую роль в сохранении геологического наследия, природных и культурных ценностей.

Важно отметить, что в последнее десятилетие мировая индустрия туризма претерпевает существенную трансформацию, связанную с переориентацией потребительского спроса на осмысленные, образовательные и экологически ответственные путешествия. Одним из наиболее динамично развивающихся сегментов теперь выступает геотуризм, объединяющий изучение геологического наследия, устойчивое развитие территорий и просветительскую деятельность [Geoheritage…, 2025].

Таким образом, с одной стороны, глобальный рынок геотуризма демонстрирует устойчивый рост, наличие геопарков и уникального геонаследия становится значимым фактором территориального брендинга и экономического развития территорий, интерес к северным направлениям в мире и России растет опережающими темпами. С другой стороны, научно обоснованная стратегия системного использования геологического наследия регионов России и Карелии, в частности, для долгосрочного социально-экономического развития отсутствует. Геологические объекты остаются разрозненными, не интегрированными в единую сеть, их потенциал – как образовательный, так и коммерческий – используется фрагментарно. Данная работа ставит своей целью обоснование идей использования объектов геологического наследия Карелии в качестве важного драйвера регионального развития, отталкиваясь от мирового и существующего регионального опыта.

Республика Карелия: геологическое строение и уникальное георазнообразие

Наличие объектов геологического наследия в регионе является отражением особенностей его геологического строения. В геологическом плане территория Республики Карелия включает юго-восточную часть Фенноскандинавского щита, являющегося выступом докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Главной отличительной чертой территории служит практически полное отсутствие фанерозойского осадочного чехла (за исключением локальных девонских образований на юго-востоке Карелии на границе с Вологодской обл.), что обеспечивает обнаженность докембрийской коры возрастом от 3,5 до 1,5 млрд лет (рис. 1).

Территория Республики Карелия включает три крупных тектонических сегмента, имеющих уникальную историю корообразования: Карельский кратон, Беломорский подвижный пояс и Свекофеннскую складчатую область [Слабунов и др., 2006].

Карельский кратон представляет собой обширную архейскую гранит-зеленокаменную область, сложенную тоналит-трондъемит-гранодиоритами (ТТГ) с возрастом образования от 3,4 до 2,5 млрд лет, а также супракрустальными вулканогенно-осадочными комплексами с возрастом 3,1–2,7 млрд лет, слагающими зеленокаменные и парагнейсовые пояса [Лобач-Жученко и др., 2000; Кожевников, 2000; Светов, 2005; Слабунов и др., 2006; Куликов и др., 2017]. В зеленокаменных поясах, таких как Ведлозерско-Сегозерском, Сумозерско-Кенозерском, Гимольско-Костомукшском, сформированных коматиит-базальтовыми, андезитовыми, дацитовыми ассоциациями и осадочными комплексами, метаморфизованными преимущественно в условиях зеленосланцевой и амфиболитовой фаций метаморфизма, сохраняются первичные структурные и текстурные особенности пород. Все это позволило установить уникальные для архея реликты древней океанической коры (офиолиты), фрагменты островных и вулканических дуг, образования аккреционных призм, глубоководных и мелководных осадочных бассейнов и даже отдельные палеовулканические постройки [Светов, 2005; Слабунов и др., 2006; Щипанский, 2008; Куликов и др., 2017]. В ряде зеленокаменных поясов, например, в Гимольском, Костомукшском, локализованы крупнейшие месторождения архейских железистых кварцитов на Северо-Западе России, во многих других известны рудопроявления благородных металлов [Слабунов и др., 2006].

Важный переходный этап развития Земли, граница архея – палеопротерозоя (2,5 млрд лет назад), широко запечатлен в Карельском кратоне благодаря сохранности рифтогенных комплексов, представленных вулканитами, песчаниками и конгломератами [Онежская…, 2011; Куликов и др., 2017], а также тиллитоподобными осадочными породами, являющимися

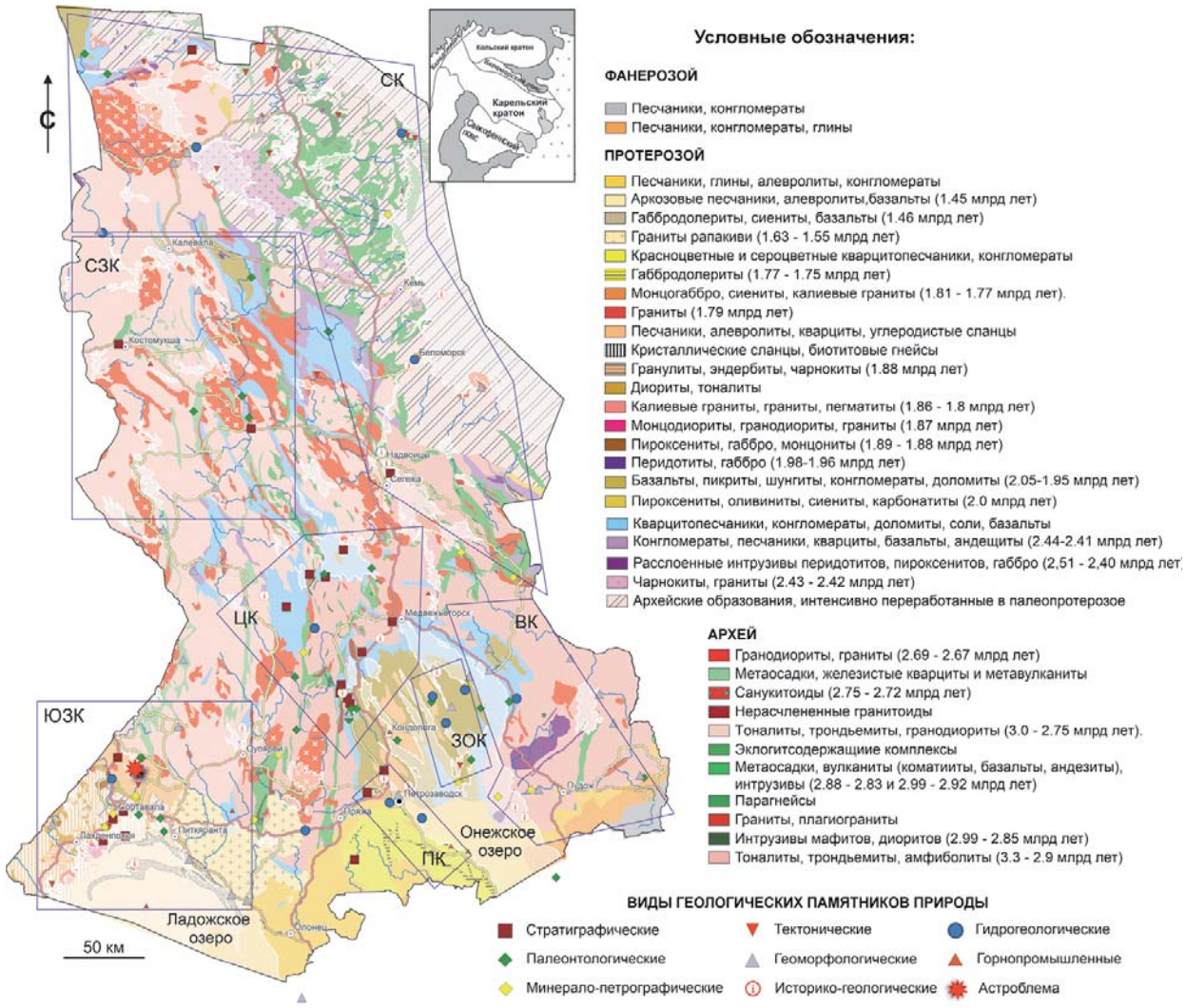


Рис. 1. Геологическая карта Республики Карелия [по: Куликов и др., 2017; Атлас..., 2021], размещение объектов геологического наследия и выделение предлагаемых рекреационных природных кластеров. Сокращения, используемые для обозначения кластеров: ЮЗК – Юго-Западный, ПК – Петрозаводский, ВК – Восточный, ЦК – Центральный, ЗОК – Заонежский, СЗК – Северо-Западный, СК – Северный. На врезке – схема строения Фенноскандинавского щита

Fig. 1. Geological map of the Republic of Karelia [based on Kulikov et al., 2017; Atlas..., 2021], showing the distribution of geological heritage sites and the delineation of the proposed recreational natural clusters. Abbreviations used for the clusters: ЮЗК – South-Western, ПК – Petrozavodsk, ВК – Eastern, ЦК – Central, ЗОК – Zaonega, СЗК – North-Western, СК – Northern. Inset – simplified structural layout of the Fennoscandian Shield

маркером гуронского оледенения – одного из наиболее масштабных и продолжительных в истории планеты.

Палеопротерозойские образования Карельского кратона сохранились в пределах крупных структур – Онежской, Ладожской, Сегозерской и др. Их разрезы представляют собой уникальный архив ранней истории Земли, фиксируя эволюцию континентальной коры в интервале от 2,5 до 1,5 млрд лет, а именно: заложение и развитие крупных магматических провинций платобазальтов, пикритов, андезибазальтов, формирование обширных морских осадочных бассейнов, с отложениями песчаников-алевролитов, доломитов, древнейших в мире солей, а также высокоуглеродистых шунгитовых пород [Онежская..., 2011; Куликов и др., 2017; Ладожская..., 2020]. На территории республики широко представлены докембрийские строматолиты [Макарихин и др., 2007], являющиеся древнейшими в Европе свидетелями сложноорганизованных экосистем, отражающих биологические процессы эволюции планеты в эпоху Великой кислородной катастрофы (Great Oxygenation Event) около 2,4–2,1 млрд лет назад.

Беломорский подвижный пояс является не менее уникальным геологическим объектом мирового значения. Формирующие его архейские гранитоиды и высокометаморфизованные породы зеленокаменных поясов, преобразованные в амфиболитовой, гранулитовой фациях метаморфизма, а также эклогиты, делают его глобальной природной лабораторией для изучения докембрийских акреционно-коллизионных процессов и эволюции литосферы ранней Земли, подтверждая существование субдукционной тектоники уже 2,8 млрд лет назад [Слабунов, 2008; Слабунов и др., 2021].

Важный этап становления консолидированной коры региона представлен в Свекофеннском аккреционном орогене (складчатой области), занимающем юго-западную часть Карелии (р-н Приладожья). Данная территория является классическим примером палеопротерозойской аккреционной системы, развивающейся в интервале 1,92–1,78 млрд лет назад, сформировавшей фундамент южной Фенноскандии в результате столкновения вулканических дуг и микроконтинентов с архейским кратоном [Балтыбаев, 2013; Ладожская…, 2020]. В ее строении представлены объемные толщи метаморфизованных вулканитов, граувакк, прорванных гранитоидами. Здесь расположены важные геологические объекты, такие как Питкярантские оловополиметаллические скарны, метатерригенные флишевые толщи, испытавшие высокоградиентный метаморфизм андалузит-силлиманитового типа, интрузивный комплекс гранитов рапакиви (Салминский массив, 1,55–1,53 млрд лет), фиксирующие переход к анорогенной стадии развития территории [Ларин, 2011], и многие другие объекты. Уникальность Свекофеннского аккреционного орогена делает его классическим объектом для понимания палеопротерозойских геодинамических процессов Земли.

На территории современного Приладожья также широко отражены неопротерозойские события, а именно стадия континентального рифтогенеза и развития пассивной окраины на юго-восточной периферии Свекофеннского орогена [Ладожская структура…, 2020]. В этот период кристаллический фундамент, консолидированный в палеопротерозое, испытывал медленное растяжение и погружение, что привело к формированию системы грабенов, выполненных толщей кварцевых песчаников, алевролитов, аргиллитов, накапливавшихся в мелководных морских и лагунных условиях. Исключительная ценность этой территории заключается в том, что она сохранила следы перехода от тектонически активного орогенного этапа к платформенному режиму, включая следы «суперконтинентальной сборки» (формирование суперконтинента Родинии около 1,0 млрд лет назад) и ее последующего распада.Таким образом, Карелия является «геологическим архивом» трех с половиной миллиардов лет истории развития Земли. Территорией, где можно проследить этапы зарождения первичной архейской сиалической коры, реконструировать стадии формирования суперконтинентов Кенорлен (2,7–2,5 млрд лет), Колумбия (2,0–1,5 млрд лет), Родиния (1,25–0,75 млрд лет) [Zhao et al., 2002; Nance et al., 2014; Nance, 2022], проследить масштабную миграцию углеводородов и этапы формирования рудных минеральных систем, чередование эпох оледенения и потепления.

Данные события и явления отражены в сотнях уникальных геологических обнажений, разрезах и ландшафтах, потенциально достойных стать объектами геологического наследия Республики Карелия, выделяя ее в масштабах России в качестве музея под открытым небом и эталонного полигона для расшифровки ранней истории нашей планеты.

На территории республики уже более 40 лет проводятся работы по инвентаризации и изучению геологических памятников природы сотрудниками Института геологии КарНЦ РАН, Института им. Карпинского и др. организаций. Важный вклад в эти работы внес В. В. Макарихин – большой энтузиаст и идеолог работ по «Карельскому геонаследию», а также П. В. Медведев, О. Б. Лавров, Д. В. Рычанчик, Л. В. Кулешевич, И. В. Борисов, А. А. Юшко, В. А. Шеков, В. В. Щипцов, А. И. Голубев, А. Е. Ромашкин, Н. И. Кондрашова, И. Н. Демидов, А. Д. Лукашов, В. С. Куликов, А. В. Степанова, В. В. Травин, А. В. Рахманова, В. В. Ериклинцев, В. А. Кузнецов, Н. И. Фришман, Т. С. Шелехова, Л. Ф. Бондарь, В. Я. Горьковец, В. Г. Пудовкин, М. Б. Раевская, В. В. Куликова, В. С. Степанов, Т. Е. Салтыкова, Н. С. Серебряков, А. И. Светова, О. С. Сибелев, Н. С. Старцев и многие другие исследователи, настоящие ценители природы и геологической истории [Макарихин и др., 2007 и ссылки там же; Mining road…, 2014; Геологическое наследие…, 2021; Южная Карелия…, 2024; Центральная Карелия…, 2025].

К настоящему времени на учет в регионе поставлено около 200 объектов геонаследия [Макарихин и др., 2007; Атлас…, 2021], 20-ти из которых официально присвоен статус особо охраняемых территорий, однако, научные исследования показывают, что подобных объектов существенно больше и работу по их актуализации необходимо методично продолжать.

Методы исследования

В основе работы лежал анализ рекреационного потенциала геологического наследия Карелии, как известных ранее объектов, так и новых перспективных локаций. В первую очередь рассматривались объекты, наиболее полно отражающие ключевые этапы региональной геологической истории и глобальные эволюционные процессы. Работа включала анализ опубликованных данных, актуализацию картографической базы и выделение наиболее перспективных локаций на основе существующего в республике рекреационно-просветительского интереса. Объекты геонаследия классифицировались по типологическому признаку (стратиграфические, геоморфологические, палеонтологические и т.д.), а их значимость определялась масштабом запечатленных в них процессов. Важнейшим критерием для выбора перспективных пямятников и локаций служила их физическая доступность. На основе географической группировки объектов предложено выделить геокластеры, имеющие различный научный, рекреационный и экономический потенциал.

В качестве экспериментального инструмента визуализации архитектурно-ландшафтных решений для предлагаемых к созданию геопарков и туристско-рекреационных объектов применялась нейросетевая модель Gemini 3. Использование ИИ позволило сгенерировать вариативные дизайн-концепции экспозиционных пространств, визит-центров, смотровых площадок и маршрутной инфраструктуры, интегрированных в природное окружение. На основе текстовых и пространственных промптов, включающих геологические описания объектов, топографические характеристики и эстетические параметры ландшафта, модель создавала фотореалистичные визуализации, позволяющие оценить гармонию и функциональность предлагаемых решений без проведения дорогостоящего натурного проектирования.

База данных

Актуализируемая база данных по объектам геонаследия Карелии интегрирована в ГИС «Геология Юго-Восточной Фенноскандии» масштаб 1:750000 [Куликов и др., 2017] с целью систематизации регионального георазнообразия. На основе ГИС в перспективе планируется создание инструмента для формирования научных и рекреационных маршрутов, организации студенческих и профессиональных практик, а также поддержки управленческих решений по интеграции геообъектов в туристическую инфраструктуру региона.

Результаты

К настоящему времени объекты геонаследия установлены во всех районах Республики Карелия и распределяются относительно равномерно по ее территории. На рис. 1 показана геологическая карта Республики Карелия с местоположением 161 объекта геонаследия [Макарихин и др., 2007; Атлас..., 2021]. Выделены следующие типы геологических памятников природы [Макарихин и др., 2007; Геологическое наследие..., 2021]: стратиграфические (опорные, типовые разрезы), палеонтологические, минералого-петрографические, тектонические, геоморфологические, астроблемы, историко-геологические, гидрогеологические, горнопромышленные, которые проиллюстрированы ниже отдельными примерами.

Стратиграфические (опорные и типовые разрезы) представляют собой эталонные последовательности горных пород, служащие основой для региональных и глобальных стратиграфических шкал. В Карелии широко развиты архейские комплексы: в структурах Хаутаваары, Совдозера, Койкар, Костомукши, Хизоваары и др., выделены опорные разрезы мезо-неоархейских (3,05–2,64 млрд лет) зеленокаменных поясов, отличающиеся высокой сохранностью и разнообразием породных литотипов. Палеопротерозойские образования сохранились в окрестностях Медвежьегорска, д. Красной Речки и п. Эльмус (вулканогенные разрезы сумийского надгоризонта (2,5–2,4 млрд лет), а также в бассейне р. Лужмы и около оз. Пялозера (терригенные толщи сариолия, 2,4–2,3 млрд лет). Побережье оз. Сегозера служит типовым разрезом ятулийского комплекса (2,3–2,1 млрд лет), объединяющего базальтовые лавы, карбонатные и вулканогенно-осадочные породы. Высокоуглеродистые породы (шунгиты) заонежского комплекса (2,05–1,98 млрд лет) представлены на СВ берегу Онежской структуры (поселки Толвуя, Шуньга, Зажогино), в районах д. Шуйской Чупы, оз. Укшозера, п. Соломенного и Ялгубского залива Онежского озера детально изучены и описаны разрезы вулканогенно-осадочных образований суйсарского надгоризонта (1,98–1,95 млрд лет); калевийский осадочный комплекс (1,92–1,8 млрд лет) представлен в р-не г. Кондопоги и озер Мунозеро – Вашезеро, а разрезы серых и малиновых кварцитопесчаников (петрозаводская

и шокшинская свита – 1,8–1,75 млрд лет), венчающие разрез нижнего протерозоя Карелии, прекрасно обнажены на территории Петрозаводска (карьер «Каменный бор») и д. Шокши. Доступны для осмотра и фрагменты разрезов мезопротерозойского вулканогенно-осадочного комплекса Приладожья, в р-не д. Салми (Пашско-Ладожской структуры), с возрастом образования 1,5–1,4 млрд лет. Научная значимость всех перечисленных объектов определяется их эталонным статусом для реконструкции ранней истории земной коры, эволюции вулканизма, осадконакопления и докембрийского рудогенеза.

Палеонтологические памятники природы представляют собой объекты, содержащие ископаемые остатки древней жизни и имеющие ключевое значение для реконструкции биологической эволюции и палеоклиматических обстановок прошлого планеты. Наиболее известные из них сосредоточены в береговых обнажениях озер Сегозеро, Мунозеро, Сундозеро, Пялозеро, Малое Янисъярви, а также Ладожского и Онежского озер (включая Южный Олений о-в), где установлено богатое видовое разнообразие строматолитов и онколитов возрастом около 2 млрд лет. Эти объекты служат ключевыми палеобиологическими эталонами для изучения ранних форм жизни и докембрийских экосистем.

Минералого-петрографические памятники объединяют объекты, к которым относятся уникальные типы горных пород и проявления редких минеральных ассоциаций. В Карелии эта группа включает максимально разнообразные образования. Среди вулканогенных объектов выделяются мыс Мустаниеми (оз. Совдозеро), гора Чалка и территории д. Игнойлы, где вскрыты уникальные по сохранности выходы коматиитовых и андезитовых лав и туфов мезоархейского возраста – свидетелей высокотемпературного мантийного и корового магматизма. На территории Ялгубы обнажаются красивейшие подушечные и вариолитовые лавы пикритов, с включениями углеводородов, свидетели ликвационных процессов и миграции древних нефтей в вулканических толщах. Район поморского с. Гридино представляет собой эталонное проявление архейских и палеопротерозойских эклогитов – глубинных пород, образовавшихся при высоких давлениях. Участки Лебещина, Зажогино и Толвуя демонстрируют обнажения высокоуглеродистых алевролитов, шунгитов и силлов габбро-долеритов палеопротерозойского возраста, имеющих значение для изучения процессов накопления углеводородов.

Минералогическую «Мекку» Карелии формируют пегматитовые поля поселков Тэдино, Малиновая Варакка и Слюдоваракка, проявление корундсодержащих пород на Хитострове в Беломорском подвижном поясе, а также месторождение гранатов Кителя, известное крупными прозрачными кристаллами альмандина. Многочисленные объекты этого типа дополняют картину яркого минералого-петрографического разнообразия региона, они могут служить не только основой для научных исследований, но и являются перспективными точками геотуристических маршрутов, позволяя наглядно демонстрировать редкие геологические феномены.

Тектонические памятники природы представляют собой уникальные естественные обнажения, в которых наблюдаются результаты тектонических процессов – разрывных нарушений, складчатых деформаций, зон дробления и метаморфизма, связанные с движениями земной коры. Эти объекты являются ключевыми для понимания геодинамической эволюции Фенноскандинавского щита, в них зафиксированы следы различных процессов, начиная от архейских аккреционно-колизионных до неопротерозойских рифтогенных событий. Ярким примером могут быть территории проявления дайковых роев (маркирующих этап растяжения земной коры) архейского возраста, например, в Чалкинской и Ирингорской структурах, палеопротерозойского этапа на Воротной Луде (Кемского р-на), в р-не с. Гридино, оз. Корбозера и других объектах. Широко представлены уникальные образования тектонических меланжей в Северной Карелии, разрывные сдвиговые зоны (связанные с формированием поздних рудных систем) в Центральной Карелии (р-н оз. Шитолампи, д. Койкары) и Приладожье. Все эти объекты в совокупности отражают сложную полифазную тектоническую историю региона. В рекреационном аспекте тектонические памятники привлекательны для образовательного туризма и являются незаменимыми площадками для полевых практик и геоэкскурсий.

Геоморфологические памятники природы относятся к наиболее выразительным и эстетически значимым категориям геологического наследия Карелии, поскольку они отражают длительную историю рельефообразования – от докембрийских тектонических движений до ледниковых событий четвертичного периода и современных экзогенных преобразований. Наиболее ярким и узнаваемым объектом этого типа является гора Воттоваара – скальный массив, расположенный в центральной

части Западно-Карельской возвышенности. Ее рельеф сформирован сочетанием тектонических поднятий и последующей длительной денудации, что привело к образованию причудливых скальных останцов, глубоких трещин, ромбовидных бассейнов и живописных уступов. К другим значимым геоморфологическим объектам Карелии относятся: Тунгозеро (комплекс моренных гряд), архипелаг Кузова (скальные останцы – «бараньи лбы» с ледниковой штриховкой, аккумулятивными террасами и береговыми валами), Уксинская озовая гряда, Челмужская коса (боковая ледниковая гряда), Пионерный канал (аккумулятивная песчаная равнина, дельтовые отложения, антропогенно-измененный рельеф), р. Сухая Водла (валунно-глыбовые краевые ледниковые образования) и многие прочие объекты. Все они представляют собой отражение четвертичной истории региона: здесь зафиксированы следы нескольких стадий оледенения – от экзарационных форм (бараньи лбы, ледниковые шрамы) до аккумулятивных (озы, камы, друмлины) и флювиогляциальных образований. Совокупная научная ценность геоморфологических памятников заключается в том, что они служат естественными архивами палеогеографических обстановок, позволяя реконструировать динамику ледниковых покровов, изменения уровня океана и даже климата. Чаще всего эти объекты являются основными точками геотуристических маршрутов, сочетая познавательную ценность с высокими эстетическими качествами карельских ландшафтов.

Историко-геологические памятники объединяют объекты, в которых геологическое строение территории неразрывно связано с культурно-историческим развитием общества, отражая многовековое взаимодействие человека с минеральными ресурсами и геологической средой. Наиболее известным объектом этой категории является мыс Бесов Нос и Пери Нос на восточном побережье Онежского озера. Здесь на гладких отполированных ледником гранитных поверхностях выбиты многочисленные петроглифы – наскальные изображения. Уникальность объекта определяется сочетанием «холста» – архейских эндербитов с ксенолитами гранитоидов, ставших естественным полотном для картин древних художников. Подобные объекты представлены и на Беломорском побережье, где роль холста выполняют уже тоналито-гнейсы.

Ранние этапы освоения недр Карелии представлены горными выработками Воицкого рудника, служащими материальным свидетельством зарождения золотодобычи и горнорудного дела в Карелии и др. объектами.

На примере разрезов в р-не Ялгубского кряжа, р. Суны, озер Кончозера и Укшозера, п. Шокши можно проследить становление и развитие научных знаний в России, начиная от первых экспедиционных наблюдений в XVIII веке до формирования научных теорий школ в XIX–XX вв.

Значимость историко-геологических памятников Карелии заключается в том, что они позволяют реконструировать историю взаимодействия человека с геологической средой – от первобытного искусства до промышленного освоения минеральных богатств, от наблюдения над природными образованиями до крупных научных выводов, теорий, научных школ, что делает их важнейшими объектами познавательного природного туризма.

Гидрогеологические памятники объединяют аттрактивные озерные, речные объекты, естественные выходы подземных вод, отражающие гидродинамические и гидрохимические особенности региона. Примером могут служить многочисленные перекаты, пороги и водопады на реках Карелии, таких как Тохмайоки, каскад водопадов Ахинкоски, пороги и водопады рек Суны, Шуи, демонстрирующие активную гидродинамику и высокие эстетические качества. Среди выходов подземных вод наиболее известны родники: «Три Ивана», «Соляная Яма», «Царицын ключ», «Фонтаны», представляющие различные типы подземных вод с уникальным химическим составом и вкусовыми свойствами, являющиеся важным элементом рекреационного потенциала региона.

Астроблемы – это ударно-метеоритные кратеры, образовавшиеся при падении крупных космических тел, являются уникальными объектами для изучения импактного метаморфизма и планетной геологии. Наиболее ярким примером в Карелии служит оз. Янисъярви – ударный кратер диаметром 14 км, возникший около 700 млн лет назад в результате падения космического тела. В береговых обнажениях озера широко распространены импактные породы – зювиты и тагомиты, образованные в результате плавления и дробления горных пород при сверхвысоких давлениях и температурах. Объект обладает высоким туристическим потенциалом как уникальный ландшафтный и образовательный памятник природы, свидетельство глобальной космической катастрофы.

Горнопромышленные памятники объединяют объекты, связанные с историей развития горного дела и металлургии в Карелии. Наиболее известным является Горный парк

«Рускеала» – современный парк на месте мраморных карьеров, разрабатывавшихся с 1765 года. К крупным объектам могут быть отнесены: исторические ломки месторождения мрамора Белая гора, в настоящее время развивающийся горный парк, карьеры шунгитовых пород поселков Максово и Зажогино в Заонежье, а также Нигозеро, с выходами шунгитсодержащих пород и антраксолитовых стяжений, исторические ломки малиновых кварцитопесчаников в п. Шокше, известных с XVIII века.

Памятниками металлургического производства служат фрагменты построек чугуноплавильного завода в Туломозере (1762 год, устье р. Туломы), а также фрагменты цехов медеплавильного завода в Кончезере и ряд других объектов.

Научная значимость горнопромышленных памятников определяется их ролью в отражении этапов освоения минеральных ресурсов, в эволюции горных технологий и формировании индустриального ландшафта региона. Подобные объекты обладают высоким туристическим потенциалом за счет сочетания природно-техногенных ландшафтов и уникальной истории освоения месторождения, истории применения добытого камня, а также человеческих судеб, неразрывно с этим связанных. Все это делает их ключевыми центрами притяжения для развития познавательного и природного туризма.

От объектов геонаследия к геологическим рекреационным кластерам

Удачная локализация большинства объектов геонаследия в пределах транспортно-доступных районов создает основу для их системного, планомерного освоения на основе кластерного подхода. Предполагая группировку объектов как по географическому, так и генетическому принципу, можно не только повысить их научно-познавательную ценность, но и сформировать полноценные туристские продукты, способные конкурировать на Российском межрегиональном и международном уровнях. Все это будет способствовать диверсификации потока туристов, сделает их пребывание на территории кластера более продолжительным и насыщенным, а также позволит сформировать экономический запрос на развитие смежных индустрий – от гостеприимства до ремесленнических и сувенирных промыслов. Глобально – формирование в республике концепции природных рекреационных кластеров позволит более взвешенно вовлекать в туристическое использование объекты геонаследия, управлять ими, а что самое важное – равномерно распределять туристические потоки, проводить охранные и мониторинговые мероприятия, развивать научные исследования. Вместе с тем, данная деятельность не может откладываться на будущее, так как в результате активных научных исследований большие объемы популярной информации о природных объектах становятся общедоступными, вызывают интерес туристов, формируют новые точки притяжения, которые в итоге приводят к бесконтрольной эксплуатации геонаследия и его быстрой деградации.

В качестве примера приведен вариант выделения по географическому признаку крупных рекреационных кластеров, различающиеся по тематике, инфраструктурной зрелости и рекреационному потенциалу (см. рис. 1). Для развития кластера принципиально важным является формирование в его внутренней структуре ярких точек притяжения – «якорных объектов», например, тематических геопарков, визитцентров, которые потенциально могут стать триггером для экономического развития всей территории кластера.

Юго-Западный кластер (Приладожье, центр – г. Сортавала). Уникальность данного кластера определяется двумя взаимодополняющими аспектами. Во-первых, здесь на компактной площади представлен практически полный спектр геологических процессов, запечатленных в объектах геонаследия – от вулканических, гидротермальных, тектонических, геоморфологических, техногенных до импактных. Такое генетическое разнообразие превращает территорию в уникальный полигон для сравнительного наблюдения различных этапов развития Земли и горного дела в России, в настоящий музей под открытым небом (рис. 2).

Во-вторых, пространственная структура кластера отличается исключительным ландшафтным разнообразием: мраморные каньоны Рускеалы сменяются гранитными уступами, многочисленные водопадные каскады – спокойными озерными акваториями, открытые карьеры – подземными штольнями. Эта эстетическая полифония в сочетании с научной насыщенностью делает кластер привлекательным как для профессиональных геологических экскурсий, так и для массового познавательного туризма. Важно отметить, что с 1961 года [Булах, Франк-Каменецкий, 1961] территории в р-не г. Питкяранты и п. Импилахти служат постоянным учебным полигоном для практик студентов СПбГУ, МГУ и ПетрГУ.

Кластер обладает современной транспортной инфраструктурой и устойчивым

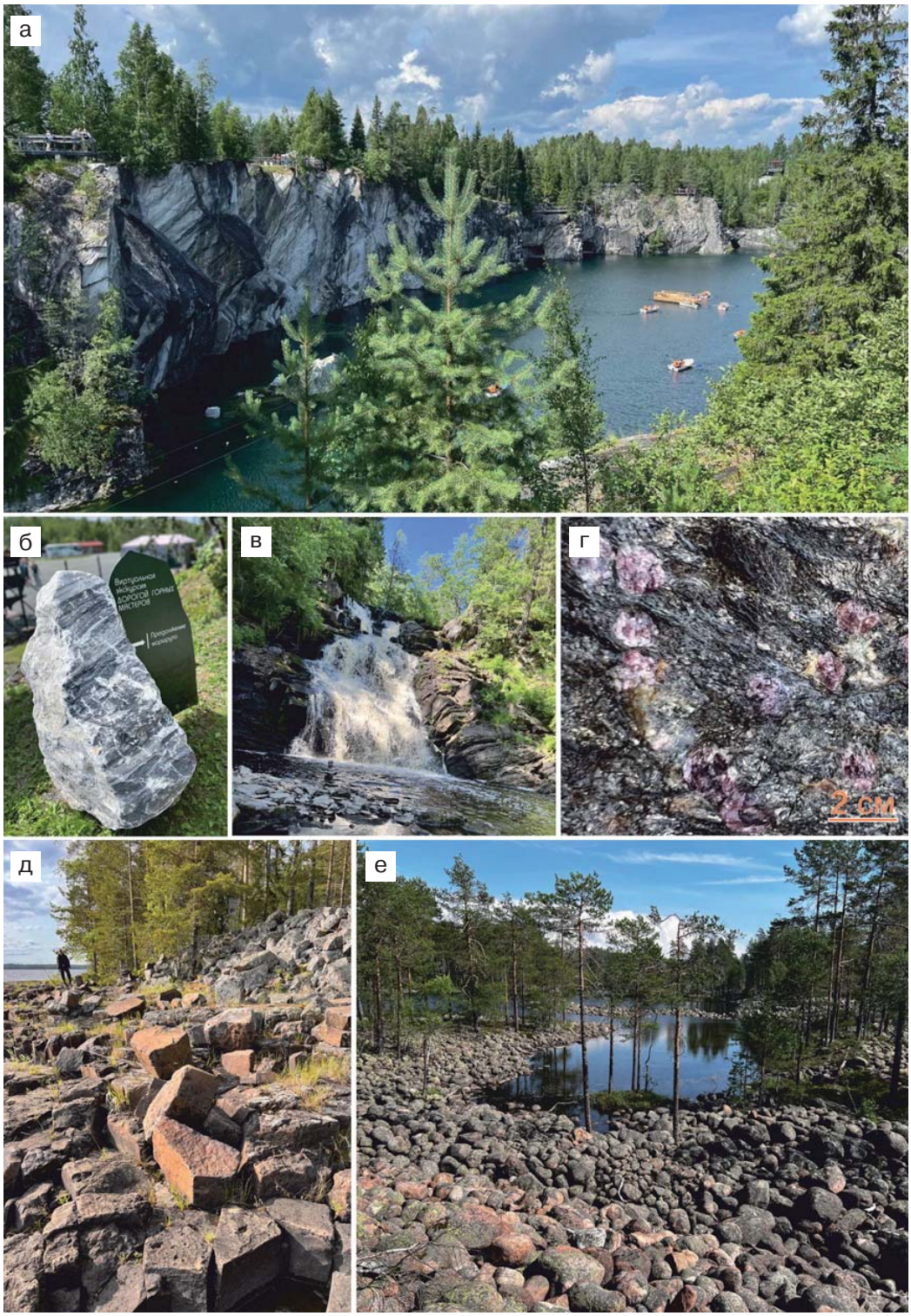


Рис. 2. Пример объектов геологического наследия Юго-Западного кластера: а – мраморный карьер в Горном парке «Рускеала» с элементами инфраструктурного обустройства; б – штуф Рускеальского мрамора как информационный элемент маршрута; в – комплекс водопадов Юканкоски на р. Кулисмайоки, парк «Белые мосты»; г – гранат (альмандин) Кительское месторождение; д – полигональная отдельность в береговых обнажениях импактитов о-в Янисъярви; е – валунные озовые «реки» Уксинской гряды

Fig. 2. Examples of geological heritage sites of the South-Western cluster: a – marble quarry in the Ruskeala Mountain Park with infrastructure elements; б – a hand specimen of Ruskeala marble used as an informational sign along the route; в – the Yukankoski waterfall complex on the Kulismajoki River, Belye Mosty Park; г – garnet (almandine) from the Kitelya deposit; д – polygonal jointing in coastal outcrops of impactites on the islands of Lake Yanisyarvi; e – boulder esker “rivers” of the Uksa ridge

туристическим интересом, его главный якорный объект – Горный парк «Рускеала».

Появление новых точек притяжения – ландшафтных объектов, геологических памятников природы, музеев, таких как о-в Койонссаари, острова Ладожских шхер – Путсаари, Тулолансаари, Риеккалансаари, Ювень, «Долина водопадов», водопады Юканкоски, Гора Филина, Гора Паасонвуори, «Минерал-Центр», «Карельский зоопарк», уже формирует значительный туристический поток на данной территории, который может быть эффективно диверсифицирован по всей сети кластера, за счет создания новых природных геологических парков (самыми перспективными можно назвать геопарки «Астроблема Янисъярви», «Уксинская озовая гряда»), а также отдельные геообъекты разных типов и маршруты – например, по местам исторических разработок отвалам железорудных, медных и пегматитовых месторождений Люппико, Питкяранты, отработанных карьеров по добыче гранитов рапакиви о-ва Сюскюянсаари, минеральным копям гранатов в Кителя и многим другим объектам. Это благодаря мультипликативному эффекту позволит комплексно развивать территорию Приладожья – уникального минералогического и геологического музея под открытым небом, сочетая высокую антропогенную нагрузку на территорию с эффективным использованием объектов геонаследия, с предотвращением их деградации.

Петрозаводский кластер занимает особое место в формирующейся системе геонаследия Карелии благодаря своей исключительной доступности и просветительской ценности. Расположенный в непосредственной близости от столицы региона г. Петрозаводска, он представляет собой серию ландшафтно-геологических локаций, где в естественных и техногенных обнажениях представлены ключевые события развития нашей планеты в палеопротерозое, в интервале 2,5–1,7 млрд лет, и последнем ледниковом периоде (20–6 тыс. лет назад). Ландшафтная палитра кластера не менее выразительна, чем его научное наполнение (рис. 3): обширные выходы вулканических пород, фрагменты подводящих лавовых каналов и неков, тектонические уступы Чертова Стула, разрезы осадочных толщ малиновых кварцитов и исторические разработки п. Шокши, каменоломни песчаников о-ва Брусно, сейсмодислокации Шуйских скал и Ялгубы, области распространения пирокластических пород у озер Кончозеро – Укшозеро, живописная долина р. Лососинки создают полную картину геологической эволюции региона.

Якорными объектами кластера могут выступать следующие территории, в перспективе самые городские природно-геологические парки России: геопарк «Древние вулканы Карелии» (объединяющий городскую область распространения палеопротерозойских вулканических образований в р-не урочища Чертов Стул – Ботанический сад – п. Соломенное), геопарк «Каменный бор», объект, сочетающий аттрактивные исторические ломки палеопротерозойских кварцитопесчаников с искусственным водоемом и уникальным горным ландшафтом, находящийся в самом сердце города, и как дополнение – геопарк «Вулкан Варио» (Ялгубский разрез палеопротерозойских лав с вариолитовыми и подушечными текстурами) и «Шокша» – объединяющий исторические и современные ломки малинового кварцита с береговым ландшафтом Онежского озера.

Высокая степень обнаженности, пешая доступность для многих объектов и близость остальных к городской инфраструктуре делают данный кластер идеальной площадкой для рекреационной, образовательной деятельности, активного спорта, туризма и комплексной популяризации геологических знаний. Все это позволяет Петрозаводскому кластеру выполнять роль природных туристических ворот в геологическое прошлое Земли и Карелии, задавая высочайший стандарт доступности и познавательной насыщенности для всего республиканского природного геотуризма.

Центральный кластер (центр – п. Гирвас) представляет собой объединение уникальных объектов (рис. 4). В его основе лежат два палеовулканических центра – Гирвас и Пор-Порог, – их вулканические постройки и лавовые потоки палеопротерозойского возраста сохранились в исключительной полноте, что позволяет реконструировать не только морфологию древних вулканических аппаратов, но и динамику их извержений. Активное обустройство и развитие территории Гирвасского палеовулкана позволили на его основе уже сформировать современный геопарк «Палеовулкан Гирвас», центр постоянного всесезонного притяжения туристов. К ядру кластера примыкают объекты, отражающие разные этапы развития территории: разрез сухого русла р. Суны, обнажающий лавовые и осадочные толщи палеопротерозоя, Марциальные Воды – старейший в России бальнеологический курорт, чьи железистые воды обязаны своим происхождением взаимодействию подземных вод с шунгитовыми породами.

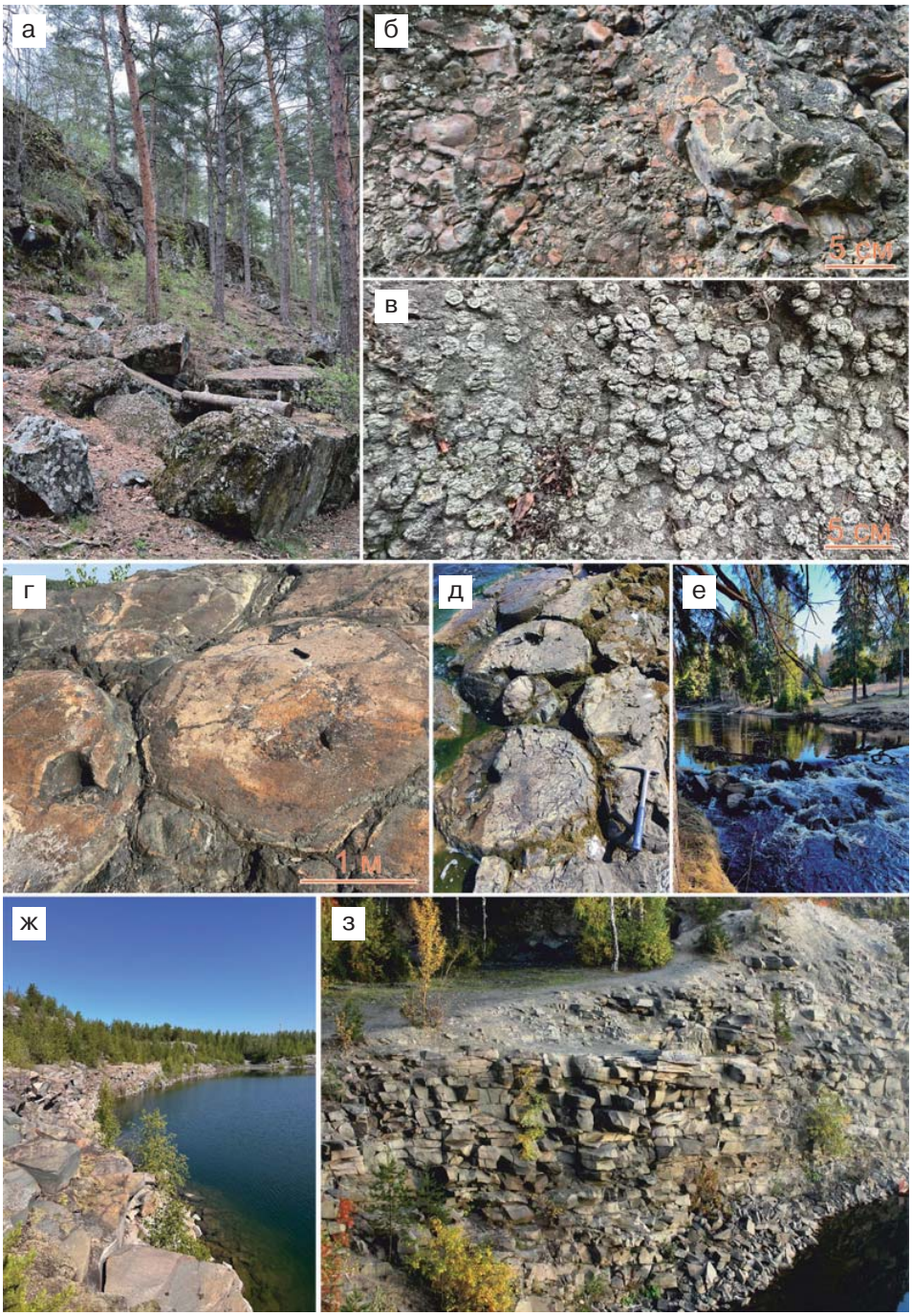


Рис. 3. Пример объектов геологического наследия Петрозаводского кластера: а – скальная гряда с вулканическим разрезом эксплозивных пород и зона сейсмообвала урочища Чертов Стул, планируемый геопарк «Древние вулканы Карелии»; б – агломератовые туфы пикробазальтов («соломенская брекчия»), урочище Чертов Стул; в – вариолитовые лавы пикробазальтов, урочище Чертов Стул; г – выходы гигантских подушечных лав, геопарк «Вулкан Варио»; д – р. Лососинка с каскадом перекатов и системой речных террас, г. Петрозаводск; е – исторические разработки кварцитопесчаников (ныне техногенное озеро), планируемый геопарк «Каменный бор»; ж – скальные гряды кварцитопесчаников со слоистостью и отдельностью, планируемый геопарк «Каменный бор»; з – исторические разработки малиновых кварцитопесчаников, планируемый геопарк «Шокша»

Fig. 3. Examples of geological heritage sites of the Petrozavodsk cluster: a – rock ridge with a volcanic section of pyroclastic rocks and a seismic collapse zone at the Chertov Stul locality, the planned geopark “Ancient Volcanoes of Karelia”; б – agglomerate tuffs of picritic basalts (“solomenskaya breccia”), Chertov Stul locality; в – variolitic lavas of picritic basalts, Chertov Stul locality; г – outcrops of giant pillow lavas, the “Vario Volcano” geopark; д – the Lososinka River with a cascade of riffles and a system of river terraces, Petrozavodsk; e – historic quarries of quartzite sandstones (now a man-made lake), the planned geopark “Kamenny Bor”; ж – rock ridges of quartzite sandstones with bedding and jointing, the planned geopark “Kamenny Bor”; з – historic quarries of crimson quartzite sandstones, the planned geopark “Shoksha”

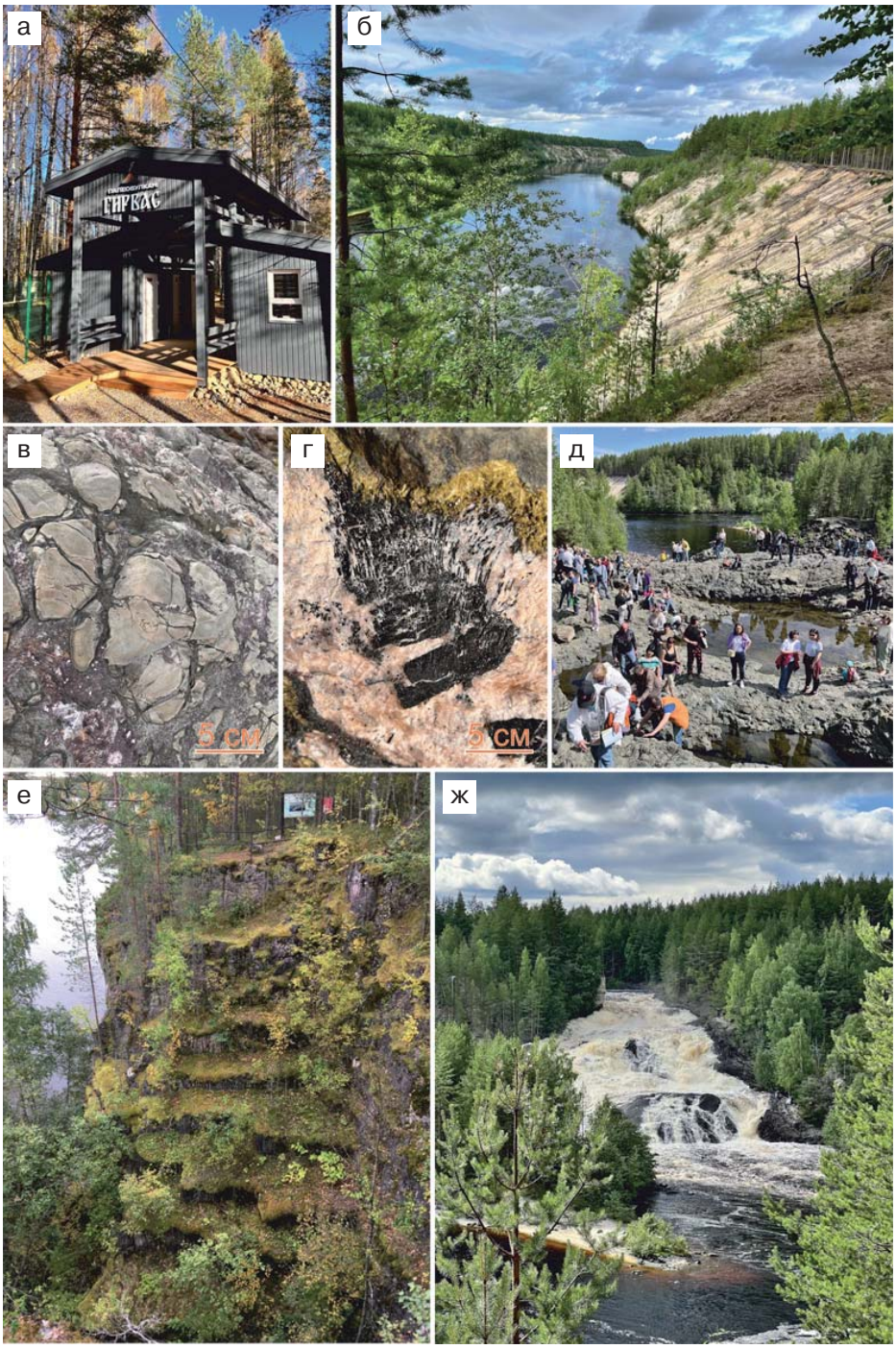


Рис. 4. Пример объектов геологического наследия Центрального кластера: а – входная зона геопарка «Палеовулкан Гирвас»; б – четвертичные отложения в р-не Пионерного канала (п. Гирвас); в – выходы лавобрекчии базальтов, геопарк «Палеовулкан Гирвас»; г – турмалин (шерл) – кальцит-эпидотовая минерализация гидротермальной полости в базальтовых лавах, геопарк «Палеовулкан Гирвас»; д – посетители геопарка «Палеовулкан Гирвас» во время праздника День вулкана, 11.06.2023; е – исторические разработки мраморов, вид со смотровой площадки, геопарк «Белая гора»; ж – антропогенный водопад Гирвас, спуск воды с плотины ГЭС, геопарка «Палеовулкан Гирвас»

Fig. 4. Examples of geological heritage sites of the Central cluster: a – entrance area of the “Girvas Paleovolcano Geopark”; б – Quaternary deposits in the area of the Pionerny Canal (Girvas settlement); в – outcrops of basalt lava breccia, “Girvas Paleovolcano Geopark”; г – tourmaline (scherl) – calcite-epidote mineralization in a hydrothermal cavity within basaltic lavas, “Girvas Paleovolcano Geopark”; д – visitors at the “Girvas Paleovolcano Geopark” during the “Volcano Day” festival, June 11, 2023; e – historical marble quarries, view from the observation deck, “Belaya Gora Geopark”; ж – anthropogenic Girvas waterfall, water discharge from the hydroelectric power plant dam, “Girvas Paleovolcano Geopark”

Дополнительную научную значимость кластеру придают строматолитовые комплексы озер Пялозера и Сундозера – свидетели древнейшей жизни на Земле (около 2 млрд лет), проявления озерных железных руд Сундозера, демонстрирующие процессы седиментации и рудогенеза в современных водоемах. Наличие современного горнодобывающего комплекса «Калиеволампи», производящего разработку сариолийских полимиктовых конгломератов на блочный камень, который начинает активно использоваться в архитектуре Санкт-Петербурга (отделка стен станции метро «Горный университет») и Москвы (пол в здании Ленинградского вокзала), потенциально может стать площадкой для геологической и технологической экспозиции, выполняя просветительские и профориентационные функции.

Особое место в кластере занимает гора Воттоваара (природный резерват, относимый к Водлозерскому национальному парку) – уникальный скальный массив с ярко выраженным денудационно-тектоническим рельефом, привлекающий огромное внимание как объект геотуризма.

Исторические мраморные разработки Белой горы (в настоящее время – развивающийся геопарк) вносят дополнительную горнопромышленную составляющую в Центральный кластер, а всемирно известный водопад Кивач с одноименным заповедником служит гидрологическим и природным эстетическим его акцентом.

Заонежский кластер (центр – п. Толвуя), расположенный на Заонежском п-ове, объединяет объекты геологического наследия, связанные с уникальными палеопротерозойскими высокоуглеродистыми породами – шунгитами, широко распространенными в пределах Онежской структуры (рис. 5). Шунгитовые породы возрастом около 2 млрд лет представляют собой палеонефти, не имеют прямых аналогов в мире и сконцентрированы преимущественно на территории Заонежского п-ова, в северной оконечности Онежской структуры. Ключевыми объектами кластера являются месторождения в пределах Толвуйской синклинали (р-н Шуньга, Зажогино, Лебещина), в составе кластера находится заброшенная шунгитовая штольня, расположенная на сухопутном пути к музею-заповеднику «Кижи», которая после инженерного укрепления может стать уникальным туристическим объектом и подземной научной лабораторией.

Природный ландшафт Заонежья отличается живописным сочетанием озерно-лесных массивов, изрезанной береговой линии Онежского озера и обнажений шунгитоносных пород, формирующих характерный черный оттенок скальных гряд, делая окружающую среду уникальной для региона.

Сочетание редких типов минерального сырья, эталонных геологических разрезов палеопротерозоя и аттрактивных природных ландшафтов придает Заонежскому кластеру высокую научную, образовательную и рекреационную значимость, открывая перспективы для развития промышленного, познавательного и экологического туризма, а также создания геопарка «Углерод» на базе шунгитовых разработок.

Северо-Западный кластер (центр – г. Костомукша) объединяет объекты геологического наследия, отражающие ключевые этапы формирования архейской коры Фенноскандинавского щита (рис. 6). Его основу составляют стратиграфические разрезы неоархейских зеленокаменных поясов, включая стратотипический разрез гимольской серии и шурловаарской свиты (2,8–2,7 млрд лет) с комплексом метавулканитов и осадочных пород.

Минералого-петрографические объекты геонаследия представлены выходами железистых кварцитов, магнезиальными гранитоидами (санукитоидами), щелочными и субщелочными интрузивными породами (включая лампроиты и кимберлиты), а также дайками долеритов, крупными жилами кварца и пегматитов. Среди рудных объектов выделяются золоторудное месторождение Таловейс и Костомукшская группа месторождений железистых кварцитов. Геоморфологический облик кластера формируют постледниковые холмисто-грядовые ландшафты.

В структуре кластера находится крупнейший в Карелии горнопромышленный комплекс, построенный для освоения Костомукшского железорудного месторождения, представленного полосчатыми железистыми кварцитами. А также два природных резервата – заповедник «Костомукшский» и национальный парк «Калевальский». Сочетание стратотипических разрезов, уникальных петрологических комплексов, действующего горнодобывающего производства и эталонных природных ландшафтов позволит выделить якорные объекты, обустроить новые точки притяжения для природного геотуризма. Перспективным было бы создание центра «Карельская железная руда» посвященного месторождению железистых кварцитов, истории их открытия и освоения. Все это придает кластеру высокую научную, образовательную и рекреационную ценность.



Рис. 5. Пример объектов геологического наследия Заонежского кластера: а – исторические горные выработки шунгитов с антропогенным водоемом (месторождение Зажогино); б – выходы высокоуглеродистых алевролитов (шунгитов); в – фрагмент шунгитовой штольни (п. Толвуя); г – столбчатая отдельность в высокоуглеродистых породах на контакте с интрузиями габбро-долеритов (р-н п. Толвуя); д – отработанный карьер шунгитов с зонами окисления первично пиритизированных пород (месторождение Зажогино); е – Гидрологический памятник природы «Царицын ключ» с участниками геологической экскурсии 01.07.21

Fig. 5. Examples of geological heritage sites of the Zaonega cluster: a – historical shungite mine with an artificial lake (Zazhogino deposit); б – outcrops of high-carbon siltstones (shungites); в – fragment of a shungite mine gallery (Tolvuya settlement); г – columnar jointing in high-carbon rocks at the contact with gabbro-dolerite intrusions (Tolvuya area); д – shungite quarry with oxidation zones of originally pyritized rocks (Zazhogino deposit); e – hydrological natural monument “Tsaritsyn Spring” with participants of a geological excursion, July 1, 2021

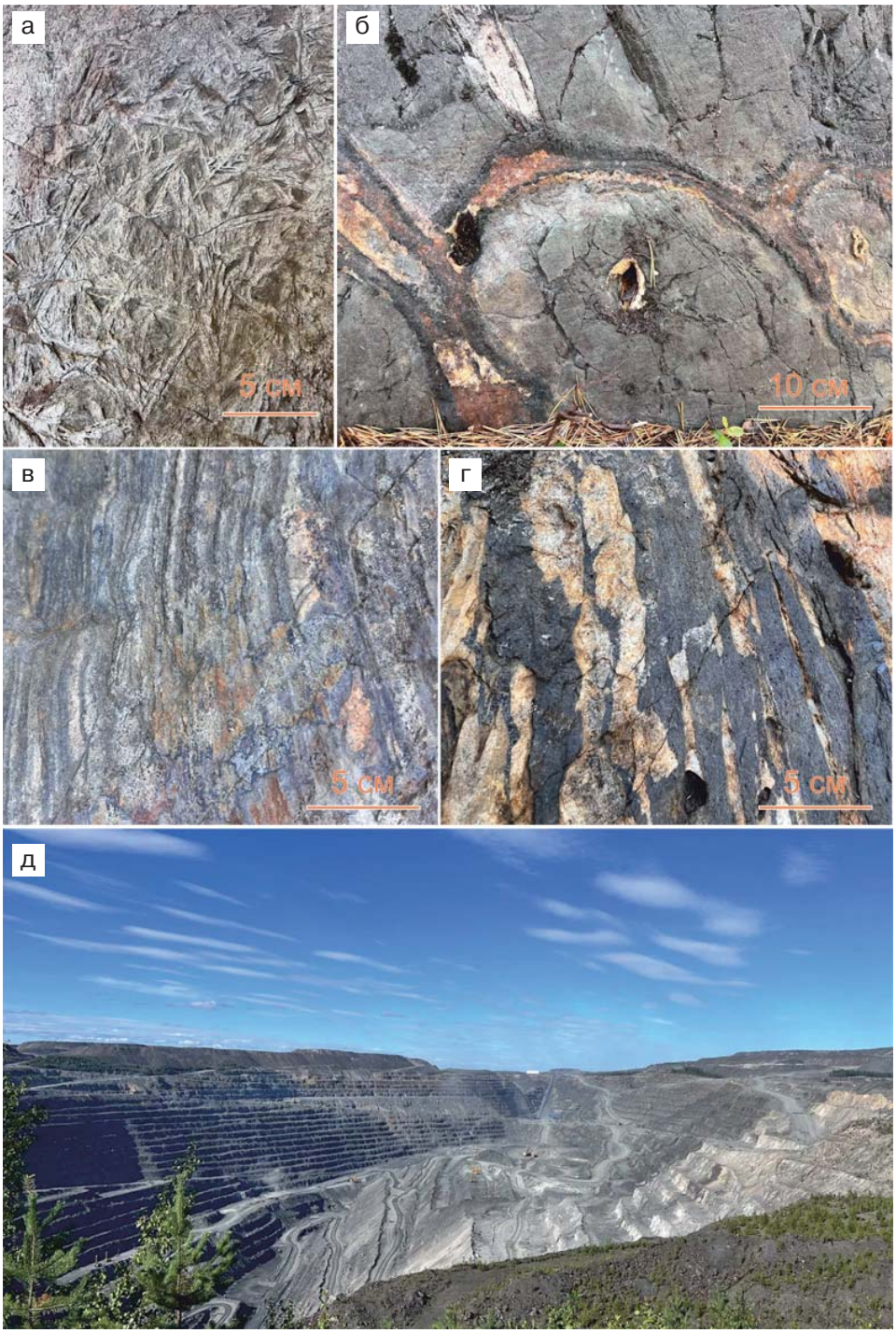


Рис. 6. Пример объектов геологического наследия Северо-Западного кластера. Уникальные петрографические памятники природы неоархейского Костомукшского зеленокаменного пояса (Костомукшский городской округ): а – редкие по сохранности и размерам спинифекс-структуры в неоархейских коматиитовых лавах; б – выходы океанических подушечных лав с хемогенным заполнением межподушечного пространства; в – тонкополосчатые железистые кварциты; г – скопления магнетитовых прослоев в железистых кварцитах; д – вид на главный карьер Костомукшского месторождения железных руд со смотровой площадки комбината «Карельский окатыш» 14.08.2025

Fig. 6. Examples of geological heritage sites of the North-Western cluster. Unique petrographic natural monuments of the Neoarchean Kostomuksha greenstone belt (Kostomuksha Urban Area): a – spinifex textures in Neoarchean komatiitic lavas, remarkable for their preservation and size; б – outcrops of oceanic pillow lavas with chemogenic infill of interpillow spaces; в – finely banded iron formation (iron quartzites); г – accumulations of magnetite interlayers in iron quartzites; д – view of the main open pit of the Kostomuksha iron ore deposit from the observation deck of the Karelsky Okatysh plant, August 14, 2025

Северный кластер (центр – п. Чупа) представляет собой уникальное сочетание минералогических, петрологических и ландшафтных объектов, сконцентрированных в пределах Карельского берега Белого моря (рис. 7). Основу кластера составляет Чупинское пегматитовое поле – классический объект мирового уровня, известный богатейшими проявлениями мусковитовых и керамических пегматитов. Здесь на протяжении более столетия велась добыча слюды-мусковита, полевых шпатов и кварца, а многочисленные карьеры и отвалы сохранились как эталонные объекты горнопромышленного наследия, представляющие интерес для минералогических коллекций и образовательных экскурсий. Интерес к этим природным объектам поддерживается благодаря активной работе выставочного пространства «Слюдариум» в г. Петрозаводске, раскрывающем историю отработки слюды из пегматитов Северной Карелии.

Особую научную ценность кластеру придают архейские эклогиты в районе с. Гридино – уникальные породы глубинного метаморфизма, являющиеся одним из древнейших свидетельств субдукционных процессов на Земле. Минералого-петрографический облик кластера дополняют проявления корунда на Хитострове, а также гранатовые месторождения, сформированные в метаморфических толщах.

Историко-геологические памятники кластера представлены Беломорскими петроглифами (р-н русла р. Выг), одним из крупнейших в Северной Европе скоплением наскальных изображений эпохи неолита, в 2021 году Беломорские петроглифы, наряду с Онежскими, включены в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Завершает картину уникальный прибрежный морской рельеф Белого моря, представляющий собой живописные скопления островов, скал, отмелей и заливов. Эти формы рельефа, сформированные ледниковой экзарацией и последующими тектоническими движениями, не только обладают высокой эстетической ценностью, но и служат естественными архивами палеогеографических обстановок, отражая историю послеледникового поднятия территории.

Таким образом, наличие уникальных минералогических, петрографических, историко-геологических и промышленных памятников природы в сочетании с живописными морскими шхерными ландшафтами делают Северо-Карельский кластер исключительно перспективным для развития научного, образовательного и экологического туризма в удаленных районах республики, однако, в перспективе актуально создание геопарка на базе пегматитовых разработок в Чупе и ландшафтных объектов Беломорского побережья.

Восточно-Карельский кластер (центр г. Пудож) объединяет объекты геологического и историко-культурного наследия, расположенные в восточной части Республики Карелия, на границе с Вологодской обл. (рис. 8). Территория кластера относится к фрагменту древнейшего блока архейской континентальной коры Фенноскандинавского щита, сложенного преимущественно гранитоидами, возраст которых составляет 3,4–2,7 млрд лет. Это один из наиболее древних сегментов Карельского кратона, имеющий ключевое значение для реконструкции процессов ранней коровой дифференциации и стабилизации континентальной литосферы.

Геоморфологический облик кластера определяют прибрежные ландшафты Онежского озера, среди которых особо выделяется Челмужская коса – уникальный памятник природы, представляющий собой ледниковую гряду, потенциально крупный и крайне востребованный природный парк-резерват, о чем свидетельствует ежегодное увеличивающееся количество туристов.

Долина р. Водлы служит естественным архивом палеосейсмической активности территории Карелии, здесь зафиксированы крупные палеосейсмодислокации, свидетельствующие о сильных землетрясениях в послеледниковое время.

Среди историко-культурных памятников природы выделяются петроглифы р-на Бесов Нос – крупнейшее на Онежском озере скопление наскальных изображений, выбитых на гладких, отполированных ледником гранитах и датируемых IV–III тыс. до н. э., включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО (2021).

Палеонтологическая составляющая кластера подкрепляется соседством с уникальным палеоихтиологическим местонахождением «Андомская гора» на границе с Вологодской обл., содержащем богатейший комплекс девонской фауны – один из лучших в России для реконструкции эволюции древнейших позвоночных.

Таким образом, в пределах кластера сочетаются редкие стратиграфические комплексы, разнообразные петрографические и геоморфологические объекты, уникальные палеонтологические памятники, а также живописные прибрежно-озерные ландшафты, – все это придает Восточно-Карельскому кластеру высокую научную и рекреационную значимость, а соседство с национальным парком «Водлозерский» открывает перспективы для развития образовательного и экологического туризма в восточных районах республики.

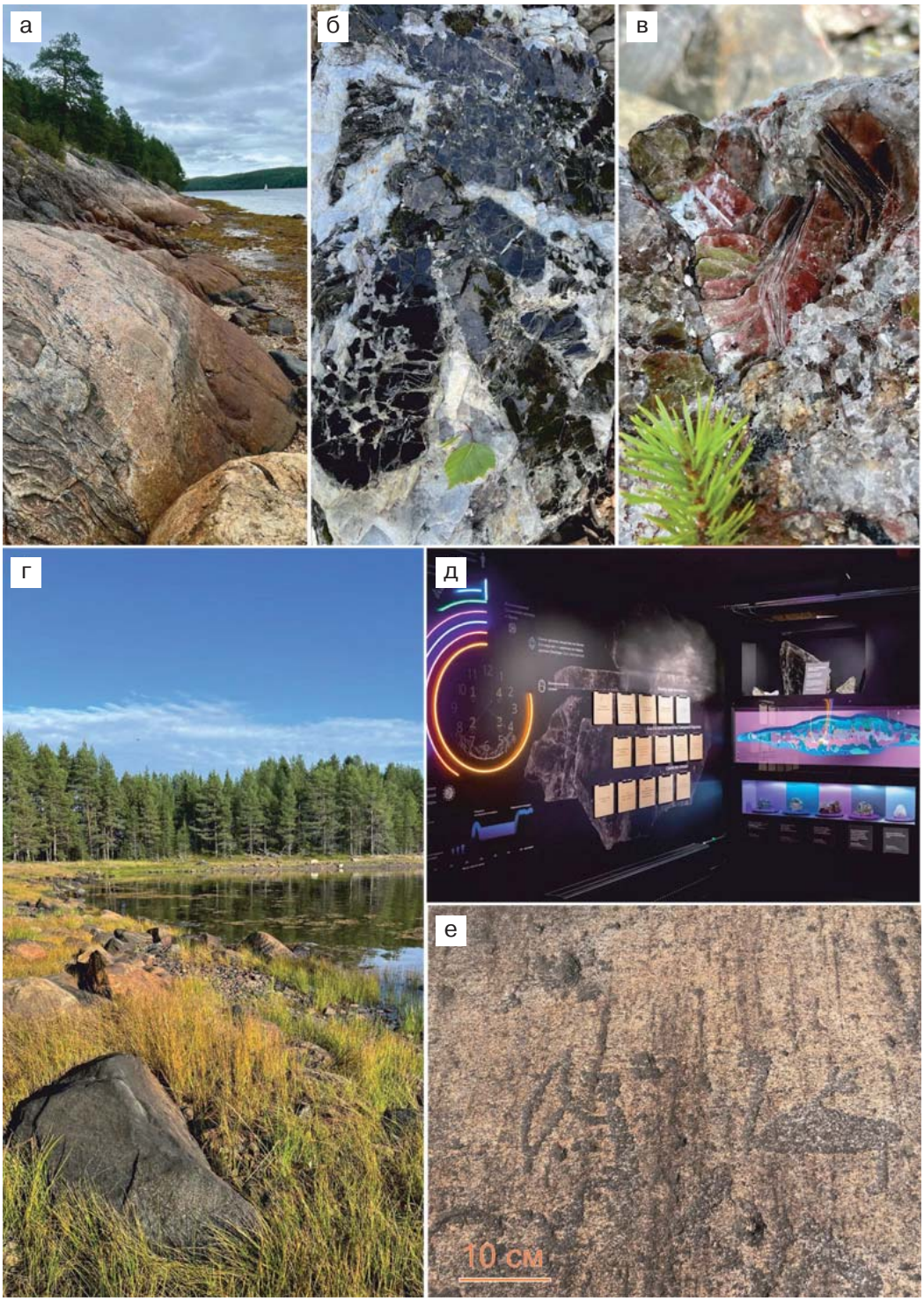


Рис. 7. Пример объектов геологического наследия Северного кластера. а – шхерный ландшафт Чупинской губы Кандалакшского залива Белого моря и выходы пегматитов в береговых обнажениях; б, в – слюдяные пегматиты на исторических ломках Малиновой Варакки (б – крупные кристаллы биотита; в – мусковита); г – прибрежный морской ландшафт р-н д. Нижняя Пулонга; д – музейно-выставочное пространство «Слюдариум» (г. Петрозаводск) и экспозиция, посвященная месторождениям Северо-Карельских слюдяных пегматитов; е – Беломорские петроглифы, р. Выг, р-н Залавруга

Fig. 7. Examples of geological heritage sites of the Northern cluster: a – skerry landscape of Chupa Bay, Kandalaksha Gulf of the White Sea, and pegmatite outcrops in coastal exposures; б, в – mica pegmatites at the historical quarries of Malinovaya Varakka (б – large biotite crystals; c – muscovite crystals); г – coastal marine landscape near the village of Nizhnyaya Pulonga; д – museum and exhibition space “Sljudarium” (Petrozavodsk) and the exhibition dedicated to the deposits of North Karelian mica pegmatites; e – White Sea petroglyphs, the Vyg River, Zalavruga area

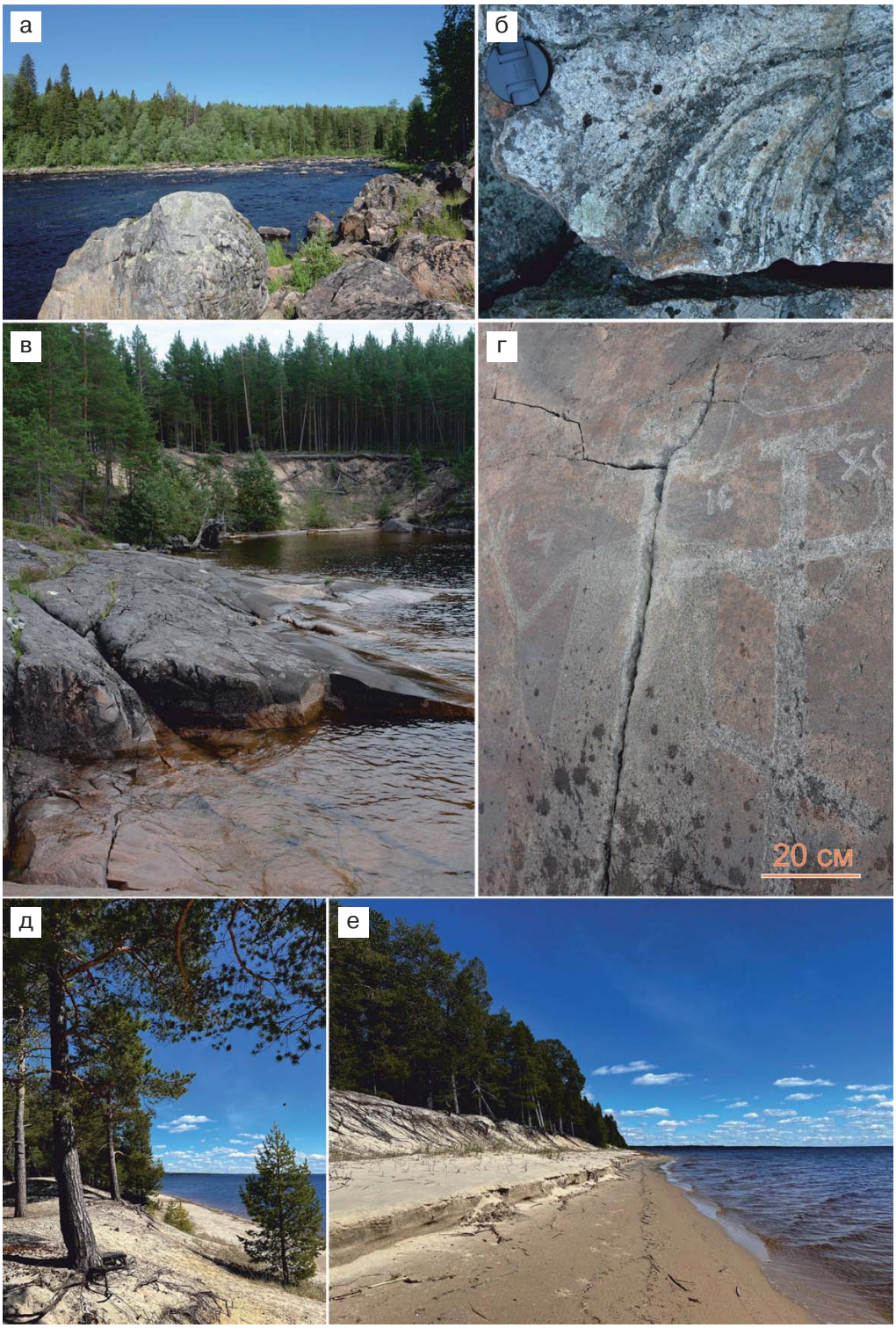


Рис. 8. Пример объектов геологического наследия Восточного кластера: а – живописные перекаты и пороги р. Водлы с выходами архейских гранитоидов и гнейсо-гранитов; б – архейские гнейсы Водлозерского блока (время образования ~ 3,2 млрд лет); в – береговой рельеф Онежского озера в р-не мыса Бесов Нос; г – группа петроглифов «Бес»; д, е – четвертичные песчаные отложения Челмужской косы – уникального природного и геологического памятника Медвежьегорского р-на Карелии

Fig. 8. Examples of geological heritage sites of the Eastern cluster: a – picturesque riffles and rapids of the Vodla River with outcrops of Archean granitoids and gneiss-granites; б – Archean gneisses of the Vodlozero Block (age of formation ~3.2 Ga); в – coastal topography of Lake Onega in the area of Cape Besov Nos; г – the “Demon” group of petroglyphs; д, е – Quaternary sandy deposits of the Chelmuzy Spit – a unique natural and geological monument of the Medvezhyegorsky District of Karelia



Рис. 9. Пример дизайн-решений перспективных геопарков Карелии (сгенерированных ИИ – модель Gemini 3) на основе геологических описаний территории: а – пространство выставочного центра горного парка «Астроблема Янисъярви» (Западный кластер); б – оформления подземного музейного пространства геопарка «Углерод», п. Толвуя (Заонежский кластер); в – экспозиция геопарка «Древние вулканы Карелии» (Петрозаводский кластер); г – пешеходные тропы и информационные стенды геопарка «Челмужская коса» (Восточный кластер); д – визит-информационный центр геопарка «Каменный бор» (Петрозаводский кластер), е – пешеходные маршруты в геопарке «Каменный бор» (Петрозаводский кластер)

Fig. 9. Examples of design solutions for prospective geoparks of Karelia (generated by AI – Gemini 3 model), based on geological descriptions of the territory: a – exhibition center space of the "Janisyarvi Astrobleme Mountain Park" (Western cluster); б – design of the underground museum space of the "Carbon Geopark", Tolvuya settlement (Zaonega cluster); в – exhibition of the "Ancient Volcanoes of Karelia" Geopark (Petrozavodsk cluster); г – pedestrian trails and information boards of the "Chelmuzy Spit" Geopark (Eastern cluster); д – visitor information center of the "Kamenny Bor" Geopark (Petrozavodsk cluster); e – pedestrian trail in the "Kamenny Bor" Geopark (Petrozavodsk cluster)

Резюмируя, следует подчеркнуть, что среди перспективных территорий для создания геопарков в Карелии, которые не будут конкурировать с Горным парком «Рускеала», а органично дополнят его, формируя единую сеть геотуристических объектов в республике, могут быть выделены следующие успешно реализуемые в настоящее время геопарки – «Палеовулкан Гирвас», «Белая гора» (Центральный кластер), «Вулкан Варио» (Петрозаводский кластер). В категории ожидающих инвестора объектов, сочетающих высокую научную значимость, аттрактивность и уже существующий туристский интерес – «Астроблема Янисъярви», «Уксинская озовая гряда» (Юго-Западный кластер), «Древние вулканы Карелии», «Каменный бор» (г. Петрозаводск), «Геопарк Шокша» (Петрозаводский кластер). Перспективными точками роста также могут выступать экспозиционные пространства горнодобывающего комплекса «Калиеволампи» (Центральный кластер), «Карельский окатыш» – геопарк «Карельская железная руда» (г. Костомукша), геопарки: «Чупинский минеральный рай», «Беломорская Ривьера» (Северный кластер) и «Челмужская коса» (Восточный кластер).

Уникальное природное наполнение данных территорий может стать основой для разработки с помощью искусственного интеллекта (модель Gemini 3) визуальных вариантов дизайн-решений экспозиционных пространств, внутренней инфраструктуры предлагаемых геопарков и их отдельных элементов (рис. 9). Такой подход позволит не только оценить эстетическую и функциональную гармонию планируемых объектов с природным ландшафтом, но и заблаговременно прогнозировать их рекреационную емкость.

Разработанные визуальные концепции, интегрирующие природные формы с современными архитектурными решениями, могут стать ключевыми точками притяжения будущих туристических потоков в Карелии, формируя новый узнаваемый облик северного геотуризма и создавая дополнительные стимулы для развития малых территорий и приграничных районов республики.

Формирование разветвленной сети геопарков на основе выделенных локаций позволит максимально диверсифицировать туристское предложение Карелии, сгладить сезонные колебания посещаемости, уменьшить антропогенную нагрузку на неподготовленные объекты и создать мультипликативный эффект для малого и среднего предпринимательства в удаленных районах. Использование геологического наследия как природного ресурса превращает его из объекта охраны в активный драйвер регионального развития, обеспечивая занятость местного населения, привлечение инвестиций и укрепление имиджа Республики Карелия как центра геотуризма международного уровня, что полностью соответствует целям устойчивого развития территории и ее долгосрочного экономического роста, а также усиливает геополитическое значение приграничных территорий.

Обсуждение

Геонаследие как новый тип природного ресурса. Анализ богатейшего разнообразия объектов геологического наследия Республики Карелия позволяет рассматривать данный тип объекта в качестве нового вида природного ресурса, обладающего высоким научным, рекреационным и экономическим потенциалом. Прямое сопоставление традиционных полезных ископаемых и объектов геонаследия делает возможным обосновать экономические перспективы последнего как нового «инновационного продукта».

Какими особенностями обладает геонаследие, выступающее в роли нового типа природного ресурса? В отличие от традиционного полезного ископаемого, где его экономическая ценность реализуется через физическое изъятие вещества, геологическое наследие генерирует доход через его сохранение. Чем лучше сохранен объект, тем выше его туристическая привлекательность – и тем дольше он приносит доход. Это полная инверсия логики сырьевой экономики.

Геонаследие не истощается при рачительном использовании. Напротив, научные исследования объекта, каждая экскурсионная программа, каждый информационный щит, каждый научно-популярный фильм увеличивают запас и объем знания, делая объект более понятным и привлекательным для следующего посетителя. Таким образом воспроизводится не природный ресурс, а смысл, который порода, минерал, ландшафт несут в себе.

При соблюдении нормативов рекреационной нагрузки (и обустройстве необходимой инфраструктуры – маршрутов, троп, настилов, информационных площадок и т. д.) объект может работать десятилетиями без деградации. Более того, появление новых научных исследований, публикаций и медийного внимания только повышает его рыночную стоимость как туристического бренда.

Сравнение традиционных полезных ископаемых с геологическим наследием как новым типом природного ресурса

Comparison of conventional mineral resources with geological heritage as a new type of natural resource

Критерий сравнения Comparison criterion	Традиционные полезные ископаемые Traditional mineral resources	Геологическое наследие как новый вид природного ресурса Geological heritage as a new type of natural resource
Определение Definition	Природные минеральные образования, которые могут быть эффективно извлечены для использования в промышленности (руды, горючие ископаемые, каменные строительные материалы) Natural mineral formations that can be effectively extracted for industrial use (ores, fossil fuels, stone construction materials)	Совокупность уникальных геологических объектов (обнажений, форм рельефа, разрезов), имеющих выдающуюся научную, культурную, эстетическую или образовательную ценность A collection of unique geological features (outcrops, landforms, geological sections) having outstanding scientific, cultural, aesthetic, or educational value
Примеры Examples	Месторождения железных и цветных руд, алмазов, золота, строительного камня Deposits of iron and non-ferrous ores, diamonds, gold, and building stone	Геологические парки, стратотипические разрезы, уникальные формы рельефа (каньоны, пещеры), местонахождения окаменелостей, минералогические музеи Geological parks, stratotype sections, unique landforms (canyons, caves), fossil sites, mineralogical museums
Основная ценность Primary value	Материально-сырьевая ценность как основа для промышленного производства и энергетики Value as a source of raw materials for industrial production and energy generation	Нематериальная (информационная) ценность заключается в научной информации об истории Земли, климате, эволюции жизни, а также в эстетической и рекреационной привлекательности The intangible (informational) value lies in scientific information regarding the Earth's history, climate, and the evolution of life, as well as in aesthetic and recreational appeal
Способ использования Use	Промышленная добыча (извлечение) сопровождается выемкой породы, дроблением, обогащением. Процесс, как правило, приводит к необратимому изменению ландшафта и уничтожению геологического объекта, и антропогенному загрязнению территории Industrial extraction involves rock excavation, crushing, and beneficiation. As a rule, the process results in irreversible landscape alteration, the geological feature destruction, and man-induced contamination of the area	Неиндустриальное использование (сохранение и предоставление доступа). Используется в сфере геотуризма, образования (полевые практики), научных исследований и рекреации Non-industrial use (preservation and access). It is used in the fields of geotourism, education (fieldwork), research, and recreation
Возобновляемость ресурса Renewability of the resource	Невозобновляемый ресурс, запасы конечны и расходуются в процессе добычи A non-renewable resource; reserves are finite and depleted during extraction	Потенциально возобновляемый (при рациональном использовании). Ресурс не «расходуется» при посещении или изучении. При правильном управлении и охране может приносить пользу неограниченное время Potentially renewable (under condition of rational use). The resource is not "consumed" when visited or studied. With proper management and protection, it can provide benefits indefinitely
Сохранность объекта Preservation	Не требует сохранения в естественном виде. Цель – максимально полное извлечение. Объект добычи перестает существовать как геологическое тело Preservation in its natural state is not required. The goal is maximum extraction. The object of extraction ceases to exist as a geological body	Нуждающимся в государственной охране (*in situ*) или в критическом случае (*ex situ*) For those requiring state protection (in situ) or in critical cases (*ex situ*)
Основные виды использования Main uses	Горнодобывающая промышленность, металлургия, энергетика, строительство Mining industry, metallurgy, energy sector, construction	Геотуризм, музейное дело, наука (геология, палеонтология и др.), образование, сфера рекреации и услуг Geotourism, museum studies, science (geology, paleontology, etc.), education, recreation and services

Окончание табл.
Table (continued)

Критерий сравнения Comparison criterion	Традиционные полезные ископаемые Traditional mineral resources	Геологическое наследие как новый вид природного ресурса Geological heritage as a new type of natural resource
Экономическая модель	Основана на добыче и продаже сырья как товара. Прибыль напрямую зависит от объема добычи и мировых цен на сырье	Основана на предоставлении услуг и впечатлений (экскурсий, туров, образовательных программ). Прибыль зависит от туристического потока и развития инфраструктуры объекта
Economic model	It is based on the extraction and sale of raw materials as commodities. Profit depends directly on extraction volumes and global commodity prices	It is based on providing services and experience (excursions, tours, educational programs). Profit depends on tourist traffic and the development of the site's infrastructure
Потенциальные конфликты	Добыча полезных ископаемых может привести к уничтожению объектов геологического наследия, местонахождений или уникальных обнажений	Сохранение и охрана геологического наследия могут ограничивать или запрещать горнодобывающую деятельность на объекте
Potential conflicts	Mineral extraction can lead to the destruction of geological heritage sites, fossil localities, or unique outcrops	The preservation and protection of geological heritage may restrict or prohibit mining activities at the site

Экономический доход от традиционной добычи полезных ископаемых в большем объеме концентрируется в добывающих компаниях и федеральном бюджете, оставляя местному сообществу экологические издержки. Напротив, доход от геотуризма распределяется в локальном малом бизнесе – туристических компаниях, местах размещения и питания, транспортных компаниях, сувенирных мастерских, но и научных и образовательных организациях. Именно этот эффект делает геологическое наследие важным инструментом развития удаленных территорий, малых городов и сельских поселений.

Конкурентная составляющая геонаследия зависит в первую очередь от результатов научных исследований. Так, объект, чья геологическая природа изучена давно, не подвергалась современному изучению, теряет интерес потенциальных посетителей. Объект, который продолжает изучаться, на котором проводятся наблюдения, мониторинг, с появлением новых знаний – датировок, новых моделей образования, новых интерпретаций, формирует повод для возвращения. Это превращает научные исследования из затратной статьи в инструмент удержания клиентской лояльности.

И, наконец, важнейшее свойство природного геонаследия – имиджевая капитализация. Регион, осознавший и позиционирующий себя как территория богатой геологической истории (отражающей эволюцию планеты, иллюстрирующей миллиарды лет ее развития), науки, просвещения, познавательного активного туризма получает безграничный брендовый ресурс. Например, бренд «Карелия – край древних вулканов и ледников» работает в настоящее время более привлекательно, чем «Карелия – край лесов и озер», заранее выделяя регион среди конкурентов на туристическом рынке Северо-Запада.

Таким образом, геологическое природное наследие – это значимый экономический актив, который обладает следующими ключевыми свойствами, выгодно отличающими его от традиционных природных минерально-сырьевых ресурсов: неистощимостью, воспроизводимостью и высоким локальным экономическим мультипликаторным эффектом. Если традиционное полезное ископаемое – это запас, который уменьшается по мере извлечения, то природное геологическое наследие – это поток услуг, интенсивность которых зависит не от объема недр, а от качества управления научным знанием и информацией. В перспективе данный ресурс становится дороже по мере его использования, что аномально для сырьевой экономики.

Опыт Горного парка «Рускеала» как успешная модель использования горно-индустриального наследия. В Республике Карелия существует пример успешной трансформации объекта геологического и горнопромышленного наследия в многофункциональный туристско-рекреационный центр. Горный парк «Рускеала» расположен в Сортавальском р-не Республики Карелия, на месте месторождения мрамора, в настоящее время выработанного объемными карьерами и штольнями. Разработки мраморов на месторождении активно велись с XVIII по XIX век, блоки мрамора использовались при строительстве Санкт-Петербурга, в частности, Исаакиевского, Казанского соборов, Мраморного и Зимнего дворцов. К концу XX века

разработка месторождения была прекращена, карьеры оказались заброшены и заполнены грунтовыми водами, образовав живописные мраморные каньоны с изумрудными озерами. В 1990-х гг. И. В. Борисовым было разработано научное обоснование рекреационного потенциала объекта [Mining road…, 2014], а в 1998 году Рускеала была внесена в список культурно-исторического наследия России как памятник горного дела. Сочетание научно-исследовательского подхода с предпринимательской инициативой А. Б. Артемьева, привлекшего необходимое финансирование, привело к открытию парка в 2005 году. За два десятилетия функционирования парк прошел путь от заброшенного карьера до одной из главных достопримечательностей Карелии. Были восстановлены исторические шахты, открыты подземные экскурсионные маршруты, обустроены видовые площадки и туристические тропы, запущен ретропоезд из г. Сортавалы. Подземный маршрут, оборудованный в 2017 году, по своим эстетическим и познавательным характеристикам признан одним из лучших в Европе. Ежегодная посещаемость парка превышает 500 тыс. человек [по данным портала http://rk.karelia.ru]. Горный парк служит не только туристическим объектом, но и научной площадкой для геологических, гидрогеохимических и экологических исследований. Бизнес-кейс «Рускеалы» демонстрирует, что объекты геологического и индустриального наследия, утратившие сырьевую ценность, могут обретать новую экономическую значимость в сфере геотуризма, образования и рекреации. В таких динамично развивающихся условиях Республика Карелия, обладающая уникальными природными объектами и рядом территорий, позиционируемых как будущие геологические парки, может стать лидером в России по темпам развития геологического природного туризма в случае постоянной поддержки правительства и бизнеса.

В работе по вовлечению объектов геологического наследия в инфраструктуру туризма и региональную экономику есть несколько ключевых моментов, которые должны планомерно реализовываться:

Инвентаризация объектов геонаследия. Прежде чем объект станет туристическим, он должен быть признан «геологическим наследием» на научном уровне. Для этого требуется полевое описание объекта, его стратиграфическая и петрографическая характеристика, определение научной значимости (уникальности, репрезентативности, сохранности), присвоение статуса в рамках регионального кадастра геологических памятников (например, регионального или мирового значения), подготовка публикаций в специализированных изданиях и каталогах (по аналогии с базами данных международного проекта «ProGEO»).

Оценка туристического потенциала объектов геонаследия. Для вовлечения геообъектов в рекреационное использование необходимо выполнить своеобразную трансформацию их научной ценности в область туристической привлекательности – за счет эстетики, уникальности, значимости объектов и сопутствующего научно-просветительского контента.

Определение возможного юридического статуса объектов геонаследия. Для объектов геонаследия целесообразно выбрать режим использования и охраны, для предотвращения физической деградации, что подразумевает определение охранных зон и объема допустимых антропогенных нагрузок. Особо ценным геообъектам может присваиваться статус особо охраняемой природной территории (ООПТ) регионального значения, с разработкой паспорта объекта. При этом следует понимать, что чем выше охранный статус, тем сложнее коммерческое использование объектов геонаследия. Оптимальный баланс – это статус регионального геологического памятника с разрешенным экскурсионным посещением.

Классификация объектов геонаследия по их привлекательности. В настоящее время классификация объектов геологического наследия по их привлекательности не применяется в геотуризме. Для систематики объектов можно предложить использование единой иерархии геонаследия, включающей, например, шесть уровней, дифференцированных как по эстетическому эффекту, так и по времени, необходимому для знакомства с объектом: «ГеоТочка» – красивый природный ландшафт, вид, небольшой объект, требующий короткого посещения (до 5 мин.), имеющий информационный щит и парковку; «ГеоПункт» – эффектный объект или серия объектов, требующих большее время для осмотра (до 20 мин.) и имеющих минимальное информационное обустройство; «ГеоМаршрут» – серия природных объектов, объединенных обустроенным маршрутом, с информационным сопровождением, протяженностью до 2 км, требующим время осмотра до двух часов, имеющим расширенное обустройство, но без стационарной инфраструктуры; «ГеоПарк» – уникальный по познавательным свойствам и привлекательности крупный природный объект, предусматривающий длительное посещение (возможно, даже многодневное). Такие объекты должны иметь полноценные стационарные комплексы с кассами, кафе, местами

размещения, сетью маршрутов и обслуживаться гидами; «ГеоЦентры» – якорные природные визит-информационные центры (расположенные в крупных близлежащих поселениях) с информацией и объектами *ex situ*, необходимые для координирования потока туристов; «ГеоКластеры» – региональные сети из 5–15 объектов разного масштаба, объединенные общей тематикой и брендом, что позволяет формировать комплексные туристские продукты и повышать узнаваемость территорий. Предложенная градация создает четкий алгоритм для планирования геотуристической деятельности, позволяет экспрессно оценить рекреационную емкость объектов природного наследия и выйти на диверсификацию туристических потоков.

Инженерная и инфраструктурная подготовка объектов. Подразумевает превращение голой скалы в объект, доступный для массового посещения, что может включать: расчистку подъездной дороги, обустройство парковки, маркировку объектов, размещение навигационных указателей, информационных щитов, создание смотровых площадок и т. д., при соблюдении мер безопасности для посетителей.

Создание научно-популярного контента для объектов наследия. Это самый важный этап для превращения геологического объекта в рекреационный. Турист чаще всего приезжает не за голой информацией («это гранит возрастом 2,85 млрд лет»), а за историей, которую этот «камень» может рассказать. В этой связи необходима разработка: экскурсионного (научно выверенного, но более популярного) текстового контента, инфографики, аудиосопровождения и тематического сторителлинга (не просто древний вулкан, а история о древних вулканах и их связи с развитием планеты, катастрофическими явлениями, формированием полезных минеральных ресурсов и, конечно, жизни на планете, и в итоге, человеческого общества).

Геологические объекты выступают в роли естественной летописи Земли, наглядно раскрывают взаимосвязь глобальных и региональных событий в ее истории. Они позволяют проследить логику планетарной эволюции – от формирования древнейшей коры до современных ландшафтов, – и тем самым осознать как временную глубину, так и уязвимость природных систем. Такое понимание формирует не только научную картину мира, но и экологическое мировоззрение, в котором сохранение геологического наследия и природой среды становится залогом ответственного отношения к будущему планеты.

Подготовка кадров. Важнейшим условием устойчивого развития геотуризма является профессиональная подготовка гидов, которые должны владеть не только методикой геологического показа, но и принципами этического взаимодействия с объектами геонаследия. В зависимости от научной и охранной ценности памятников природы могут вводиться различные ограничения: от запрета на отбор проб и коллекционирование до полного исключения физического контакта. Решение этой задачи на уровне геопарков требует формирования системы аккредитации гидов с дифференцированным доступом к объектам разных категорий.

Создание туристических кластеров. Отдельные объекты уровня «ГеоТочка» – «ГеоПункт» редко работают «звездой-одиночкой». Широкое разнообразие природных объектов в Республике Карелия в перспективе позволяет объединять объекты в тематические маршруты, создавать крупные природные «ГеоПарки», а уже на их основе «ГеоКластеры».

Продвижение и маркетинг. Для максимального вовлечения в рекреацию объектов геонаследия потребуется сделать так, чтобы потенциальный турист узнал об объекте и захотел его посетить. В этом существенную помощь могут оказать агрегаторы достопримечательностей (Яндекс.Карты, 2ГИС и др.), партнерство с региональными туроператорами, публикации в научно-популярных изданиях, интернет-сообществах.

Мониторинг и адаптивное управление. Туристическая нагрузка при бесконтрольной активности потенциально приведет к быстрой деградации объекта. Для предотвращения любых негативных факторов необходимо осуществлять мониторинг состояния геообъектов, окружающего ландшафта, износа инфраструктуры, удовлетворенности туристов и экономических показателей. Существует ряд объектов геонаследия, принципиально не пригодных для массового туризма по следующим причинам: научная уникальность требует полной консервации, техногенная опасность (пример – неустойчивые борта карьеров, затопленные штольни), удаленность (затраты на обустройство инфраструктуры потенциально не окупятся). Для подобных объектов оптимальная форма их показа – ограниченный доступ для научных групп и расширенный показ в виде виртуального тура, включающего 3D-модель объекта.

Таким образом, можно кратко сформулировать путь продвижения геологического объекта для включения его в инфраструктуру туризма. Начиная с научного изучения объекта (этап 1), оценки его туристического

потенциала (этап 2), определения юридического статуса (этап 3), инфраструктурного обустройства (этап 4). Ключевым моментом станет создание научно-популярного сопроводительного контента (этап 5) и подготовка квалифицированных гидов (этап 6), без которых даже эффектный объект останется немым. После включения в план региональных маршрутов (этап 7) и запуска продвижения (этап 8) потребуется постоянный мониторинг объекта (этап 9), чтобы турпоток не уничтожил то, ради чего туристы приезжают на объект.

Заключение

В последние годы природно-ориентированный туризм в России демонстрирует устойчивый рост, особенно в сегменте путешествий в северные и арктические регионы. Карелия выступает одним из главных бенефициаров этого тренда: спрос на поездки в Сортавалу (Горный парк «Рускеала») увеличился на 80 %, в Петрозаводск – на 30 %. По итогам 2025 года Сортавальский р-н принял более 2 млн туристов, а их расходы превысили 5 млрд рублей. При населении района около 24 тыс. человек только в июле 2025 года округ посетили 400 тыс. гостей, что демонстрирует колоссальную нагрузку на инфраструктуру и беспрецедентные экономические возможности [Тишкина, 2026].

Геологическое наследие Карелии представляет собой значительный, но до сих пор недостаточно используемый ресурс устойчивого развития. Успешный опыт Горного парка «Рускеала» наглядно иллюстрирует возможность эффективной коммерциализации геологических объектов при условии интеграции научного, предпринимательского и общественного потенциалов. Для перехода от точечных проектов к системной модели необходима сеть природно-рекреационных объектов различного ранга – от локальных геоточек до крупных геопарков и визит-информационных центров как в г. Петрозаводске, так и в районах республики. Критически важным представляется трансформация геологического наследия в элемент территориального брендинга, что сформирует новый имидж Карелии не как сырьевого региона или места дикого отдыха, а как территории знаний, открытий и просвещения – музея ранней Земли под открытым небом, где геология становится языком региональной идентичности и основой опережающего развития.

Перспективы развития геотуризма неразрывно связаны с внедрением цифровых технологий. Высокоточное 3D-сканирование, создание цифровых двойников, а также использование виртуальной и дополненной реальности открывают возможности для иммерсивных образовательных продуктов, доступных глобальной аудитории. Геопарки могут служить платформами для междисциплинарных кампусов, объединяющих геологию, палеонтологию, географию, экологию, биологию, климатологию, информационные технологии и промышленный дизайн, а также для развития фестивальной экономики и оздоровительных программ на основе уникальных природных минеральных ресурсов республики. Геологическое наследие региона может стать естественной основой для локальных креативных индустрий.

Высказанные идеи согласуются со «Стратегией социально-экономического развития Республики Карелия до 2030 года» и направлены на вовлечение индустриального и природного наследия в хозяйственный оборот, стимулирование самореализации местного населения, укрепление региональной идентичности, повышение качества жизни в отдаленных и приграничных районах, а также снижение сезонности туризма. В более широком контексте развитие геотуризма выступает инструментом геополитической устойчивости и «мягкого присутствия» России в северо-западном приграничье, а регион, первым реализующий комплексную модель управления геологическим наследием как экономическим активом воспроизводимого типа, приобретает не отдельные центры рекреационного притяжения, а системную основу для долгосрочного устойчивого развития, основанную на непрерывном воспроизводстве научного, образовательного и культурного потенциала территории.

При подготовке материала учитывался многолетний опыт проведения международных и всероссийских геологических экскурсий, мероприятий по популяризации геологических знаний в Республике Карелия, позволяющих оценить интерес жителей республики к различным объектам геологического наследия. В частности, выставок «Семь камней Карелии, которые должен знать каждый» (https://library.karelia.ru/media/sem_kamnei/index.html), «Карелия – история в камне» (https://library.karelia.ru/news/Geologicheskoe_nasledie_Karelii__V_Nacional_noj_biblioteke_otkrylas__vystavka__Karelija__Istorija_v_kamne_/), проводимых в 2022–2026 гг. Институтом геологии КарНЦ РАН при активном участии представителей Национальной библиотеки РК – К. А. Михайловой, директора библиотеки М. В. Никишиной, а также руководителя музея Геологии

докембрия О. Б. Лаврова, к. г.-м. н. П. В. Медведева, к. г.-м. н. Н. С. Нестеровой, к. г.-м. н. О. А. Максимова, к. г.-м. н. С. В. Егоровой. Всем вовлеченным в данную работу коллегам автор выражает глубокую признательность.

Особую благодарность автор выражает д. г.-м. н. А. И. Слабунову (ФИЦ КарНЦ РАН) за многогранное обсуждение идей концепции и ценные советы, Д. Котову (директору проектной группы «Территория Север») за обсуждение трендов геотуризма, потенциальных перспективных объектов геологического интереса, высказанные предложения по визуальному языку планируемых геопарков, инфраструктурных и экспозиционных решений, а также П. Ю. Плечову (директору Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана, г. Москва) за многолетнюю поддержку авторских инициатив и консультации.

Бесценный практический опыт при реализации идеи по созданию геопарков был получен в ходе работы с бизнес-партнерами, а именно, О. А. Головко (Горный парк «Палеовулкан Гирвас»), Д. А. Вайтусом («Всесезонный центр активного отдыха Ялгора»), энтузиазм которых содействует активному вовлечению объектов геонаследия в рекреацию и спортивный туризм.

Литература

Атлас Республики Карелия / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», Институт водных проблем Севера, Всероссийская общественная организация «Русское географическое общество»; ред. колл.: Н. Н. Филатов (председатель) и [др.]. Петрозаводск: Версо, 2021. 48 с.

Балтыбаев Ш. К. Свекофеннский ороген Фенноскандинавского щита: вещественно-изотопная зональность и ее тектоническая интерпретация // Геотектоника. 2013. № 6. С. 44–59. doi: 10.7868/S0016853X13060027

Геологическое наследие Карелии. Путеводитель историко-геологических экскурсий по городу Петрозаводску и Центральной Карелии / Под ред. Л. В. Кулешевич, С. А. Светова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 207 с. doi: 10.17076/geoguide2021

Геологическое наследие Республики Коми (Россия) / Сост. П. П. Юхтанов. Сыктывкар: ИГ КомиНЦ Уро РАН, 2008. 350 с.

Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 223 с.

Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А. Геологическая карта юго-восточной Фенноскандии М-ба 1:750 000: новые подходы к составлению // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 3–41. doi: 10.17076/geo444

Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.

Лапо А. В., Давыдов И. В., Пашкевич Н. Г. Методические основы изучения геологических памятников природы России // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1993. Т. 1, № 5. С. 75–83.

Лапо А. В., Давыдов В. И., Пашкевич Н. Г., Петров В. В., Вдовец М. С. Геологические объекты всемирного значения европейской части России // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1997. Т. 5, № 3. С. 92–101.

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

Лобач-Жученко С. Б., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Левский Л. К., Коваленко А. В. Архейские террейны Карелии; их геологическое и изотопно-геохимическое обоснование // Геотектоника. 2000. № 6. С. 26–42.

Макарихин В. В., Медведев П. В., Рычанчик Д. В. Геологические памятники Карелии. Петрозаводск: Карелия, 2007. 192 с.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Светов С. А. Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 230 с.

Слабунов А. И., Лобач-Жученко С. Б., Бибикова Е. В., Балаганский В. В., Сорьонен-Вард П., Володичев О. И., Щипанский А. А., Светов С. А., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Степанов В. С. Архей Балтийского щита: геология, геохронология, геодинамические обстановки // Геотектоника. 2006. № 6. С. 3–32.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.

Тишкина А. Туристы за год потратили более 5 млрд руб. в Сортавальском округе Карелии // РБК Карелия. 2026. 24 марта. URL: https://karelia.rbc.ru/karelia/24/03/2026/69c242f59a79474a5501e2ac (дата обращения: 30.09.2026).

Центральная Карелия. Т. 3. Планета Земля глазами геолога. Геологический путеводитель / Ред. В. В. Ериклинцев. М.: Фонд просветительской деятельности «Геологический путеводитель», 2025. 296 с.

Щипанский А. А. Субдукционные и мантийно-плюмовые процессы в геодинамике формирования архейских зеленокаменных поясов. М.: ООО ЛКИ, 2008. 560 с.

Южная Карелия Т. 2. Планета Земля глазами геолога. Геологический путеводитель / Ред. В. В. Ериклинцев. М.: Фонд просветительской деятельности «Геологический путеводитель», 2024. 236 с.

Actes du Premier Symposium International sur la Protection du Patrimoine Geologique // Mém. Soc. géol. France. N.S. 1994. no. 165. 274 p.

Brilha J. Geoheritage and geoparks / Eds. E. Reynard, J. Brilha. Geoheritage. Elsevier. Amsterdam, 2018. P. 323–336.

Chen A., Lu Y., Ng Y.C. The Principles of Geotourism // Springer Berlin Heidelberg. 2015. 264 p. doi: 10.1007/978-3-662-46697-1

Cleal C.J., Thomas B.A., Bevins R.E., Wimbledon W.A. GEOSITES – an international geoconservation initiative // Geology Today. 2001. no. 15(2). P. 64–68. doi: 10.1046/j.1365-2451.1999.1502006.x

Cowie J.W., Wimbledon W.A. The World Heritage List and its relevance to geology / Eds.: D. O'Halloran, C. Green, M. Harley, M. Stanley, J. Knill. Geological and Landscape Conservation. London: Geol. Society, 1994. P. 71–73.

Digne-les-Bains declaration: Declaration of the Rights of the Memory of the Earth. (1991). ProGEO. URL: http://www.progeo.ngo/downloads/digne_declaration.pdf

Ferdowsi S., Németh K. Geoparks Management in Tourism Destinations: Integrating Development and Conservation // Sustainable Development. 2026. 34, no. S 2. P. 1034–1056. doi: 10.1002/sd.70334

Geoheritage: assessment, protection and management / Eds.: E. Reynard, J. Brilha, 2nd edition. Elsevier, 2025. doi: 10.1016/C2023-0-50721-9

Gordon J.E. Geoconservation principles and protected area management // International Journal of Geoheritage and Parks 7. 2019. P. 199–210.

Gray M. Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature // John Wiley & Sons Ltd. 2004. P. 450.

Henriques M.H., Brilha J. UNESCO Global Geoparks: a strategy towards global understanding and sustainability. 2017. Episodes 40. P. 349–355. doi: 10.18814/epiiugs/2017/v40i4/017036

Jones C. History of geoparks. 2008. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 300. P. 273–277. doi: 10.1144/sp300.21

Mining Road. Ed. V. A. Shekov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. 320 p.

Nance R.D. The supercontinent cycle and Earth's long-term climate. Annals of the New York Academy of Sciences, 1515(1). P. 33–49. doi: 10.1111/nyas.14849

Nance R.D., Murphy J.B., Santosh M. The supercontinent cycle: A retrospective essay // Gondwana Research. 2014. Vol. 25, Issue 1, January 2014. P. 4–29. doi: 10.1016/j.gr.2012.12.026

Slabunov A.I., Balagansky V.V., Shchipansky A.A. Mesoarchean to Paleoproterozoic Crustal Evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the Tectonic Setting of Eclogites. Russ. Geol. Geophys. 2021. Vol. 62(5). P. 525–546. doi: 10.2113/RGG20204266

Zhao G., Cawood P.A. Wilde S.A., Sun M. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent // Earth-Science Reviews. 2002. Vol. 59, Issues 1–4. November 2002. P. 125–162. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00073-9

References

Actes du Premier Symposium International sur la Protection du Patrimoine Geologique. *Mém. Soc. Géol*. France. N.S. 1994. No. 165. 274 p.

Baltybaev Sh. K. Svecofennian orogen of the Fennoscandian Shield: compositional and isotopic zoning and its tectonic interpretation. *Geotektonika = Geotectonics*. 2013;47(6):452–467. doi: 10.1134/S0016852113060021

Brilha J. Geoheritage and geoparks. In: Reynard E., Brilha J. (Eds.), Geoheritage. Amsterdam: Elsevier; 2018. P. 323–336.

Central Karelia. Vol. 3. Planet Earth through the eyes of a geologist. Geological Guidebook. Eriklintsev V.V. (ed.). Moscow: Fund for Educational Activities "Geological Guidebook"; 2025. 296 p. (In Russ.)

Chen A., Lu Y., Ng Y.C. The Principles of geotourism. Springer Berlin Heidelberg, 2015, 264 p. doi: 10.1007/978-3-662-46697-1

Cleal C.J., Thomas B.A., Bevins R.E., Wimbledon W.A. GEOSITES – an international geoconservation initiative. *Geology Today*. 2001;15(2):64–68. doi: 10.1046/j.1365-2451.1999.1502006.x

Cowie J.W., Wimbledon W.A. The World Heritage List and its relevance to geology. O'Halloran D., Green C., Harley M., Stanley M., Knill J. (eds). Geological and Landscape Conservation. London: Geol. Society; 1994. P. 71–73.

Digne-les-Bains declaration: Declaration of the Rights of the Memory of the Earth. (1991). ProGEO. URL: http://www.progeo.ngo/downloads/digne_declaration.pdf

Eriklintsev V.V. (ed.). Southern Karelia. Vol. 2. Planet Earth through the eyes of a geologist. Geological Guidebook. Moscow: Fund for Educational Activities "Geological Guidebook"; 2024. 236 p. (In Russ.)

Ferdowsi S., Németh K. Geoparks management in tourism destinations: integrating development and conservation. *Sustainable Development*. 2026;34(S2): 1034–1056. doi: 10.1002/sd.70334

Filatov N.N. (ed.). Atlas of the Republic of Karelia. Petrozavodsk: Verso; 2021. 48 p. (In Russ.)

Glushanin L.V., Sharov N.V., Shchiptsov V.V. (eds.). The Onega Paleoproterozoic structure (geology, tectonics, deep structure and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 431 p. (In Russ.)

Gordon J.E. Geoconservation principles and protected area management. *Int. J. Geoheritage Parks*. 2019;7:199–210.

Gray M. Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature. John Wiley & Sons Ltd.; 2004. 450 p.

Henriques M.H., Brilha J. UNESCO Global Geoparks: a strategy towards global understanding and sustainability. 2017. Episodes 40, 349–355. doi: 10.18814/epiiugs/2017/v40i4/017036

Jones C. History of geoparks. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ*. 2008;300:273–277. doi: 10.1144/sp300.21

Kozhevnikov V.N. Archean greenstone belts of the Karelian Craton as accretionary orogens. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. 223 p. (In Russ.)

Kuleshevich L.V., Svetov S.A. (eds.). Geological heritage of Karelia. Guidebook of historical and geological excursions in the city of Petrozavodsk and Central Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. 207 p. (In Russ.). doi: 10.17076/geoguide2021

Kulikov V.S., Svetov S.A., Slabunov A.I., Kulikova V.V., Polin A.K., Golubev A.I., Gorkovets V.Ya., Ivashchenko V.I., Gogolev M.A. Geological map of

southeastern Fennoscandia at a scale of 1:750,000: new approaches to compilation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017;2:3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444

Lapo A. V., Davydov V. I., Pashkevich N. G. Methodological foundations for the study of geological natural monuments of Russia. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya = Stratigraphy and Geological Correlation*. 1993;1(6):75–83. (In Russ.)

Lapo A. V., Davydov V. I., Pashkevich N. G., Petrov V. V., Vdovets M. S. Geological objects of worldwide significance in the European part of Russia. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya = Stratigraphy and Geological Correlation*. 1997;5(3);92–101. (In Russ.)

Larin A. M. Rapakivi granites and associated rocks. St. Petersburg: Nauka; 2011. 402 p. (In Russ.)

Lobach-Zhuchenko S. B., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Levsky L. K., Kovalenko A. V. Archean terranes of Karelia: their geological and isotopic-geochemical substantiation. *Geotectonics*. 2000;34(6):452–466.

Makarikhin V. V., Medvedev P. V., Rychanchik D. V. Geological monuments of Karelia. Petrozavodsk: Karelia; 2007. 192 p. (In Russ.)

Nance R. D. The supercontinent cycle and Earth's long-term climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2022;1515(1):33–49. doi: 10.1111/nyas.14849

Nance R. D., Murphy J. B., Santosh M. The supercontinent cycle: a retrospective essay. *Gondwana Research*. 2014;25(1):4–29. doi: 10.1016/j.gr.2012.12.026

Reynard E., Brilha J. (eds.). Geoheritage: assessment, protection and management. 2nd ed. Elsevier; 2025. doi: 10.1016/C2023-0-50721-9

Sharov N. V. (ed.). The Ladoga Proterozoic structure (geology, deep structure and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 435 p. (In Russ.)

Shchipansky A. A. Subduction and mantle-plume processes in the geodynamics of formation of Archaean Greenstone Belts. Moscow: LKI; 2008. 560 p. (In Russ.)

Shekov V. A. (ed.). Mining road. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 320 p.

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of Archaean Mobile Belts (by the example of the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 296 p. (In Russ.)

Slabunov A. I., Balagansky V. V., Shchipansky A. A. Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield, and the tectonic setting of eclogites. *Russ. Geol. Geophys*. 2021;62(5):525–546. doi: 10.2113/RGG20204266

Slabunov A. I., Lobach-Zhuchenko S. B., Bibikova E. V., Balagansky V. V., Sorjonen-Ward P., Volodichev O. I., Shchipansky A. A., Svetov S. A., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Stepanov V. S. The Archaean of the Baltic Shield: geology, geochronology, and geodynamic settings. *Geotectonics*. 2006;40(6):409–433. doi: 10.1134/S0016852106060016

Svetov S. A. Magmatic systems of the ocean–continent transition zone in the Archaean of the eastern part of the Fennoscandian Shield. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. 230 p. (In Russ.)

Tishkina A. Tourists spent more than 5 billion rubles in the Sortavala District of Karelia over the year. RBC Karelia. 2026 Mar 24. URL: https://karelia.rbc.ru/karelia/24/03/2026/69c242f59a79474a5501e2ac (accessed: 30.09.2026). (In Russ.)

Yukhtanov P. P. (comp.). Geological heritage of the Republic of Komi (Russia). Syktyvkar: Institute of Geology, Komi SC UB RAS; 2008. 350 p. (In Russ.)

Zhao G., Cawood P. A., Wilde S. A., Sun M. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*. 2002;59(1–4):125–162. doi: 10.1016/S0012-8252(02)00073-9

Поступила в редакцию / received: 01.09.2025; принята к публикации / accepted: 01.10.2026.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Светов Сергей Анатольевич

д-р геол.-мин. наук, директор,
главный научный сотрудник
лаборатории литологии и геохимии

e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTOR:

Svetov, Sergei

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Director, Chief Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 54–72
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 54–72
DOI: 10.17076/geo2303

УДК 552.10+552.321.5+470.22

СУБСОЛИДУСНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ ОЛИВИНОВЫХ ГАББРОНОРИТОВ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

О. И. Володичев, Т. И. Кузенко, О. А. Максимов*

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *olemaximov@mail.ru*

Метаморфизованные в субсолидусных условиях оливиновые габбронориты Беломорья (~ 2,4 млрд лет), относящиеся к широко распространенной в природе группе «частично эклогитизированных» габбро, были изучены в серии объектов единого комплекса, отражающих возрастающую степень проявления метаморфических преобразований. Установлена тесная взаимосвязь магматических и метаморфических процессов. В наиболее интенсивно метаморфизованных породах установлены три генетические генерации Omp ± Aeg-Aug: магматическая – Omp20–25 ± Aeg-Aug20–22; метаморфическая, связанная со структурами распада Cpx и Opx – Omp20–34 ± Aeg-Aug20–23, и метаморфическая, образованная при реакциях Px-Pl – Omp20–73 ± Aeg-Aug20–24 в ассоциациях с Pl (от 30–35 до 4–5 % An). Px-Pl реакции развивались циклически с двумя стадиями – Na-щелочной (Omp + Pl) с выщелачиванием основных компонентов (Fe, Mg, Ca) при возрастающей $a H_2O$, $a Na_2O$ и снижающейся $a SiO_2$ и стадии их осаждения (Opx, Grt) при возрастающей $a SiO_2$ (адекватно компенсационный процесс). Реакции проходили в автоклавном автометасоматическом режиме в изохимических условиях с сохранением объема, с участием трансформированного магматического флюида при высоких скоростях кристаллизации минералов, вероятно, превышающих оптимальные для диффузионного механизма кристаллизации. Это обусловило большую вариативность состава минералов и исключительную неравновесность минеральных фаз. Вариации состава Na-Cpx – Omp в одном шлифе, очевидно, отражают разную степень $a Na_2O$ при единых P-T условиях, а Omp и Grt, образовавшиеся в разное время и в различных геохимических условиях, вероятно, не являются парагенетическими. Щелочная специфика изученного субсолидусного метаморфизма (рост $a H_2O$ и $a Na_2O$ и снижение $a SiO_2$) является исключительной в группе «частично эклогитизированных» габбро.

Ключевые слова: габбронорит; эклогитизация; омфацит; минеральное неравновесие; автометасоматоз; скорость реакции; щелочная специализация

Для цитирования: Володичев О. И., Кузенко Т. И., Максимов О. А. Субсолидусный метаморфизм оливиновых габброноритов Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 54–72. doi: 10.17076/geo2303

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания КарНЦ РАН (ИГ КарНЦ РАН, FMEN-2023-0009).

O. I. Volodichev, T. I. Kuzenko, O. A. Maksimov*. SUBSOLIDUS METAMORPHISM OF OLIVINE GABBRONORITES FROM THE BELOMORIAN MOBILE BELT OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *olemaximov@mail.ru*

Olivine gabbronorites of Belomorye (~2.4 Ga), belonging to the widespread natural group of "partially eclogitised" gabbros, were investigated across a series of objects within a unified complex that reflects progressively intensified metamorphic transformations occurring under subsolidus conditions. A strong correlation between magmatic and metamorphic processes has been established. In the most extensively metamorphosed samples, three genetically distinct generations of Omp ± Aeg-Aug minerals have been recognized: magmatic generation – Omp20–25 ± Aeg-Aug20–22; metamorphic generation related to Cpx and Opx breakdown textures – Omp20–34 ± Aeg-Aug20–23; and another metamorphic generation resulting from Px-Pl reactions – Omp20–73 ± Aeg-Aug20–24, associated with plagioclase (An content ranging from 30–35 to 4–5%). The Px-Pl reactions evolved cyclically through two sequential stages: first, a Na-alkaline stage (Omp + Pl) characterized by leaching of primary elements (Fe, Mg, Ca) under rising activities of H_2O and Na_2O but diminishing SiO_2 activity, followed by a second stage marked by precipitation of secondary minerals (Opx, Grt) under elevated SiO_2 activity levels (in line with a compensatory mechanism). These reactions occurred in an autoclave-like autometasomatic regime, maintaining constant volume and preserving chemical balance, driven by transformed magmatic fluids and rapid rates of mineral crystallization, which may exceed those optimal for diffusive crystal growth. As a result, this led to substantial variations in mineral chemistry and pronounced disequilibria among coexisting mineral phases. Variability in Na-Cpx – Omp compositions observed within individual thin sections clearly indicates differing degrees of Na_2O activity despite otherwise consistent pressure-temperature conditions. Moreover, Omp and Grt minerals, formed at disparate times and under divergent geochemical settings, are unlikely to be paragenetically linked. The unique alkaline nature of the studied subsolidus metamorphism, characterized by increased H_2O and Na_2O activities concurrent with decreased SiO_2 activity, is highly unusual even among the broader category of "partially eclogitised" gabbros.

Keywords: gabbronorite; eclogitised; omphacite; mineral disequilibrium; autometasomatism; reaction rate; alkaline specialization

For citation: Volodichev O. I., Kuzenko T. I., Maksimov O. A. Subsolidus metamorphism of Olivine gabbronorites from the Belomorian mobile belt of the Fennoscandian Shield. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 54–72. doi: 10.17076/geo2303

Funding. This work was carried out as part of the State Assignment of IG KarRC RAS FMEN-2023-0009.

Введение

Субсолидусный метаморфизм раннепротерозойских (~ 2,4 млрд лет) оливиновых габброноритов в Беломорском подвижном поясе Фенноскандинавского щита является хорошим примером широко распространенного в природе явления – частичной эклогитизации («partially eclogitised») габбро с основным петрологическим признаком – сосуществование Omp с Pl. Среди такого многообразия большой интерес представляют кородиты – частично эклогитизированные – эклогитизированные габбро, имеющие широкое распространение в орогенных структурах: в Норвегии [Mørk, 1985, 1986; Anderson, Moecher, 2007], в Альпах [Wayte et al., 1989; Bucher, Grapes, 2009; Proyer, Postl, 2010], в Китае [Znang, Liou 1997], в Гренландии [Gilotti, Elvevold, 1998; Lang, Gilotti, 2001], в Гренвильской провинции Канады [Indares, 1993; Cox, Indares, 1999], в США, в Аппалачах [Anderson, Moecher, 2007], в Богемском массиве Чехии [O'Brien et al., 1992; Faryad et al., 2015], в Сербии – Северной Македонии, массив Бойник [Кориковский, 2005], в России – Полярный Урал [Удовкина, 1971; Molina et al., 2002] и Беломорье [Кориковский, 2005; Володичев и др., 2008].

Специально подобранный для изучения ряд объектов отражает последовательно возрастающую степень проявления субсолидусного метаморфизма в близких по минеральному и химическому составам оливиновых габброноритах комплекса лерцолитов – габброноритов

(ОГН КЛГН) [Степанов, 1981]: слагающий небольшой по размеру Шангостровский массив в р-не д. Поньгомы (объекты I и IIб – образцы любезно предоставлены А.В. Степановой) и серию даек в р-не с. Гридино (IIа – о-в Эклогитовый, III – мыс Гридин, IV – восточная окраина с. Гридино, V–VI – о-в Избная Луда; обр. IZ-M3/1 (дайка VI) – из коллекции В.С. Степанова) (рис. 1).

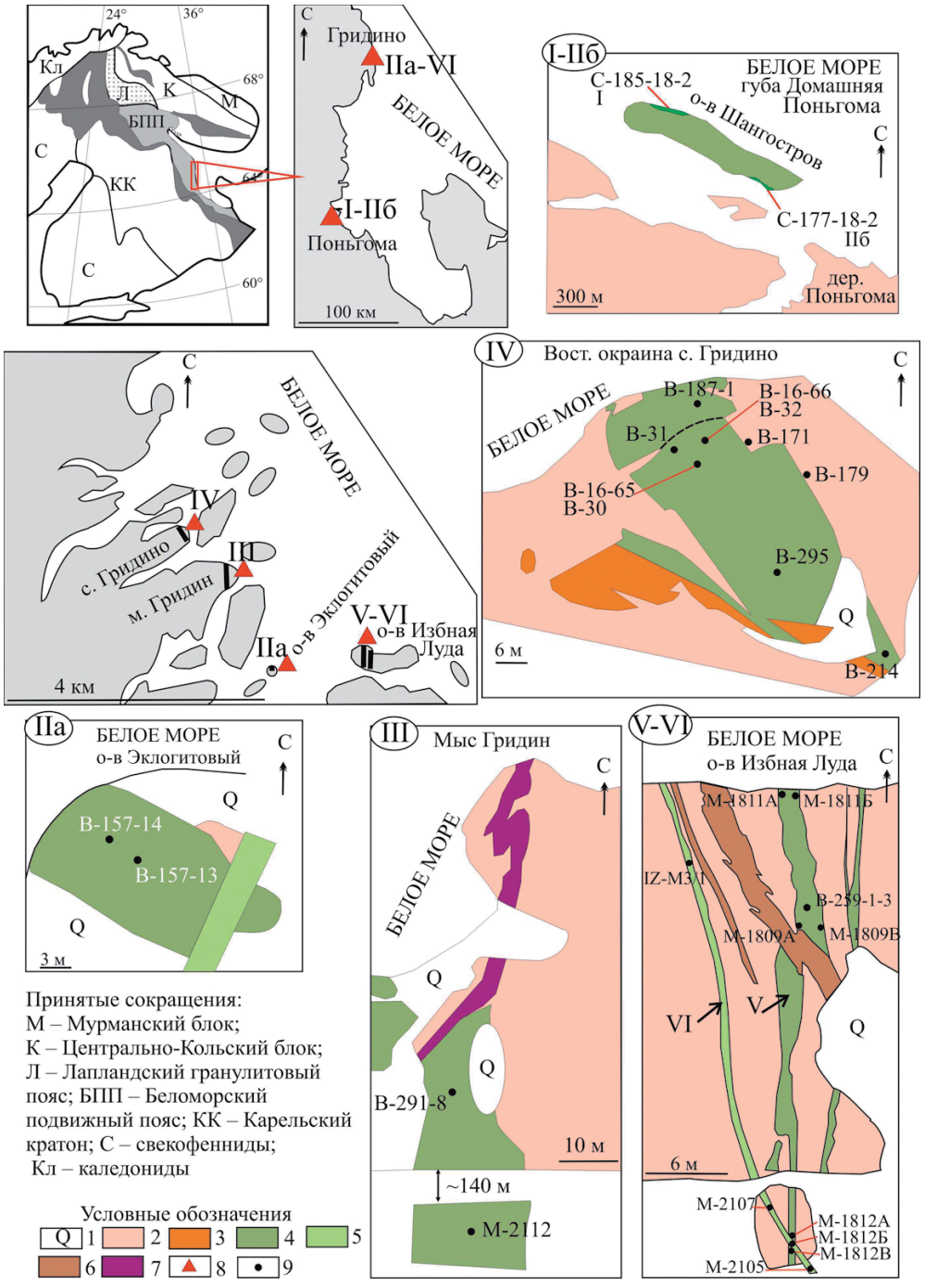


Рис. 1. Схема расположения изученных объектов ОГН КЛГН. 1 – четвертичные отложения; 2 – AR ортогнейсы с ксенолитами амфиболитов; 3–7 – возрастные генерации PR габбро: 3 – PR1, 4 – PR2, 5 – PR2a, 6 – PR3a, 7 – PR3б; 8–9 – места взятия образцов: географические (8), дайки и массивы (9). Римскими цифрами на рисунках и в тексте обозначены изученные объекты

Fig. 1. Schematic map showing the location of the studied OGN LGNC sites. Symbols: 1 – Quaternary strata; 2 – AR orthogneisses with amphibolite xenoliths; 3–7 – age generations of PR gabbro: 3 – PR1, 4 – PR2, 5 – PR2a, 6 – PR3a, 7 – PR3б; 8–9 – sampling sites: geographic (8), dikes and massifs (9). Roman numbers in figures and text show the studied localities

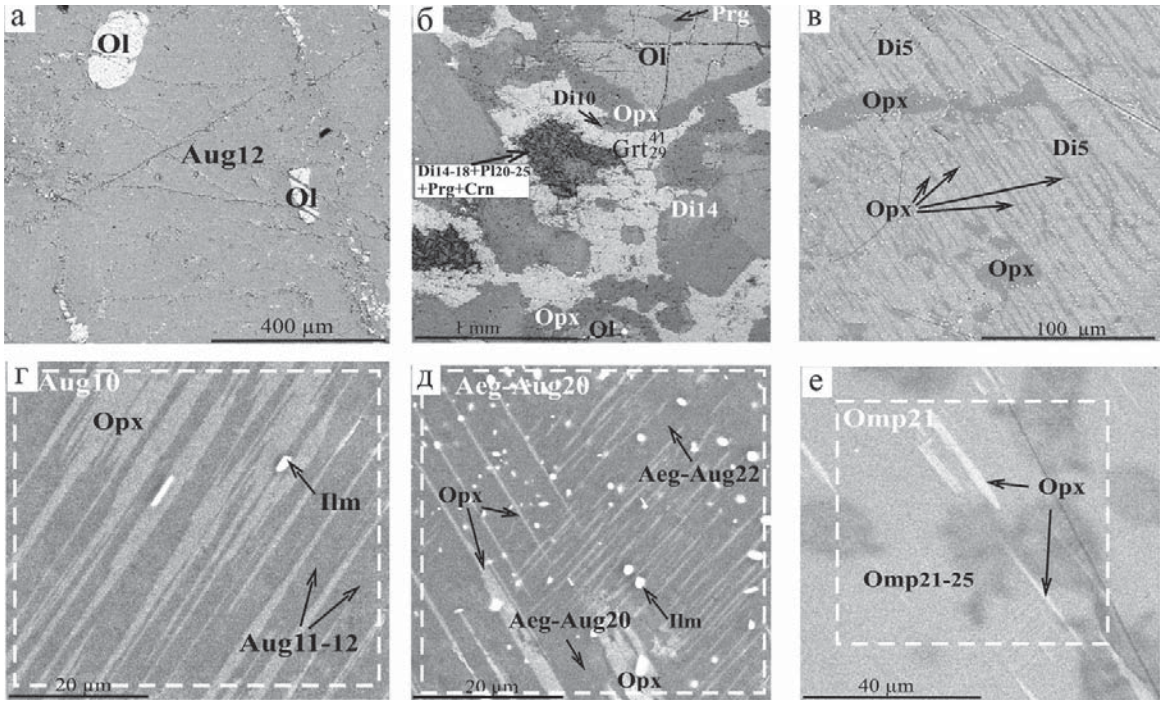


Рис. 2. Магматические Ol (а, б): а – мелкие включения зерен Ol (F = 33–35 %) в Aug, обр. B-259 (V); б – кристалл Ol (F = 20–25 %) в основной массе породы с каймой Opx (F = 15–22 %) и фрагментами Di зоны, обр. B-295 (IV). Инвертированные магматические кристаллы Cpx (в–е): в – Di5, обр. C-185–18–2 (I); г – Aug11–12 (Aeg > Jd), обр. M-1812-B (V); д – Aeg-Aug20–22 (Aeg > Jd), обр. M-1812-B (V); е – Omp21–25, обр. M-1812-A (V). Составы Aug10 (г), Aeg-Aug20 (д) и Omp21 (е) соответствуют площадным определениям в пределах выделенных белым пунктиром квадратов. Изображения в отраженных электронах

Fig. 2. Magmatic Ol (а, б): а – fine Ol grain inclusions (F = 33–35 %) in Aug, sample B-259 (V); б – Ol crystal (F = 20–25 %) in matrix with Opx rim (F = 15–22 %) and fragments of Di-zone, sample B-295 (IV). Inverted magmatic Cpx crystals (в–е): в – Di5, sample C-185–18–2 (I); г – Aug11–12 (Aeg > Jd), обр. M-1812-B (V); д – Aeg-Aug20–22 (Aeg > Jd), обр. M-1812-B (V); е – Omp21–25, sample M-1812-A (V). Aug10 (г), Aeg-Aug20 (д) and Omp21 (е) compositions are consistent with the area determination within the squares shown in white broken lines. BSE-images

Массивные породы имеют четкие интрузивные контакты с нередко проявленными зонами закалки и с маломощными зонами контактового метаморфизма [Володичев и др., 2008]. Вмещающие породы представлены метаморфизованными в условиях HP амфиболитовой фации ортогнейсами с ксенолитами амфиболитов с признаками интенсивно преобразованных архейских [Володичев и др., 2003; Volodichev et al., 2021] эклогитов. Породы характеризуются относительно хорошей сохранностью магматических минералов и морфоструктур без признаков их деформаций, исключающих вероятность участия инфильтрационных флюидов при субсолидусном и более позднем статическом или динамическом проявлении наложенного метаморфизма.

Проведенные исследования показали, что субсолидусный метаморфизм для базитов КЛГН является процессом системным. При этом отдельные малые интрузивные тела, вероятно, представлены фракционными ингредиентами с общими качественными и различающимися количественными характеристиками тесно связанных магматических и метаморфических процессов.

Петрография, химизм минералов и минеральные ассоциации

Магматические оливины представлены мелкими кристаллами, образующими включения в Aug[1*], и более крупными с Opx коронами, вероятно, магматического происхождения, распространенными в основной массе породы (рис. 2, а, б). Плагиоклаз (69 % An) устанавливается

[1] Аббревиатура минералов по [Whitney, Evans, 2010]. Определение состава минералов проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (фирмы Tescan), оснащенном энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (фирмы Oxford instruments), в Центре коллективного пользования Карельского научного центра РАН (ЦКП КарНЦ РАН, г. Петрозаводск). Цифры у клинопироксена – содержание Na-компонента (Jd + Aeg); ортопироксена и оливина – железистость F,% = $(Fe^{2+} + Fe^{3+})/(Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mg)$; плагиоклаза – An; граната – вверху Prp, внизу – (Grs + Adr). Номенклатура пироксенов согласно [Morimoto et al., 1988], амфиболов – [Leake et al., 1997].

только в реликтах, рассчитанный нормативный состав Pl соответствует лабрадору. Характерной особенностью магматических пироксенов является их нестехиометрический состав, обусловленный, в первую очередь, содержаниями Na-компонента (Jd + Aeg; численное значение отражено в индексе). В Cpx возрастающий тренд этих содержаний отмечен двумя группами минералов: 1 – Aug (Jd > Aeg) (I–VI) – Omp20–25 (IV–VI) и 2 – Aug (Aeg > Jd) (IV–VI) – Aeg-Aug20–22 (V–VI). Таким образом, в исследованных ОГН устанавливается сосуществование *магматических Cpx – Aug, Omp (!) и Aeg-Aug* (рис. 2, в–е).

Последующий субсолидусный метаморфизм включает *два процесса* – процесс распада (exolution) твердых растворов в инвертированных магматических Cpx и Opx в кумулятивных доменах и процесс образования реакционных кайм на границах пироксенов (Px) и Pl в интеркумулусных и Pl-доменах. Основными схемами процесса экссолюции являются: Opx→Opx(главный минерал, матрица)+ламели Cpx ± Amf, Bt и Cpx → Cpx (главный минерал, матрица) + ламели Opx ± Amf. Продуктами распада в матрицах и ламелях являются *две метаморфические минеральные группы*, подобные магматическим: Na-Di (Jd > Aeg) (I–IV) – Omp20–34 (IV–VI) и Na-Di (Aeg > Jd) (IV–VI) – Aeg-Aug20–23 (IV–VI), соответствующие *второй, метаморфической, генерации Omp и Aeg-Aug* (рис. 3). В развитии процессов экссолюции отмечается количественное увеличение ламелей Amf (I–IV).

В основном процессы экссолюции и образование реакционных кайм развиваются параллельно, но их соучастие играет важную роль: в процессе реакций инвертированные

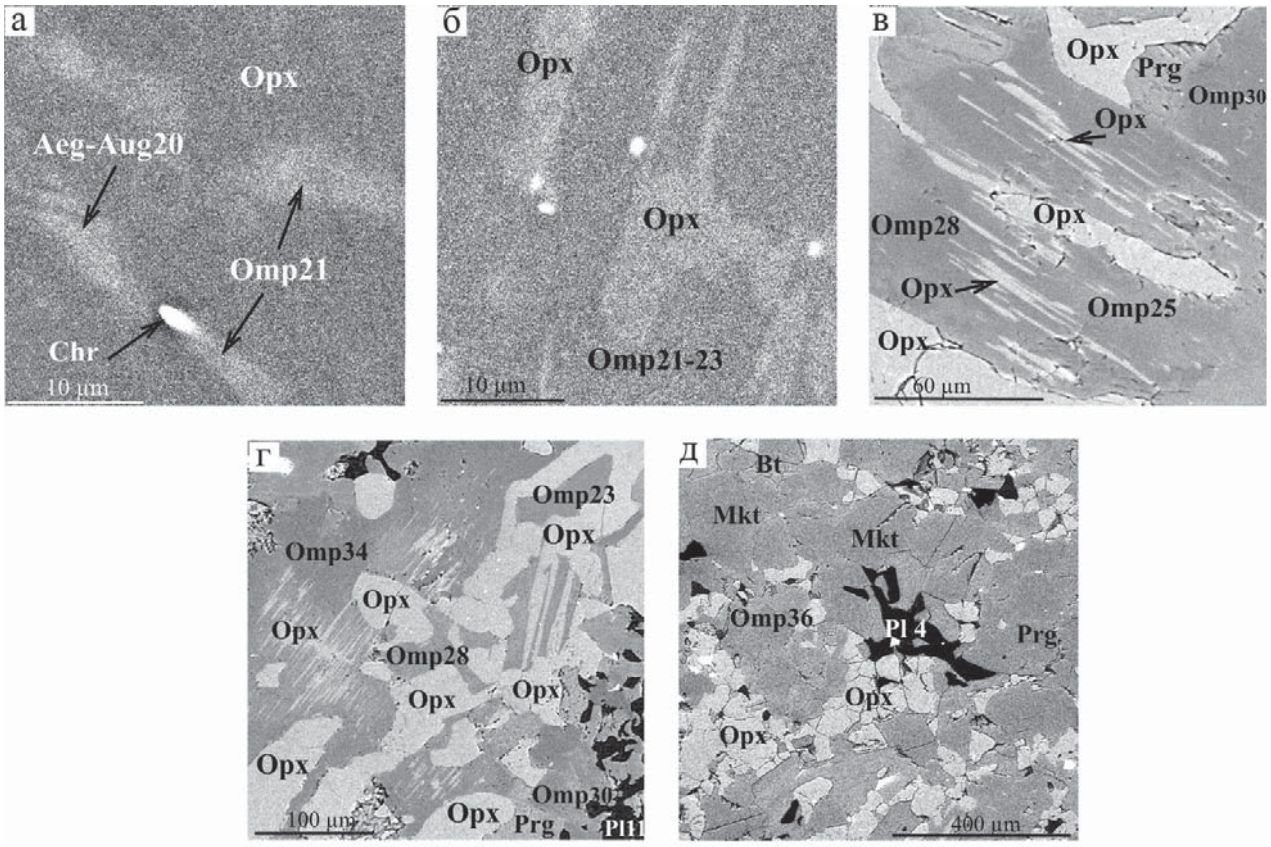


Рис. 3. Структуры распада в магматических пироксенах: а – с образованием по Opx: Omp и Aeg-Aug в ламелях, обр. B-31 (IV); б – по Cpx: Omp в матрице, обр. B-31 (IV); в–г – возрастающая степень коалесценции продуктов распада (в – обр. 259–2 (V), г – обр. M-1809-B (V)) до образования (д) по минералам кумулусного домена «гранулированной массы», в основном сложенной Opx, Omp, Prg, Mkt, обр. B-259-1 (V). Изображения в отраженных электронах

Fig. 3. Disintegration structures in magmatic pyroxenes: a – derived from Opx: Omp and Aeg-Aug in lamellae, sample B-31 (IV); б – from Cpx: Omp in matrix, sample B-31 (IV); в–г – increasing coalescence of disintegration products (в – sample 259-2 (V), г – sample M-1809-B (V)) prior to formation (д) from the minerals of the cumulus domain of “granulated mass” consisting mainly of Opx, Omp, Prg, Mkt, sample B-259-1 (V). BSE-images

Px полностью теряют нестехиометрические компоненты (преимущественно Na_2O и при дегидратации Amf – $H_2O \pm O_2$), в различной степени обогащая ими фракцию магматического флюида и дополнительно придавая ему щелочную специфику. Основную роль флюиды играют в качестве эффективного катализатора [Rubie, 1986], но, кроме того, участвуют при образовании водосодержащих фаз. В динамике развития метаморфического процесса состав флюидов постепенно усложняется: $H_2O \rightarrow H_2O + CO_2$ (Dol) $\rightarrow H_2O + CO_2$ + Cl (Amf, Bt, Ap) при повышенной фугитивности O_2 (магматический процесс – Chr $\pm$ Rt $\rightarrow$ Ilm + Fe_2O_3 (Aeg); метаморфический – Ky, Crn $\rightarrow$ Ky, Crn + Ilm $\rightarrow$ Ilm + Fe_2O_3 (Aeg)). Возможно, с высокой активностью O_2 связаны повышенные (0,33–0,34 к. ф.) и высокие (0,88–0,93 к. ф.) содержания TiO_2 в амфиболах – Ti-Prg и Ti-Mtm и в предполагаемом новом (?) минерале Na-Ca группы амфиболов Ti-Fe-Mtm (рис. 4), имеющем средний (n = 8) химический состав (мас.%): SiO_2–36,17; TiO_2–8,26; Al_2O_3–9,06; FeO–28,24; MgO–9,35; CaO–4,61; Na_2O–5,51 и предполагаемую кристаллохимическую формулу:

$(Na_{0,84})_{\Sigma 0,84}(Na_{0,75}Ca_{0,74}Fe^{2+}_{0,51})_{\Sigma 2,00}(Mg_{2,08}Fe^{3+}_{1,59}Fe^{2+}_{1,33})_{\Sigma 5,00}(Si_{5,39}Al_{1,59}Ti_{0,93}Fe^{3+}_{0,09})_{\Sigma 8,00}O_{22}(OH)_2$

с высокими содержаниями Fe^{3+} – 1,68 к. ф. и Ti – 0,93 к. ф.

Основными реакциями при взаимодействии Px-Pl являются: Opx + Pl_{Ca} + $Na_2O \rightarrow$ Na-Cpx + $Pl_{<Ca}$ + Spl и Cpx + Pl_{Ca} + $Na_2O \rightarrow$ Na-Cpx + $Pl_{<Ca}$ + Crn ($\pm$ участие Opx, Amf) (рис. 5).

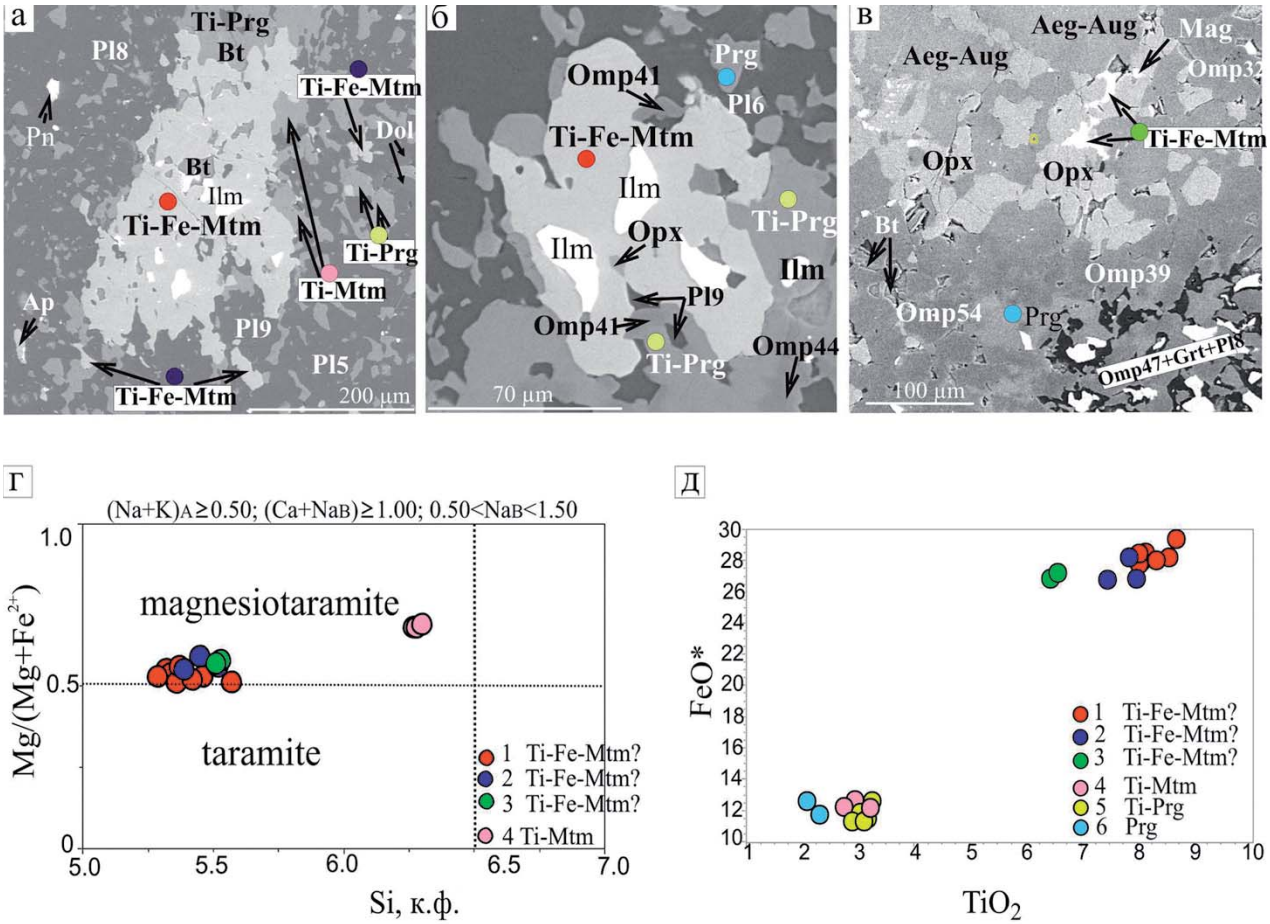


Рис. 4. Новый (?) минерал Ti-Fe-Mtm – амфибол Na-Ca группы: в относительно крупных зернах (красный цвет – а, б); в мелких включениях в Ab массе (синий цвет – а); в «скелетных» выделениях дендритового типа в Opx (зеленый цвет – в) и другие сопутствующие амфиболы (Ti-Mtm, Ti-Prg, Prg); г – на классификационной диаграмме [Leake et al., 1997]; д – на бинарной диаграмме TiO_2 – FeO*. Обр. IZ-M3/1 (VI). Изображения в отраженных электронах

Fig. 4. A new mineral (?) Ti-Fe-Mtm – amphibole of Na-Ca group: in relatively coarse grains (red colour – a, б); in fine inclusions in Ab-mass (blue colour – a); in "skeletal" aggregates of dendritic type in Opx (green colour – в) and other associated amphiboles (Ti-Mtm, Ti-Prg, Prg); г – on a classification diagram [Leake et al., 1997]; д – on binary TiO_2 – FeO* diagram. Sample IZ-M3/1 (VI). BSE-images

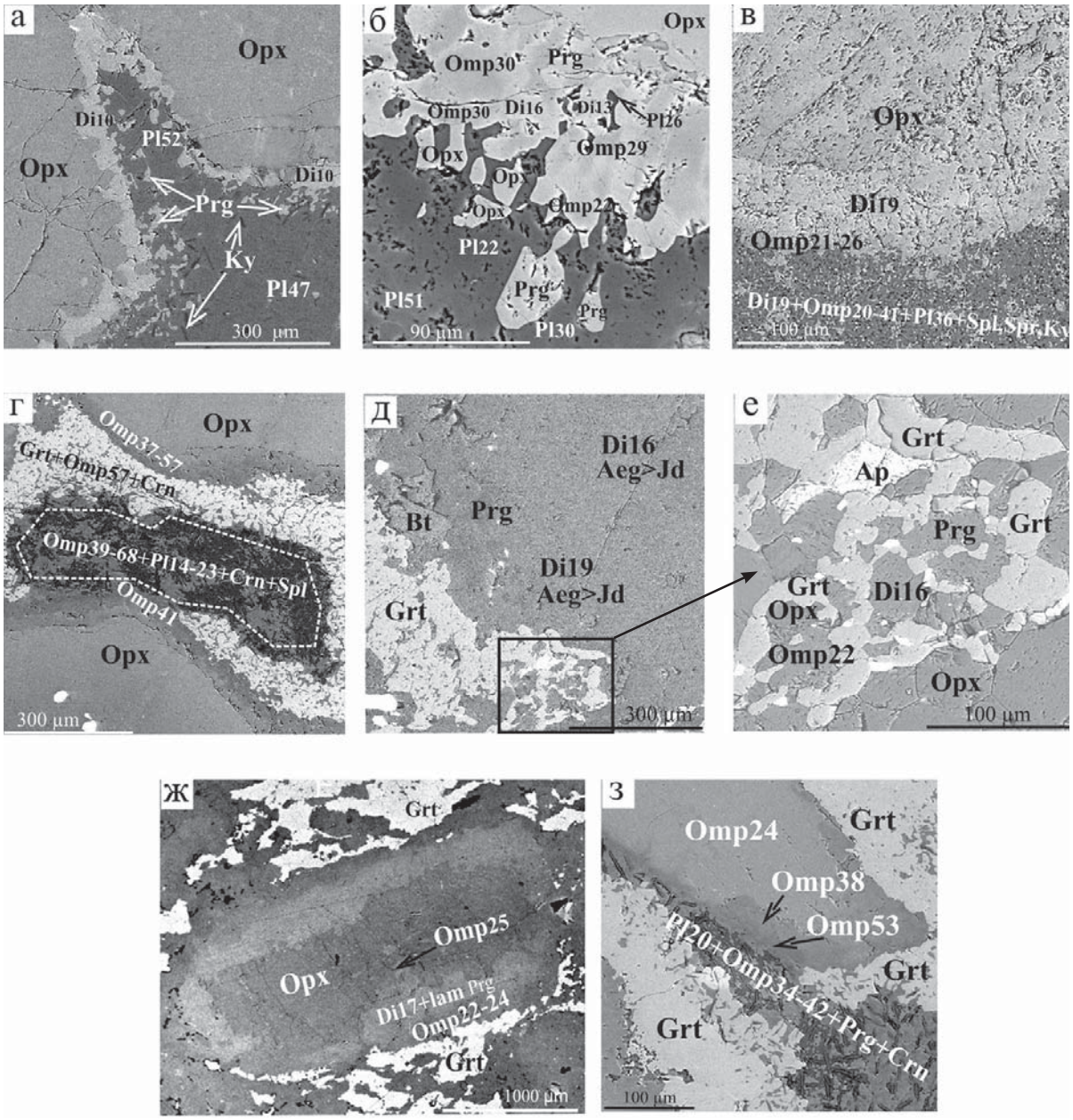


Рис. 5. Реакционные зоны на границах Opx и Pl: а – начальная стадия, обр. С-185-18-2 (I); б – полиминеральная зона, обр. М-2112 (III); в – Na-Di–Omp зона с интенсивным преобразованием Pl-домена, обр. В-291-8 (III); г – одна из конечных стадий образования реакционных Omp зон и максимального преобразования Pl-доменов с несогласными соотношениями с ними Grt минерализации, обр. В-30 (IV). Реакционные зоны на границах Cpx и Pl: д–е – магматический Di16 (Aeg > Jd) и реакционный Di19 (Aeg > Jd) с Grt зоной некоронарного типа, обр. В-16-65 (IV); ж – магматический пироксен сложного Opx-Cpx состава с узкой реакционной Omp22–24 зоной с фрагментами проявления некоронарной Grt минерализации, обр. В-32 (IV) [Володичев и др., 2008]; з – магматический Omp24 с реакционной Omp38–53 зоной и фрагментом Pl-домена сложного состава с отчетливо несогласными соотношениями с Grt минерализацией, обр. В-30 (IV). Изображения в отраженных электронах

Fig. 5. Reaction zones at Opx and Pl boundaries: a – initial stage, sample C-185-18-2 (I); б – polymineral zone, sample M-2112 (III); в – Na-Di–Omp zone of high-grade metamorphism of Pl-domain, sample B-291-8 (III); г – final stage in the formation of reaction Omp zones and highest-grade metamorphism Pl-domains with unconformably associated Grt mineralization, sample B-30 (IV). Reaction zones at Cpx and Pl boundaries: д–е – magmatic Di16 (Aeg > Jd) and reaction Di19 (Aeg > Jd) with Grt zone of non-corona type, sample B-16-65 (IV); ж – magmatic pyroxene of complex Opx-Cpx composition with a narrow reaction Omp22–24 zone with fragments of non-corona Grt mineralization, sample B-32 (IV) [Volodichev et al., 2008]; з – magmatic Omp24 with a reaction Omp38–53 zone and a fragment of a compositionally complex Pl-domain with clearly unconformable relationships with Grt mineralization, sample B-30 (IV). BSE-images

При этом фиксируется увеличение содержаний Na-компонента в Cpx – от 7–11% (I) до 12–73% (IV) и 26–58% (V–VI), снижение An-компонента в Pl – от 58–42% (I) до 13–4% (V–VI), повышение содержаний Na в Amf всех позиций – от 0,5–0,72 к. ф. (I) до 0,75–1,6 к. ф. (VI) с образованием амфиболов Na-Ca группы (Mtm и Mkt), что определяет ведущую роль aNa_2O в развитии субсолидусного метаморфизма (рис. 6, 7).

Omp20–73 (III–VI) и Aeg-Aug20–22 (IV–VI) представляют *третью генетическую генерацию*. Для Omp (V–VI) характерны повышенные (до 20%) содержания Aeg-компонента (см. рис. 5, д).

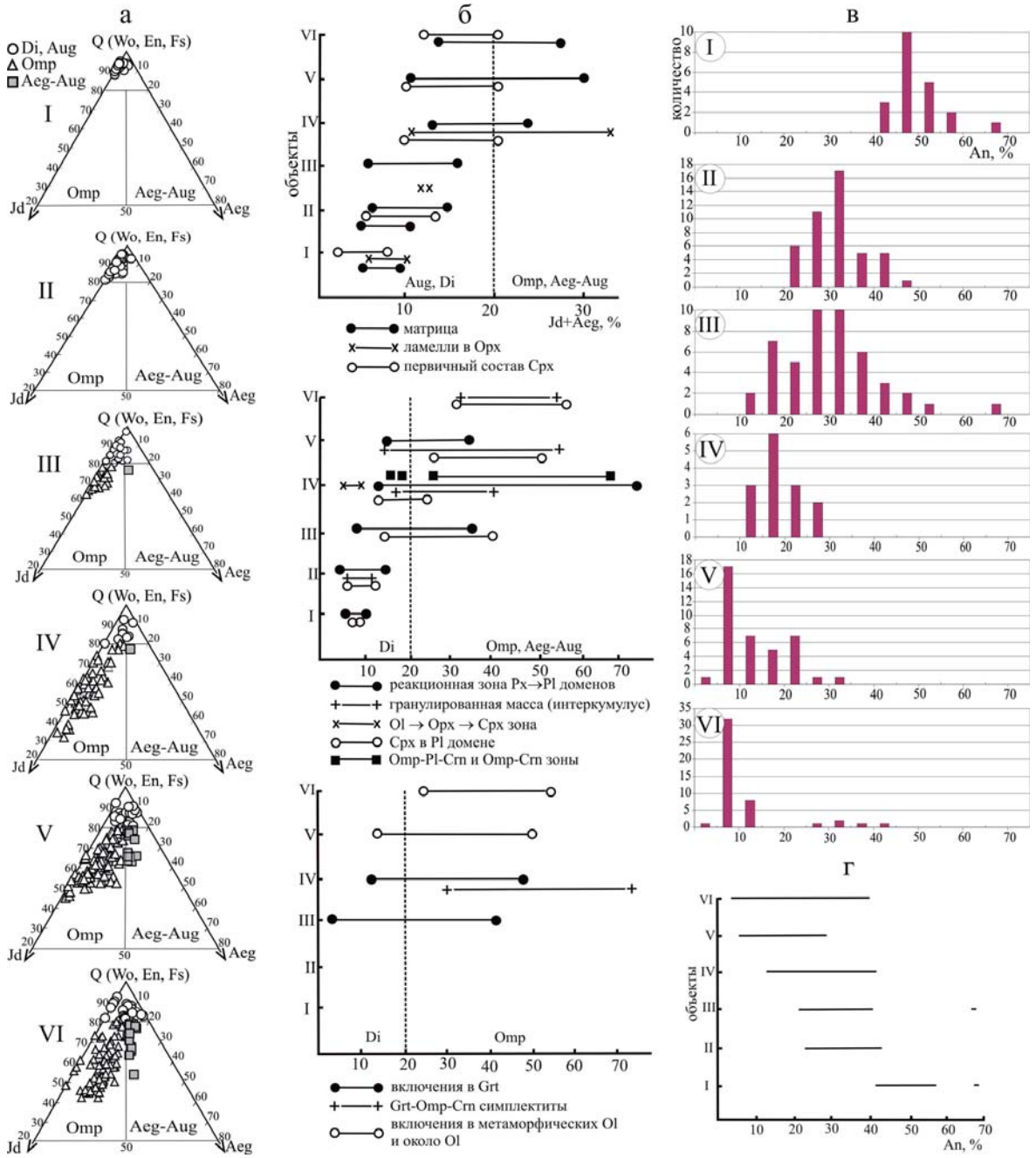


Рис. 6. Вариации состава клинопироксенов (а, б) и плагиоклазов (в, г) в изученных объектах ОГН КЛГН: а – на классификационной диаграмме [Morimoto et al., 1988]; б – на диаграмме объект – (Jd + Aeg); в – гистограммы содержаний An в Pl; г – на диаграмме объект – An

Fig. 6. Variations in the composition of clinopyroxenes (а, б) and plagioclases (в, г) in the studied OGN LGNC localities: a – on the classification diagram [Morimoto et al., 1988]; б – on the diagram locality – (Jd + Aeg); в – histograms of An concentration in Pl; г – on the diagram locality – An

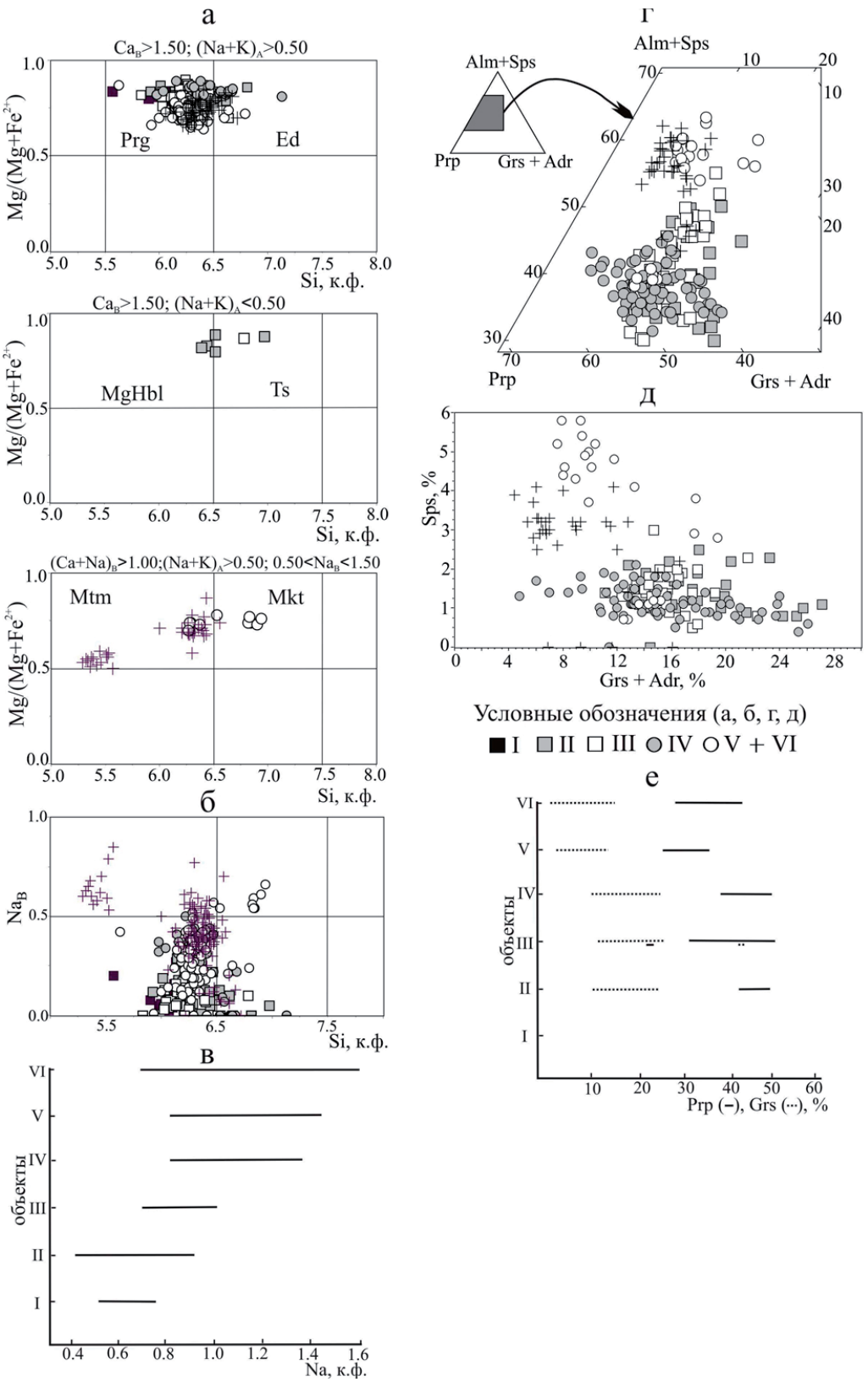


Рис. 7. Вариации состава амфиболов (а–в) и гранатов (г–е) в изученных объектах ОГН КЛГН: а – на классификационных диаграммах [Leake et al., 1997]; б–в – на диаграммах Na_B–Si (б) и объекты – Na (в); г–е – на диаграммах Prp – (Alm + Sps) – (Grs + Adr) (г), Sps – (Grs + Adr) (д) и объекты – (Prp, Grs) (е)

Fig. 7. Variations in the composition of amphiboles (а–в) and garnets (г–е) in the studied OGN LGNC localities: a – on classification diagrams [Leake et al., 1997]; б–в – on Na_B–Si diagram (б) and localities – Na (в); г–е – on diagrams Prp – (Alm + Sps) – (Grs + Adr) (г), Sps – (Grs + Adr) (д) and localities – (Prp, Grs) (е)

Общей особенностью изученных объектов является отсутствие в минеральном составе кварца, что, вероятно, отражает пониженную $aSiO_2$. Изучение особенностей распределения в Pl-доменах пар глиноземистых минералов-индикаторов относительной $aSiO_2$: Spl + SiO_2 ↔ Spr и Crn + SiO_2 ↔ Ky, а также серии анализов химического состава отдельных участков Pl-доменов с пересчетом их на модальный состав (табл. 1) показали отчетливо выраженную тенденцию к снижению $aSiO_2$ в ходе развития метаморфического процесса: Ab, An, Crn + Qz, Hyp → + Hyp, Ol → Ol, Npf (1,36–13,43 %) с max содержанием Npf для участка Omp39–68–Pl14–23 – Crn, Spl зоны.

Таблица 1. Химический (мас.%) и нормативный минеральный состав фрагментов метаморфизованных Pl-доменов объектов ОГН КЛГН

Table 1. Chemical (wt.%) and normative mineral composition of fragments of metamorphosed Pl-domains at the OGN LGNC localities

№ обр. Sample no.	B-291-8					B-30				B-259-3	IZ-M3/1
Объект Locality	III					IV				V	VI
Минер. состав Mineral composition	Pl30–38 + Di17–19 (Omp20–41), Amf, Spl, Spr, Ky, Crn					Pl14–23 + Omp39–68 + Crn, Spl		Grt + Omp34–71 + Crn		Pl9+ Omp26–46 + Opx + Amf	Pl0 + Omp54 + Opx + Amf
SiO_2	56,67	57,15	57,37	53,86	50,72	52,75	50,14	43,32	43,28	53,86	59,48
TiO_2										0,85	
Al_2O_3	27,63	27,03	26,21	29,58	28,15	27,91	28,05	19,60	22,50	12,41	14,66
FeO*	1,32	1,09	0,95	0,83	1,61	1,44	1,69	15,99	12,95	5,63	4,37
MnO								0,61	0,47		
MgO	0,89	0,99	0,97	1,47	4,45	3,75	4,78	12,19	10,64	10,66	5,19
CaO	6,42	5,86	6,72	8,00	9,72	6,79	8,64	7,02	7,81	10,36	7,76
Na_2O	6,65	6,38	7,03	6,26	5,36	7,37	6,70	1,28	2,34	5,94	8,00
K_2O	0,42	1,50	0,74							0,29	0,54
Сумма Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Нормативный минеральный состав (по методу CIPW) Normative mineral composition (according to the CIPW method)											
Quartz	0,19										
Corundum	4,56	4,25	1,62	4,73	1,67	3,44	1,32	4,74	4,45		
Orthoclase	2,47	8,85	4,40							1,71	3,17
Albite	56,30	53,98	55,36	50,48	33,86	44,76	31,32	10,85	18,46	30,37	51,22
Anorthite	31,85	29,08	33,35	39,69	48,20	33,69	42,89	34,81	38,77	6,32	2,49
Nepheline			2,21	1,36	6,23	9,53	13,73		0,71	10,79	8,95
Diopside										36,14	29,33
Hypersthene	4,64	2,09						18,18			
Olivine		1,74	3,05	3,73	10,04	8,59	10,74	31,42	37,61	13,07	4,86
Ilmenite										1,61	
Сумма Total	100,00	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00	100,00	100,01	100,00	100,00	100,01
Pl,%	90,62	91,91	93,11	90,17	82,06	78,45	74,21	45,66	57,23	38,40	56,88
An,%	35	32	36	44	59	42	58	76	68	16	4

Примечание. FeO* – все железо в виде FeO.

Note. FeO* – all iron as FeO.

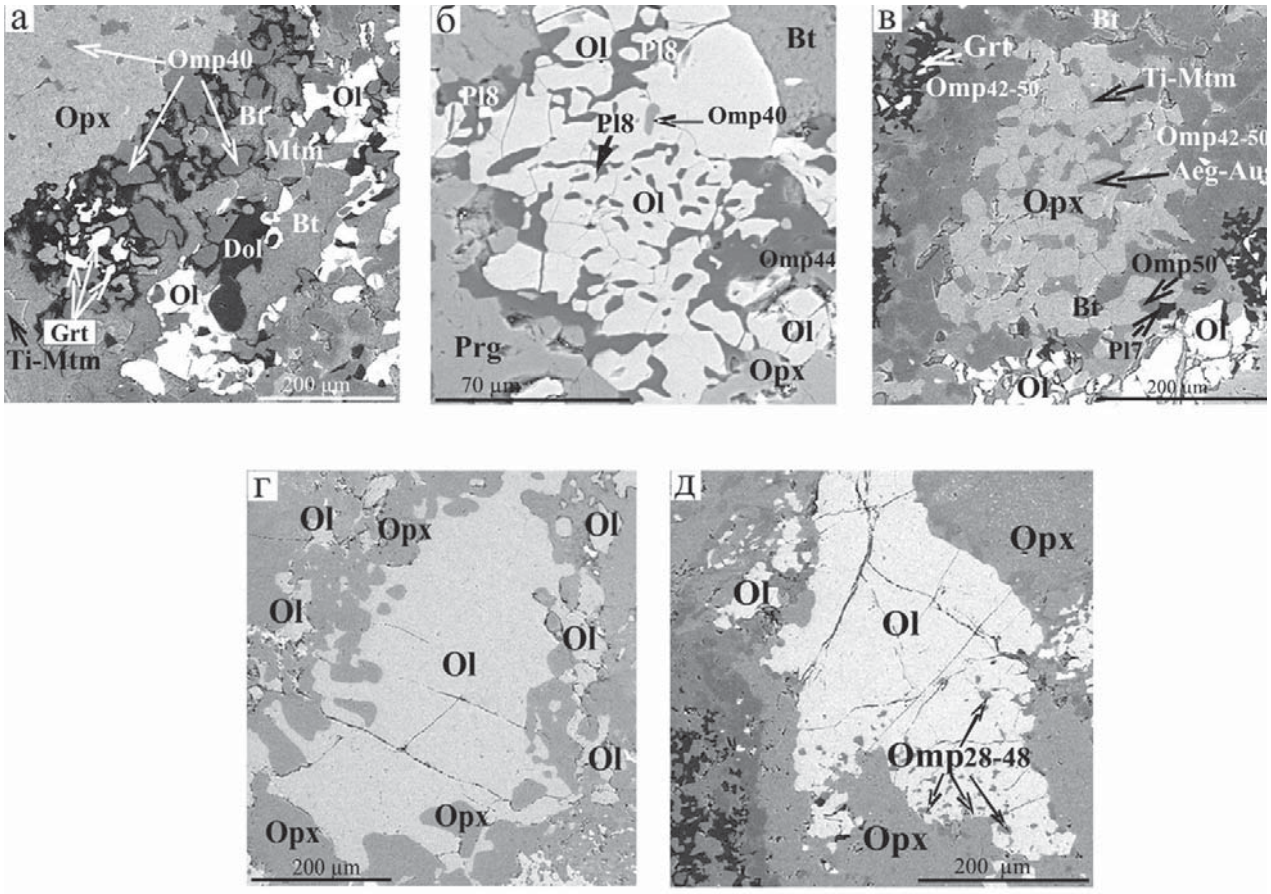


Рис. 8. Метаморфические оливины а–б: а – скелетные образования (верхняя правая часть фото), обр. IZ-M3/1 (VI); б – порфиробластическая форма роста с включениями Omp и Ab, обр. B-259 (V); в–д – развитие Opx поздней генерации – с включениями Omp, Ti-Mtm, Aeg-Aug, Bt по магматическому (в – обр. IZ-M3/1 (VI), г – обр. B-30 (IV)) и метаморфическому (д – обр. B-259–3 (V)) оливинам. Изображения в отраженных электронах

Fig. 8. Metamorphic olivines а–б: а – skeletal structures (upper right part of the photo), sample IZ-M3/1 (VI); б – porphyroblastic form of growth with Omp and Ab inclusions, sample B-259 (V); в–д – evolution of late Opx generation – with Omp, Ti-Mtm, Aeg-Aug and Bt inclusions derived from magmatic (в – sample IZ-M3/1 (VI), г – sample B-30 (IV)) and metamorphic (д – sample B-259–3 (V)) olivines. BSE-images

В образцах V–VI объектов снижение $aSiO_2$ определяется и образованием метаморфического Ol, который от магматического отличается размерами и формами выделений – от мелких червеобразной и скелетной формы до крупных, участками образующих скопления, порфиробластов с многочисленными включениями Omp20–52, Pl7–10, Aeg-Aug24–26, Mtm, Prg, Opx, Dol (рис. 8, а, б). С дальнейшей эволюцией петрографического состава пород связано образование новой генерации метаморфического Opx, содержащего в некоторых кристаллах включения Omp, Ti-Mtm, Aeg-Aug, Bt (рис. 8, в) и развивающегося по магматическому (IV–VI; рис. 8, в, г) и метаморфическому (V–VI; рис. 8, д) Ol.

Эта генерация Opx вместе с ассоциацией Grt-Opx-Bt с характерными структурами роста дендритового типа представляют заключительную стадию развития субсолидусного метаморфизма (рис. 9), стадию образования всего граната с различными количественными соотношениями с другими компонентами – от резко преобладающего Grt состава (IV; рис. 10, а–д) до минимального (V–VI; рис. 10, е–ж) с нередкими участками породы, акцентированного Omp-Pl состава, при полном отсутствии Grt (III–V–VI) (рис. 10, з–и). Состав Grt относительно стабилен на объектах II–IV с некоторым снижением содержаний Prp и Grs при повышении содержаний Alm Sps на объекте V–VI (см. рис. 7).

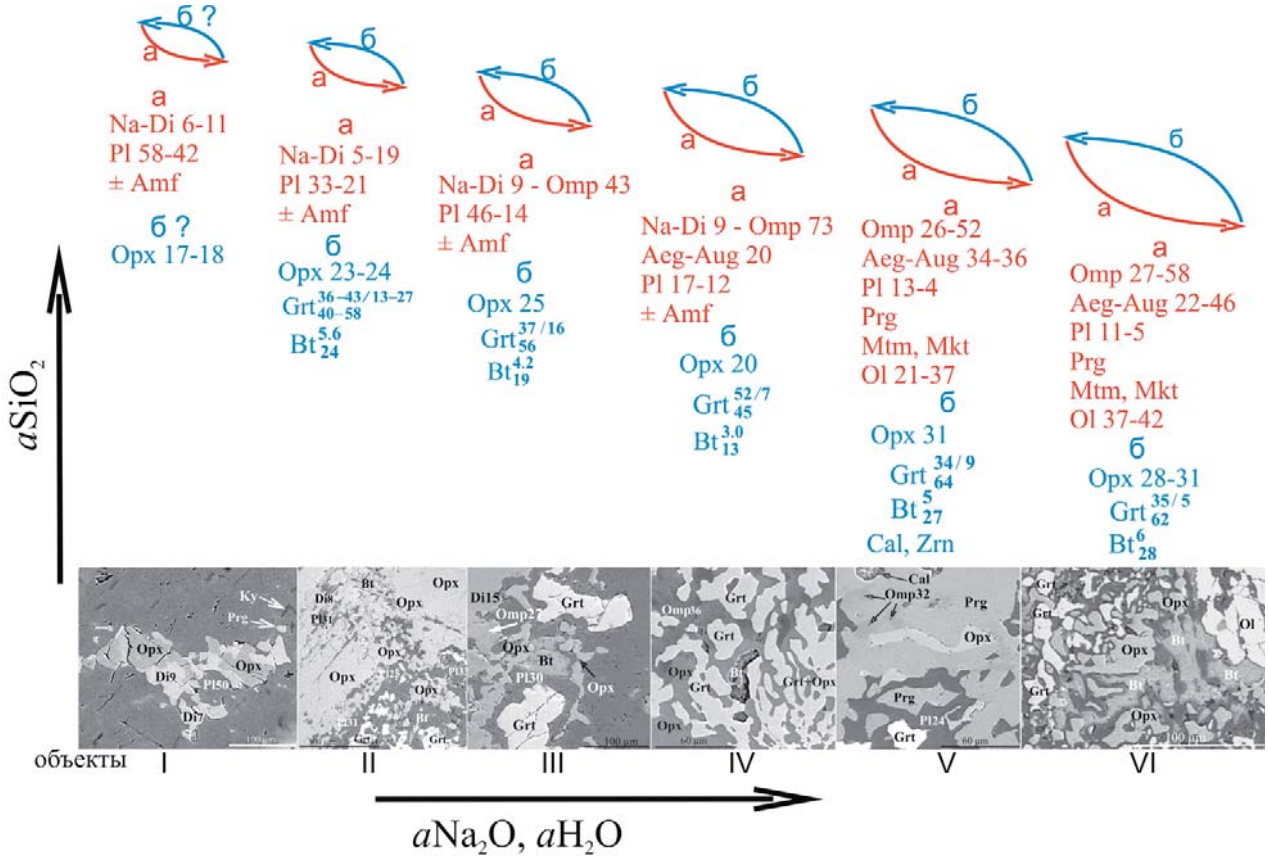


Рис. 9. Эволюционный ряд стадий развития пироксен-плагиоклазовых реакционных зон на диаграмме $a\mathrm{SiO_2}$ – ($a\mathrm{Na_2O}$, $a\mathrm{H_2O}$) (красным цветом и буквой а обозначена стадия выщелачивания, синим цветом и буквой б – стадия осаждения выщелоченных элементов; здесь цифровые индексы минералов: $\mathrm{Grt_F^{Prp/Grs+Adr}}$, $\mathrm{Bt_F^{TiO_2}}$.

На микрозондовых фото – минералы Grt-Opx (± Bt) стадии: I – более позднее (?) относительно Di9 образование Opx, обр. С-185-18-2; II–III – Grt-Opx-Bt ассоциация в Pl-доменах, обр. В-157-3 и М-2112; IV–VI – типичные скелетные дендритовые формы роста кристаллов Opx, Grt, Bt – обр. В-30, В 259-3, IZ-M3/1, соответственно

Fig. 9. Stepwise evolution of pyroxene-plagioclase reaction zones on $a\mathrm{SiO_2}$ – ($a\mathrm{Na_2O}$, $a\mathrm{H_2O}$) diagram (red colour and the letter a indicate a leaching stage, blue colour and the letter б indicate a leached element precipitation stage; the digital indices of minerals are used here: $\mathrm{Grt_F^{Prp/Grs+Adr}}$, $\mathrm{Bt_F^{TiO_2}}$.

BSE-images show minerals at Grt-Opx (± Bt) stage: I – post-Di9 (?) formation of Opx, sample C-185-18-2; II–III – Grt-Opx-Bt association in Pl-domains, sample B-157-3 and M-2112; IV–VI – typical skeletal dendritic forms of Opx, Grt and Bt crystal growth – sample B-30, B 259-3, IZ-M3/1, respectively

Результаты исследования

В развитии реакционных процессов отмечается проявление цикличности с двумя стадиями, активно развивающимися на всех ступенях интенсивности проявления метаморфизма (I–VI): это Na-щелочная стадия, сопровождающаяся выщелачиванием основных компонентов (Mg, Fe, Ca) при возрастающей $a\mathrm{H_2O}$ и $a\mathrm{Na_2O}$ и снижающейся $a\mathrm{SiO_2}$, и стадия осаждения выщелоченных компонентов с образованием Opx (Fe, Mg) и Grt (Fe, Mg, Ca) при повышении $a\mathrm{SiO_2}$ (адекватно компенсационный процесс) (см. рис. 9). Подобная стадийность, в принципе, соответствует метасоматическому процессу, но при условии пространственной разобщенности их проявлений и при привносе-выносе компонентов. В данном случае процесс кристаллизации пространственно совмещен и происходит с сохранением объемов *в автономных изохимических условиях (автометасоматоз?).* Вся серия пород, отражающая возрастающую степень их метаморфизма, имеет весьма близкие химические составы пород, сопоставимые со средними (n = 32) составами ОГН КЛГН [Степанов, 1981] (рис. 11). Более того, содержание $\mathrm{Na_2O}$, например, в обр. В-30 (IV) с Omp68–73 составляет 1,4 мас.% [Володичев и др., 2008], что соответствует равному (1,62 мас.%) среднему содержанию $\mathrm{Na_2O}$ в ОГН КЛГН Беломорья [Степанов, 1981] (табл. 2, рис. 11).

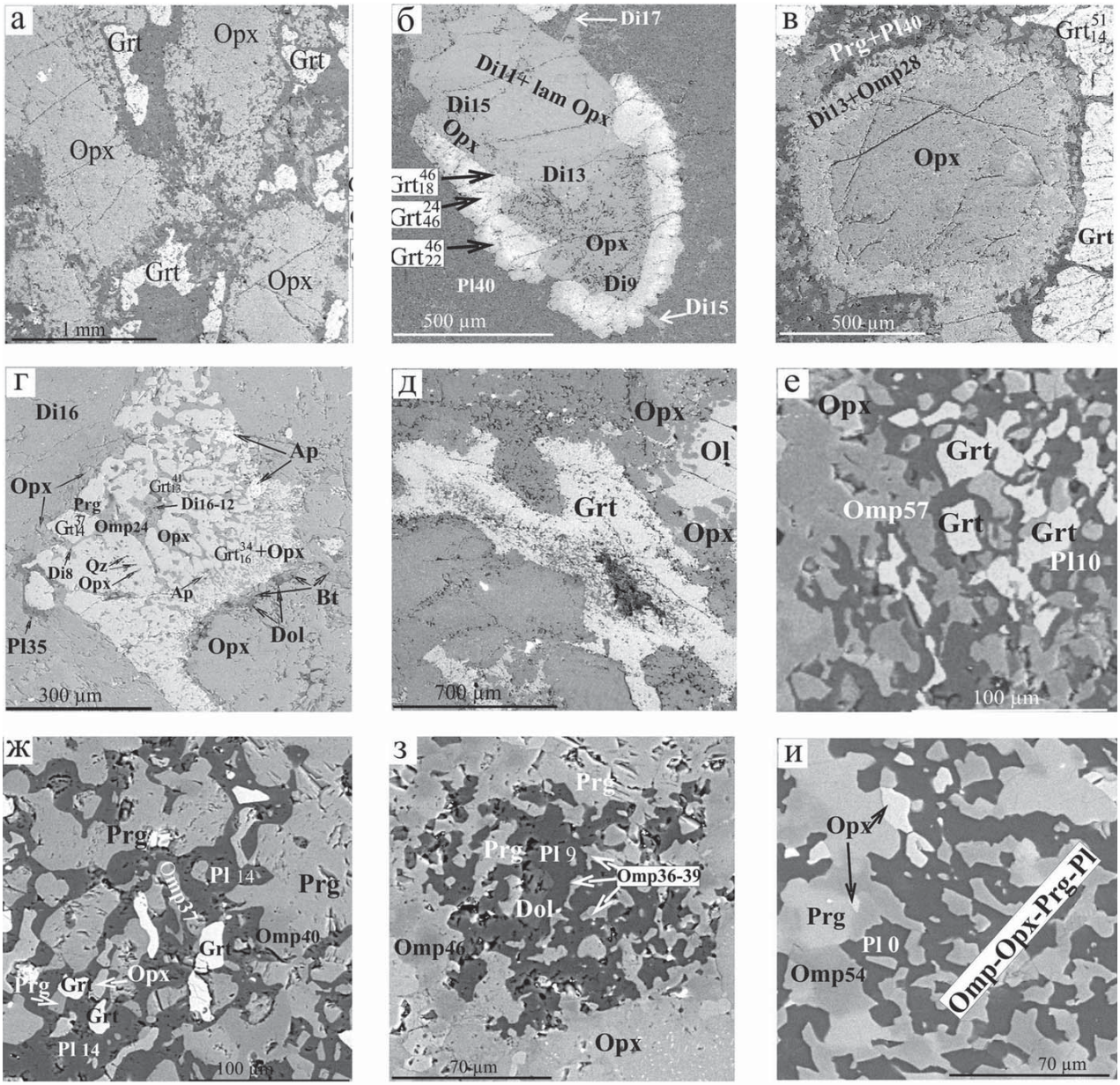


Рис. 10. Формы кристаллизации гранатов (а–ж) и безгранатовые участки Pl-доменов, содержащих Omp (з–и):

а – «плавающий» тип кристаллизации Grt в Pl-домене вне взаимодействия с пироксен-плагиоклазовыми реакционными зонами, обр. B-157-13 (IIa); б – «контактный» тип – несогласное образование сложной по составу Grt короны на границах с рядом соседствующих магматических кристаллов Opx и Cpx без образования реакционных зон, обр. B-291–8 (III); в-промежуточная стадия образования коронарной структуры с сохранением признаков дисперсности зон Omp-Prg-Pl и Grt составов, обр. M-2112 (III); г – Grt агрегат в интеркумулусном домене с включениями Di, Omp и Prg в части, примыкающей к кристаллу Cpx, и Grt-Opx симплектитом в части, пограничной с кристаллом Opx, обр. M-2112 (III); д – участок максимальной гранатизации Pl-домена с вариациями внутреннего строения без четких форм коронарных структур, обр. B-30 (IV); е – гранаты с дендритовыми структурами роста в Pl-домене, обр. IZ-M3/1 (VI); ж – единичные проявления Grt в Pl-домене, обр. M-1809-B (V); з–и – типичные для объектов V (обр. B-259–3) и VI (обр. IZ-M3/1) безгранатовые участки Pl-доменов с дендритовыми структурами роста Omp, Opx, Prg. Изображения в отраженных электронах

Fig. 10. Forms of garnet crystallization (а–ж) and garnet-free portions of Pl-domains containing Omp (з–и):

a – “floating” type of Grt crystallization in Pl-domain outside a relationship with pyroxene-plagioclase reaction zones, sample B-157–13 (IIa); б – “contact” type – unconformable formation of compositionally complex Grt corona at the boundary with some neighbouring magmatic Opx and Cpx crystals without the formation of reaction zones, sample B-291–8 (III); в-an intermediate stage in the formation of coronary structure with indications of dispersivity of Omp-Prg-Pl zones and Grt composition, sample M-2112 (III); г – Grt-aggregate in an intercumulus domain with Di, Omp and Prg inclusions in the portion adjacent to the Cpx crystal and Grt-Opx symplectite in the portion adjacent to the Opx crystal, sample M-2112 (III); д – maximum Pl-domain garnetization zone with variations in internal structure without distinct shapes of corona structures, sample B-30 (IV); e – garnets with dendritic growth structures in Pl-domain, sample IZ-M3/1 (VI); ж – single Grt occurrences in Pl-domain, sample M-1809-B (V); з–и – garnet-free portions of Pl-domains with dendritic Omp, Opx, Prg growth structures typical of V-localities (sample B-259–3) and VI (sample IZ-M3/1). BSE-images

Таблица 2. Химический состав (мас.%) объектов ОГН КЛГН

Table 2. Chemical composition (mas.%) of OGN LGNC localities

Объект Localities	I	IIa	IIб	III	IV	V	VI	Ol габбронорит [Степанов, 1981] Ol gabbronorite [Stepanov, 1981]
Среднее Average	1	1	1	1	3	5	3	32
SiO_2	49,08	51,90	47,38	50,16	48,83	49,70	49,69	49,35
TiO_2	0,61	0,53	0,92	0,63	0,56	0,70	0,71	0,61
Al_2O_3	12,22	10,66	8,28	9,55	9,71	7,27	8,04	11,13
Fe_2O_3	2,36	1,77	1,65	0,56	1,77	2,15	1,65	1,38
FeO	8,02	8,62	9,62	10,20	8,64	9,92	9,93	9,03
MnO	0,13	0,175	0,22	0,182	0,18	0,19	0,19	0,22
MgO	15,21	15,27	22,17	17,62	19,09	17,70	17,89	17,17
CaO	8,58	7,40	7,46	7,86	8,52	8,04	8,14	8,06
Na_2O	2,27	1,80	1,10	1,40	1,37	2,29	2,27	1,62
K_2O	0,55	0,66	0,35	0,43	0,33	0,63	0,63	0,46
P_2O_5	0,08	0,11	0,03	0,06	0,06	0,14	0,13	0,09
Ппп LOI	0	0,77	0,64	0,84	0,79	1,26	0,90	0,56
# Mg	72,77	72,71	78,06	74,58	76,82	72,69	73,21	74,87

Примечание. 0 – ниже предела определения. # Mg = 100* (MgO/40,3) / ((FeOtot/71,85) + (MgO/40,3)).

Note. 0 – below detection limit. # Mg = 100* (MgO/40.3) / ((FeOtot/71.85) + (MgO/40.3)).

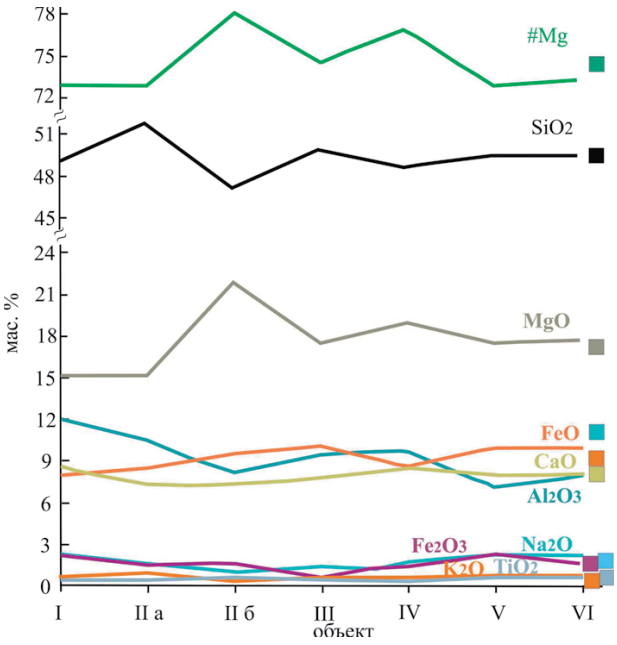


Рис. 11. Вариационная диаграмма содержаний окислов породообразующих элементов в объектах ОГН КЛГН. Средние составы Ol габброноритов из работы [Степанов, 1981] обозначены квадратами

Fig. 11. Variation diagram showing the concentrations of rock-forming element oxides at the OGN LGNC localities. Average compositions of Ol of gabbronorites after [Stepanov, 1981] are indicated by squares

Щелочная специфика изученного субсолидусного метаморфизма является *исключительной* среди подобных мировых субэклогитовых проявлений. Очевидно, она обусловлена автономным магматическим источником – особенностями флюида (в первую очередь, степенью обогащения Na_2O и O_2) и минерального состава породы – нестехиометрический состав Px, магматические Omp и Aeg-Aug, отсутствие Qz (за исключением обр. В-157–13, IIa) и лабрадоровый состав Pl. В присутствии в породах более основного Pl (битовнита или анортита) при реакции с водой образуются Zo, Qz + Ky, Ph, Pg, что характерно для ряда мировых петрологических аналогов, флюиды в которых, вероятно, приобретают относительно кислотный состав и положительные aH_2O, aNa_2O и $aSiO_2$. Однако и в породах ОГН КЛГН иногда встречаются и магматический Qz, обычно в участках гранофировой структуры Qz-Pl (олигоклазового) и Qz-Kfs составов [Степанов, 1981], а также и метаморфический Qz, в том числе и в ассоциации с Omf [Кориковский, 2005; Володичев и др., 2008; Dokukina, Konilov, 2011; Perchuk, Morgunova, 2014].

При метаморфических реакциях происходил статический рост строго *in sity* в различных участках морфоструктуры породы с образованием

в единых P-T условиях в соответствии с химическим составом микроучастков минеральных ассоциаций со значительно различающимися химическими составами минералов. Это является особенно примечательным и значимым (?) для вариаций в пределах шлифа содержаний Jd в Cpx (например, 8–41 % Jd в III; 12–73 % Jd в IV; 30–58 % Jd в VI) в ассоциации с Pl, которые, естественно, предопределяют вопрос – являются ли составы Omp реакционных генераций в совокупности с магматическими и экссолюционными функцией барических параметров для субсолидусного метаморфизма. Другая сторона вопроса связана с проблемой парагенезиса Omp с Grt, которые, как позволяют заключить приведенные ранее данные, либо были образованы в рамках одного процесса, но дискретно, на разных стадиях его развития и в разных геохимических условиях (рис. 9; 10, а–ж), либо образование Omp не сопровождалось образованием Grt (см. рис. 3, д; 5, б, в; 10, з–и).

Определяющая исключительную неравновесность большая вариативность состава минералов в пределах одного шлифа, осложняющая корректное определение P-T условий метаморфизма, объясняется высокими скоростями кристаллизации минералов, что вместе с активностями, в данном случае aH_2O, aNa_2O и $aSiO_2$, в неравновесной термодинамике [Fisher, 1973] определяет кинетические факторы метаморфизма. Отчетливым признаком высоких скоростей, вероятно, превышающих оптимальные для диффузионного механизма кристаллизации, являются широко распространенные своеобразные формы роста дендритового типа (амебообразные, червеобразные, скелетные), обнаруженные у целого ряда минералов – Na-Di, Omp, Opx, Grt, Amf, Spl, Ol без проявления стадии гомогенизации составов. При этом допускаются различия в скоростях – от высоких, но допускающих образование подобия коронарных структур при низком-среднем уровне (I–III) развития метаморфизма до высоких-ультравысоких (?) в маломощных дайках V (N = 1,5–0,3 м) и VI (N = 0,3–0,4 м), без участия процесса коронообразования.

По качественному составу минералов P-T условия субсолидусного метаморфизма соответствуют HP гранулитовой фации для всех (I–VI) стадий его проявления. Определение конкретных условий сопряжено со сложностями, обусловленными преобладающей неравновесностью минералов. В таких случаях некоторые исследователи [Mørk, 1985; Gilotti, Elvevold, 1998] детализацию не проводили. Все же предпринятая попытка представляется желательной и оправданной. T = 800 ± 20 °C была определена (обр. M-2112, III и B-16–66, IV) с использованием Spr-Spl геотермометра [Owen, Greenough, 1991]. При ассоциации Opx-Ky нижняя граница P-условий соответствует ≈ 10 кбар при использовании условий инверсии Sill-Ky при T = 800 °C на современных P-T схемах метаморфических фаций [Brown, 2014]. Серия анализов Grt-Opx пар (обр. B-157–13, IIa; B-291–8 и M-2112, III; B-30, IV и B-259–2, V) с использованием Grt-Opx геобарометров [Harley, 1984; Аранович, Косякова, 1987], обнаруживших большую сходимость результатов, показала большой разброс полученных данных в диапазоне от 2 до 29 кбар, но с относительно преимущественными значениями 9–13 кбар и 12 кбар (обр. B-259-2, V) в зерне Grt с включением Opx, как наиболее вероятный пример точечного равновесия. В результате – T = 800 ± 20 °C и P = 10–13 кбар могут быть приняты в качестве параметров, соответствующих условиям проявленного в дайках субсолидусного метаморфизма в автоклавном режиме при снижении давлений в маломощных дайках (до 0,3 м), содержащих Omp26–58 без Ky и других глиноземистых минералов, до уровня литостатического ~ 7 кбар, определенного в зоне контактового метаморфизма дайки IV (обр. B-171 [Володичев и др., 2008]) (рис. 12).

Определение барических условий методами с участием Jd (max) дает неоднозначные результаты. Для бескварцевых ассоциаций при использовании изоплеты Ne + Ab = 2Jd

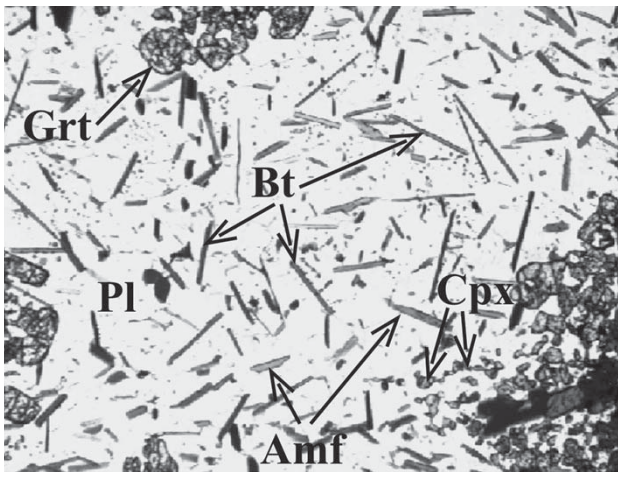


Рис. 12. Участок массивного изотропного строения в Grt-Cpx-Amf-Bt гнейсе – зона контактового метаморфизма (обр. B-179-1 (IV)) [Володичев и др., 2008]. Без анализатора. Увеличение 40x

Fig. 12. Locality showing massive isotropic structure in Grt-Cpx-Amf-Bt gneiss – contact metamorphic zone (sample B-179-1 (IV)) [Volodichev et al., 2008]. No analyzer. Magnification 40x

[Gasparik, 1985] давление соответствует 12–13 кбар, а для кварцсодержащих ассоциаций, которые отмечались ранее [Володичев и др., 2008; Dokukina, Konilov, 2011], использование изоплеты Ab = Jd (70 %) + Qz [Holland, 1980] при T = 800 °C давление соответствует 19–20 кбар.

Альтернативные модели метаморфических преобразований: дайки оливиновых габброноритов совместно с вмещающими породами были метаморфизованы в условиях эклогитовой фации при HP = 16–17,5 кбар с признаками UHP метаморфизма [Dokukina, Konilov, 2011] или при HP-UHP условиях, равных 18–32 кбар [Perchuk, Morgunova, 2014].

Возраст субсолидусного метаморфизма устанавливается достаточно определенно. На о-ве Избная Луда метаморфизованная в субсолидусных условиях дайка V сечется дайками двух возрастных генераций [Stepanova, Stepanov, 2010] – автометаморфизованной дайкой VI второй фазы становления КЛГН и дайкой коронитовых габбро с возрастом 2,12 млрд лет. В дайке IV с возрастом 2393 ± 13 млн лет в цирконе с $^{207}Pb/^{206}Pb$ возрастом 2392 ± 11 млн лет содержатся включения Opx и Cpx 14 % Jd [Volodichev et al., 2012], что, вероятно, соответствует времени проявления субсолидусного метаморфизма.

В северной части дайки IV при ее блокировке, сопровождающейся «эффектом Седерхольма», происходила перекристаллизация минералов субсолидусного метаморфизма с гомогенизацией их состава и с образованием в результате Grt – Omp25–30 ± Opx, Amf эклогитовой ассоциации, предположительно образованной в условиях HP гранулитовой – амфиболитовой фаций. Особенности механизма подобного преобразования еще предстоит изучить.

Заключение

«Частичная эклогитизация» (Omp + Pl ± Grt ассоциация) палеопротерозойских оливиновых габброноритов Беломорского подвижного пояса происходила при их субсолидусном метаморфизме, специфика которого и динамика его развития определялись, главным образом, составом исходной магмы и различиями в степени ее дифференциации в малых интрузивных телах. Метаморфизм развивался в закрытых системах в изохимических условиях при повышенной активности магматических флюидов с образованием крайне неравновесных минеральных ассоциаций без стадии их гомогенизации, что определяет основную роль кинетических факторов в его развитии с дифференциальной активностью H_2O, Na_2O и SiO_2 компонентов и с высокими скоростями кристаллизации минералов в контрастных относительно вмещающих пород P-T условиях, в автоклавном режиме при T ≈ 800 °C и P ≈ 10–13 кбар с вероятным снижением до литостатического уровня (P ≈ 7 кбар) в маломощных (до 20–30 см) дайках, содержащих Omp26–58.

Авторы выражают искреннюю благодарность В. С. Степанову и А. В. Степановой за представленную возможность использования при исследованиях образцов из их коллекций с о-вов Шангостров и Избная Луда. Авторы признательны анонимному рецензенту и К. А. Докукиной за ряд ценных замечаний, которые были учтены при последней редакции рукописи.

Литература

Аранович Л. Я., Косякова Н. А. Гранат-ортопироксеновый геотермобарометр: термодинамика и применение // Геохимия. 1987. № 10. С. 1363–1377.

Володичев О. И., Парфенова О. В., Кузенко Т. И. Палеопротерозойские эклогиты Беломорского подвижного пояса (об эклогитизации габбро в дайке комплекса лерцолитов-габброноритов) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. № 11. С. 37–61.

Кориковский С. П. Проградные преобразования габброноритов при эклогитизации в температурном интервале 600–700 °C // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 12. С. 1352–1366.

Степанов В. С. Основной магматизм докембрия Западного Беломорья. Л.: Наука, 1981. 216 с.

Удовкина Н. Г. Эклогиты Полярного Урала. М., 1971. 191 с.

Anderson E. D., Moecher D. P. Omphacite breakdown reactions and relation to eclogite exhumation rates // Contrib. Mineral. Petrol. 2007. Vol. 154. P. 253–277. doi: 10.1007/s00410-007-0192-x

Brown M. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics // Geosci. Front. 2014. Vol. 5. P. 553–569. doi: 10.1016/j.gsf.2014.02.005

Bucher K., Grapes R. The eclogite-facies allalin gabbro of the Zermatt-Saas Ophiolite, Western Alps: a record of subduction zone hydration // J. Petrol. 2009. Vol. 50. P. 1405–1442. doi: 10.1093/petrology/egp035

Cox R., Indares A. Transformation of Fe-Ti gabbro to coronite, eclogite and amphibolite in the Baie du Nord segment, eastern Grenville Province // J. Metamorph. Geol. 1999. Vol. 17. P. 537–555.

Dokukina K. A., Konilov A. N. Metamorphic evolution of the Gridino mafic dyke swarm (Belomorian eclogite province, Russia) // In Ultrahigh-pressure metamorphism. 25 years after the discovery of coesite and diamond (Eds.: L. Dobrzhinetskaya, S. Cuthbert, W. Faryad, S. Wallis). Amsterdam: Elsevier, 2011. P. 579–621. doi: 10.1016/B978-0-12-385144-4.00017-5

Faryad S. W., Kachlık V., Slama J., Hoinkes G. Implication of corona formation in a metatroctolite to the

granulite facies overprint of HP-UHP rocks in the Moldanubian zone (Bohemian Massif) // J. Metamorph. Geol. 2015. Vol. 33. P. 295–310. doi:10.1111/jmg.12121

Fisher G.W. Nonequilibrium thermodynamics as a model for diffusion-controlled metamorphic processes // Amer. J. of Science. 1973. Vol. 273. P. 897–924.

Gasparik T. Experimentally determined composition of diopside-jadeite pyroxene in equilibrium with albite and quartz at 1200–1350 °C and 15–34 kbar // Geochim. Cosmochim. Acta. 1985. Vol. 49, no. 3. P. 865–870.

Gilotti J. A., Elvevold S. Partial eclogitization of the Ambolten gabbronorite, North-East Greenland Caledonides // Schweiz. Mineral. Petrol. Petrogr. Mitt. 1998. Vol. 78. P. 273–292.

Harley S. L. The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet in FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 and CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 // J. of Petrol. 1984. Vol. 25, no. 3. P. 665–694.

Holland T. J. B. The reaction albite=jadeite+quartz determined experimentally in the range 600–1200 grad. C // Am. Mineral. 1980. Vol. 65. P. 129–134.

Indares A. Eclogitized gabbros from the eastern Grenville Province: textures, metamorphic context and implications // Can. J. of Earth Sci. 1993. Vol. 30. P. 159–173.

Lang H. M., Gilotti J. A. Plagioclase replacement textures in partially eclogitised gabbros from the Sandal mafic–ultramafic complex, Greenland Caledonides // J. Metamorph. Geol. 2001. Vol. 19. P. 495–515.

Leake B. E., Woolley A. R. et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // Eur. J. Mineral. 1997. Vol. 9. P. 623–651.

Molina J. F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogites of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism // Lithos. 2002. Vol. 61. P. 55–78.

Morimoto N., Fabries J., Ferguson A. K. et al. Nomenclature of pyroxenes // Am. Mineral. 1988. Vol. 73. P. 1123–1133.

Mørk M. B. E. A gabbro to eclogite transition on Flemsøy, Sunmøre, western Norway // Chem. Geol. 1985. Vol. 50. P. 283–310.

Mørk M. B. E. Coronite and eclogite formation in olivine gabbro (Western Norway): reaction paths and garnet zoning // Mineral. Mag. 1986. Vol. 50. P. 417–426.

O'Brien P. J., Röhr C., Okrusch M., Patzak M. Eclogite facies relics and a multistage breakdown in metabasite of the KTB pilot hole, NE Bavaria: implications for the Variscan tectonmetamorphic evolution of the NW Bohemian Massif // Contrib. Mineral. Petrol. 1992. Vol. 112. P. 261–278.

Owen J. V., Greenough J. D. An empirical sapphirine-spinel Mg-Fe exchange thermometer and its application to high grade xenoliths in the Popes Harbour dyke, NovaScotia, Canada // Lithos. 1991. Vol. 26. P. 317–332.

Perchuk A. L., Morgunova A. A. Variable P-T paths and HP-UHP metamorphism in a Precambrian terrane, Gridino, Russia: Petrological evidence and geodynamic implications // Gondwana Research. 2014. Vol. 25. P. 614–629. doi: 10.1016/j.gr.2012.09.009

Proyer A., Postl W. Eclogitized Gabbros from Gressenberg, Koralpe, Austria: transformation phenomena and their interpretation // Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins für Steiermark. 2010. Vol. 140. P. 45–67.

Rubie D. C. The catalysis of mineral reactions by water and restrictions on the presence of aqueous fluid during metamorphism // Mineral. Mag. 1986. Vol. 50, no. 357. P. 399–415. doi: 10.1180/minmag.1986.050.357.05

Stepanova A. V., Stepanov V. S. Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield // Precamb. Res. 2010. Vol. 183. P. 602–616. doi: 10.1016/j.precamres.2010.08.016

Volodichev O., Slabunov A., Bibikova E., Konilov A. Archean eclogites from the Belomorian Mobile Belt in the Fennoscandian / Baltic Shield, Russia // The Alice Wain Memorial Western Norway Eclogite Symposium. Abstract volume. 2003. P. 157–158.

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Sibelev O. S., Skublov S. G., Kuzenko T. I. Geochronology, mineral inclusions, and geochemistry of zircons in eclogitized gabbronorites in the Gridino Area, Belomorian Province // Geochem. Int. 2012. Vol. 50, no. 8. P. 657–670. doi: 10.1134/S0016702912060080

Volodichev O. I., Maksimov O. A., Kuzenko T. I., Slabunov A. I. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: the first finding // Minerals. 2021. Vol. 11. P. 1029. doi: 10.3390/min11101029

Wayte G. J., Worden R. H., Rubie D. C., Droop G. T. R. A TEM study of disequilibrium plagioclase breakdown at high pressure: the role of infiltrating fluid // Contrib. Mineral. Petrol. 1989. Vol. 101. P. 426–437.

Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // Am. Mineral. 2010. Vol. 95. P. 185–187. doi: 10.2138/am.2010.3371 185

Zhang R. Y., Liou J. G. Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogite from Yangkou, the Sulu terrane, eastern China // J. Metamorph. Geol. 1997. Vol. 15. P. 183–202.

References

Anderson E. D., Moecher D. P. Omphacite breakdown reactions and relation to eclogite exhumation rates. *Contrib. Mineral. Petrol*. 2007;154:253–277. doi: 10.1007/s00410-007-0192-x

Aranovich L. Ya., Kosyakova N. A. Garnet-orthopyroxene geothermobarometer: thermodynamics and example applications. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1987;10:1363–1377. (In Russ.)

Brown M. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics. *Geosci. Front*. 2014;5:553–569. doi: 10.1016/j.gsf.2014.02.005

Bucher K., Grapes R. The eclogite-facies allalin gabbro of the Zermatt-Saas Ophiolite, Western Alps: a record of subduction zone hydration. *J. Petrol*. 2009;50:1405–1442. doi: 10.1093/petrology/egp035

Cox R., Indares A. Transformation of Fe-Ti gabbro to coronite, eclogite and amphibolite in the Baie du Nord segment, eastern Grenville Province. *J. Metamorph. Geol*. 1999;17:537–555.

Dokukina K. A., Konilov A. N. Metamorphic evolution of the Gridino mafic dyke swarm (Belomorian eclogite

province, Russia). *In Ultrahigh-pressure metamorphism. 25 years after the discovery of coesite and diamond (Ed. Dobrzhinetskaya L., Cuthbert S., Faryad W., Wallis S.).* Amsterdam: Elsevier; 2011. P. 579–621. doi: 10.1016/B978-0-12-385144-4.00017-5

Faryad S. W., Kachlık V., Slama J., Hoinkes G. Implication of corona formation in a metatroctolite to the granulite facies overprint of HP-UHP rocks in the Moldanubian zone (Bohemian Massif). *J. Metamorph. Geol*. 2015;33:295–310. doi: 10.1111/jmg.12121

Fisher G. W. Nonequilibrium thermodynamics as a model for diffusion-controlled metamorphic processes. *Amer. J. of Science*. 1973;273:897–924.

Gasparik T. Experimentally determined composition of diopside-jadeite pyroxene in equilibrium with albite and quartz at 1200–1350 °C and 15–34 kbar. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1985;49(3):865–870.

Gilotti J. A., Elvevold S. Partial eclogitization of the Ambolten gabbro-norite, North-East Greenland Caledonides. *Schweiz. Mineral. Petrol. Petrogr. Mitt*. 1998;78:273–292.

Harley S. L. The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet in FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 and CaO-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2. *J. of Petrol*. 1984;25(3):665–694.

Holland T. J. B. The reaction albite=jadeite+quartz determined experimentally in the range 600–1200 grad. C. *Am. Mineral*. 1980;65:129–134.

Indares A. Eclogitized gabbros from the eastern Grenville Province: textures, metamorphic context and implications. *Can. J. of Earth Sci*. 1993;30:159–173.

Korikovskii S. P. Prograde transformations of gabbronorites during eclogitisation in the temperature range of 600–700 °C. *Geology and Geophysics*. 2005;46 (12):1352–1366. (In Russ.)

Lang H. M., Gilotti J. A. Plagioclase replacement textures in partially eclogitised gabbros from the Sandal mafic–ultramafic complex, Greenland Caledonides. *J. Metamorph. Geol*. 2001;19:495–515.

Leake B. E., Woolley A. R., Krivovichev et al. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Eur. J. Mineral*. 1997;9:623–651.

Molina J. F., Austrheim H., Glodny J., Rusin A. The eclogites of the Marun-Keu complex, Polar Urals (Russia): fluid control on reaction kinetics and metasomatism during high P metamorphism. *Lithos*. 2002;61:55–78.

Morimoto N., Fabries J., Ferguson A. K. et al. Nomenclature of pyroxenes. *Am. Mineral*. 1988;73:1123–1133.

Mørk M. B. E. A gabbro to eclogite transition on Flemsøy, Sunmøre, western Norway. *Chem. Geol*. 1985;50:283–310.

Mørk M. B. E. Coronite and eclogite formation in olivine gabbro (Western Norway): reaction paths and garnet zoning. *Mineral. Mag*. 1986;50:417–426.

O'Brien P. J., Röhr C., Okrusch M., Patzak M. Eclogite facies relics and a multistage breakdown in metabasite of the KTB pilot hole, NE Bavaria: implications for the Variscan tectonmetamorphic evolution of the NW Bohemian Massif. *Contrib. Mineral. Petrol*. 1992;112:261–278.

Owen J. V., Greenough J. D. An empirical sapphirine-spinel Mg-Fe exchange thermometer and its application to high grade xenoliths in the Popes Harbour dyke, NovaScotia, Canada. *Lithos*. 1991;26:317–332.

Perchuk A. L., Morgunova A. A. Variable P-T paths and HP-UHP metamorphism in a Precambrian terrane, Gridino, Russia: Petrological evidence and geodynamic implications. *Gondwana Research*. 2014;25:614–629. doi: 10.1016/j.gr.2012.09.009

Proyer A., Postl W. Eclogitized Gabbros from Gressenberg, Koralpe, Austria: transformation phenomena and their interpretation. *Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereins für Steiermark*. 2010;140:45–67.

Rubie D. C. The catalysis of mineral reactions by water and restrictions on the presence of aqueous fluid during metamorphism. *Mineral. Mag*. 1986;50 (357):399–415. doi: 10.1180/minmag.1986.050.357.05

Stepanov V. S. Precambrian mafic magmatism in Western Belomorie. Leningrad: Nauka, 1981. 216 p. (In Russ.)

Stepanova A. V., Stepanov V. S. Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield. *Precamb. Res*. 2010;183:602–616. doi: 10.1016/j.precamres.2010.08.016

Udovkina N. G. Eclogites of the Polar Urals. M., 1971. 191 p. (In Russ.)

Volodichev O., Slabunov A., Bibikova E., Konilov A. Archean eclogites from the Belomorian Mobile Belt in the Fennoscandian / Baltic Shield, Russia. *The Alice Wain Memorial Western Norway Eclogite Symposium. Abstract volume*. 2003. P. 157–158.

Volodichev O. I., Parfenova O. V., Kuzenko T. I. Paleoproterozoic eclogites of the Belomorian Mobile Belt: eclogitization of gabbro in the dike of the lherzolite–gabbronorite complex. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Minerals of Karelia*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. Vol. 11. P. 37–61. (In Russ.)

Volodichev O. I., Slabunov A. I., Sibelev O. S., Skublov S. G., Kuzenko T. I. Geochronology, mineral inclusions, and geochemistry of zircons in eclogitized gabbronorites in the Gridino Area, Belomorian Province. *Geochem. Int*. 2012;50(8):657–670. doi: 10.1134/S0016702912060080

Volodichev O. I., Maksimov O. A., Kuzenko T. I., Slabunov A. I. Archean zircons with omphacite inclusions from eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: the first finding. *Minerals*. 2021;11:1029. doi: 10.3390/min11101029

Wayte G. J., Worden R. H., Rubie D. C., Droop G. T. R. A TEM study of disequilibrium plagioclase breakdown at high pressure: the role of infiltrating fluid. *Contrib. Mineral. Petrol*. 1989;101:426–437.

Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am. Mineral*. 2010;95:185–187. doi: 10.2138/am.2010.3371 185

Zhang R. Y., Liou J. G. Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogite from Yangkou, the Sulu terrane, eastern China. *J. Metamorph. Geol*. 1997;15:183–202.

Поступила в редакцию / received: 02.02.2026; принята к публикации / accepted: 15.04.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Володичев Олег Иванович

д-р геол.-мин. наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
геологии и геодинамики докембрия

e-mail: volod@krc.karelia.ru

Кузенко Татьяна Ивановна

ведущий геолог лаборатории геологии
и геодинамики докембрия

e-mail: volod@krc.karelia.ru

Максимов Олег Александрович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: olemaximov@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Volodichev, Oleg

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Kuzenko, Tatyana

Leading Geologist

Maksimov, Oleg

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 73–90
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 73–90
DOI: 10.17076/geo2440

УДК 552.3+553.24.065(470.22)

МИНЕРАЛОГИЯ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕГМАТИТОВЫХ ЛИНЗ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГАББРОДОЛЕРИТАХ РОПРУЧЕЙСКОГО СИЛЛА (ОНЕЖСКАЯ СТРУКТУРА, КАРЕЛЬСКИЙ КРАТОН)

С. А. Светов*, Е. Н. Светова

*Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *ssvetov@krc.karelia.ru*

В работе представлены результаты полевого и минералогического изучения крупной пегматитовой линзы, выявленной в кровельной части палеопротерозойского (1,77–1,75 млрд лет) Ропручейского силла габбродолеритов (р-н д. Коккорово, Онежская структура, Карельский кратон). Пегматитовая линза имеет мощность около 3 м, дифференцированное внутреннее строение и является типичным примером пегматитовых образований, развитых на втором уровне силлов габбродолеритов Ропручейского комплекса. Минералогическое картирование на основе оптической и сканирующей электронной микроскопии с ЭДС-анализом позволило выявить закономерную смену минеральных парагенезов: от приконтактовых метасоматитов через калишпат-альбитовые пегматиты к альбит-кварцевым центральным зонам пегматитов с мирмекитами и завершающими эпидот-кварцевыми миароловыми полостями. Анализ вариаций минерального состава пегматитов и вмещающих габбродолеритов позволил предложить модель эволюции флюидно-магматической системы: от кристаллизации габброидного расплава через внедрение флюидонасыщенного пегматитового расплава, метасоматическую переработку зоны контакта к гидротермальной REE-F-Cl-минерализации. Полученные данные существенно уточняют условия формирования пегматитов в палеопротерозойских мафитовых интрузиях Онежской структуры, подтверждают факт первичной контаминации мафитового расплава с существенным его обогащением H_2O, F, Cl. Высокий уровень хлора до 0,5% фиксируется в амфиболах как из зон альбититов, так и непосредственно в габбродолеритах. Дальнейшая эволюция интрузивного комплекса проходила в режиме закрытой магматической системы, при этом обнаружение паризита и алланита свидетельствует о редкоземельной специализации завершающего этапа его кристаллизации. Полученные выводы имеют значение для понимания механизмов концентрирования редких элементов в флюидно-магматических системах основного состава.

Ключевые слова: Ропручейский силл; габбродолериты; пегматиты; Онежская структура; палеопротерозой; зональность; миароловые полости; флюидно-магматическая система

Для цитирования: Светов С. А., Светова Е. Н. Минералогия и условия образования пегматитовых линз в палеопротерозойских габбродолеритах Ропручейского силла (Онежская структура, Карельский кратон) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 73–90. doi: 10.17076/geo2440

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН.

S. A. Svetov*, E. N. Svetova. MINERALOGY AND CONDITIONS OF FORMATION OF PEGMATITE LENSE IN PALEOPROTEROZOIC GABBRODOLERITES OF THE ROPRUCHI SILL (ONEGA BASIN, KARELIAN CRATON)

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), ssvetov@krc.karelia.ru

The article presents the results of a field and mineralogical study of a large pegmatite lens identified in the upper part of the Paleoproterozoic (1.77–1.75 Ga) Ropruchey gabbrodolerite sill (Kokkarevo area, Onega Basin, Karelian Craton). The pegmatite lens is about 3 m thick, exhibits differentiated internal structure, and represents a typical example of pegmatite bodies developed at the second sill level of the Ropruchey gabbrodolerite complex. Mineralogical mapping using optical and scanning electron microscopy with EDS analysis revealed a consistent succession of mineral assemblages: from contact metasomatites through K-feldspar-albite pegmatites to albite-quartz central zones with myrmekites, and terminating epidote-quartz miarolitic cavities. Analysis of mineral composition variations in both pegmatites and host gabbrodolerites allowed us to propose a model for the evolution of the fluid-magmatic system: from crystallization of the gabbroic melt through emplacement of the fluid-saturated pegmatite melt and metasomatic reworking of the contact zone, followed by hydrothermal REE-F-Cl mineralization. The obtained data significantly refine the formation conditions of pegmatites in Paleoproterozoic mafic intrusions of the Onega Basin, and confirm the primary contamination of the mafic melt with substantial enrichment in H_2O, F, and Cl. High chlorine contents up to 0.5 % are recorded in amphiboles from both albitite zones and the gabbrodolerites themselves. Further evolution of the intrusive complex proceeded in a closed magmatic system, while the discovery of parisite and allanite indicates REE specialization of the final crystallization stage. The dates are relevant for understanding the mechanisms of rare-element concentration in fluid-magmatic systems of mafic composition.

Keywords: Ropruchey sill; gabbrodolerites; pegmatites; Onega Basin; Paleoproterozoic; zoning; miarolitic cavities; fluid-magmatic system

For citation: Svetov S. A., Svetova E. N. Mineralogy and conditions of formation of pegmatite lense in Paleoproterozoic gabbrodolerites of the Ropruchi sill (Onega Basin, Karelian Craton). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 73–90. doi: 10.17076/geo2440

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS.

Введение

Пегматиты являются наиболее информативным типом горных пород, отражающим заключительные этапы эволюции магматических систем и их флюидно-метасоматических преобразований [Ферсман, 1931; Таланцев, 1988; London, 2014; Огородников и др., 2020]. Они являются природными концентраторами стратегических металлов – лития, цезия, тантала, ниобия, бериллия, олова и редкоземельных элементов, что определяет высокую экономическую значимость пегматитов в связи с растущим спросом на критическое минеральное сырье, развитием высокотехнологичных отраслей промышленности и «зеленой» энергетики [Černý, 1991a, b; Огородников и др., 2020]. Изучение зональности и парагенетических ассоциаций пегматитов позволяет реконструировать физико-химические условия кристаллизации пород, оценить роль летучих компонентов в этом процессе и описать механизмы концентрирования редких элементов [Ферсман, 1931; Гинзбург и др., 1979; Simmons, Webber, 2008]. В связи с этим пегматитовые тела выступают в качестве уникальных «природных лабораторий» для исследования петрогенетических и рудообразующих процессов.

Габбропегматитовые линзы, часто формирующиеся в габбродолеритовых интрузиях,

представляют собой уникальный тип магматических пород, сочетающих в себе черты глубинных и жильных образований, что делает их исключительно информативным объектом для изучения процессов магматической дифференциации, кристаллизации и гидротермальной минерализации [Ферсман, 1931; Гродницкий, Полин, 1975 и ссылки там же; Гинзбург и др., 1979; Таланцев, 1988; Černý, 1991a, b; London, 2014; Wise et al., 2022].

Объектом данного исследования является палеопротерозойский Ропручейский силл габбродолеритов, расположенный в Южной Карелии, являющийся одним из самых крупных интрузивных комплексов в Онежской структуре. Его суммарная мощность превышает 200 м, а площадь распространения более 2000 км^2 [Афанасьев и др., 2006; Онежская..., 2011].

Несмотря на длительную историю изучения Ропручейского силла, начатую еще в середине XIX века и продолженную в работах К. О. Кратца [Кратц, 1963], Д. И. Гарбара [Гарбар, 1970], минералогия пегматитовых образований в его составе до настоящего времени остается слабо раскрытой. Большинство исследований были направлены на общую характеристику пород интрузии и их практическое использование [Онежская..., 2011 и ссылки там же]. Редкие данные о строении, минералогии и условиях образования пегматитовых линз в интрузиве создают существенный пробел в понимании эволюции всей магматической системы.

Изучение минералогии пегматитовых линз в составе Ропручейского силла имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. С фундаментальной точки зрения, эти образования отражают заключительные этапы кристаллизации мафитовой магмы, существенно обогащенной летучими компонентами. Детальный анализ минерального состава пегматитов, описание их структурно-текстурных особенностей и зональности позволит реконструировать физико-химические условия формирования интрузива, оценить его металлогенические перспективы. Прикладной аспект исследований связан с тем, что данный комплекс является промышленно значимым объектом, так как к нему приурочен ряд месторождений каменных строительных материалов – облицовочного камня и щебня [Минерально-сырьевая..., 2006]. В верхней части силла, где локализованы пегматитовые шлиры, породы характеризуются повышенной трещиноватостью и значительной изменчивостью физико-механических свойств, что отрицательно влияет на качество конечного строительного минерального сырья. Выделение пегматитовых участков позволяет существенно оптимизировать горнопромышленные работы.

Цель данного исследования – детальная минералогическая характеристика крупной пегматитовой линзы в Ропручейской пластовой интрузии, выявление ее зональности и оценка условий образования внутренней расслоенности.

Геологическое строение Онежской структуры и интрузивного комплекса

Онежская палеопротерозойская структура (ОС) локализована в юго-восточной части Фенноскандинавского щита (рис. 1), перекрывает с угловым несогласием и областями размыва фундамент Карельского кратона, представленный мезо-неоархейскими гранит-зеленокаменными комплексами [Геология..., 1987; Онежская..., 2011; Melezhik et al., 2013].

ОС сформирована серией вулканогенно-осадочных образований возрастом от 2,5 до 1,7 млрд лет, ее площадь составляет более 35 тыс. км^2. Вулканогенно-осадочные образования ОС делятся на шесть горизонтов [Онежская..., 2011]: сумийский (2,5–2,4 млрд лет), сариолийский (2,4–2,3 млрд лет), ятулийский (2,3–2,1 млрд лет), людиковийский (2,1–1,9 млрд лет), калевийский (1,92–1,8 млрд лет) и вепсийский (~1,8 млрд лет).

Главные магматические события в ОС связаны с формированием крупных магматических провинций во временных интервалах: 2,5–2,4 млрд лет (андезибазальтовой), 2,3–2,1 млрд лет (базальтовой), 2,05–1,97 млрд лет (пикробазальтовой). Завершающий этап магматизма в ОС приурочен к Свекофеннской орогении (1,77–1,75 млрд лет) и представлен локально интрузивным комплексом габбродолеритов в юго-западном борту ОС, внедренным в терригенные толщи Вепсийского горизонта [Онежская..., 2011; Куликов и др., 2017].

Терригенные породы вепсийского горизонта в ОС формируют Южно-Онежскую мульду. В ее центральной части породы имеют горизонтальное залегание, на восточном крыле пологое 10–12°, а на западном – близкое к субвертикальному. Мульда осложнена сбросами СЗ простирания и расчленена на мелкие блоки системой разрывных нарушений СВ простирания. Терригенные толщи представлены петрозаводской (основание разреза) и шокшинской (верхняя часть разреза) свитами [Галдобина, Михайлюк, 1966; Негруца, 1984; Онежская..., 2011; Melezhik et al., 2013; Kuznetsov et al., 2023].

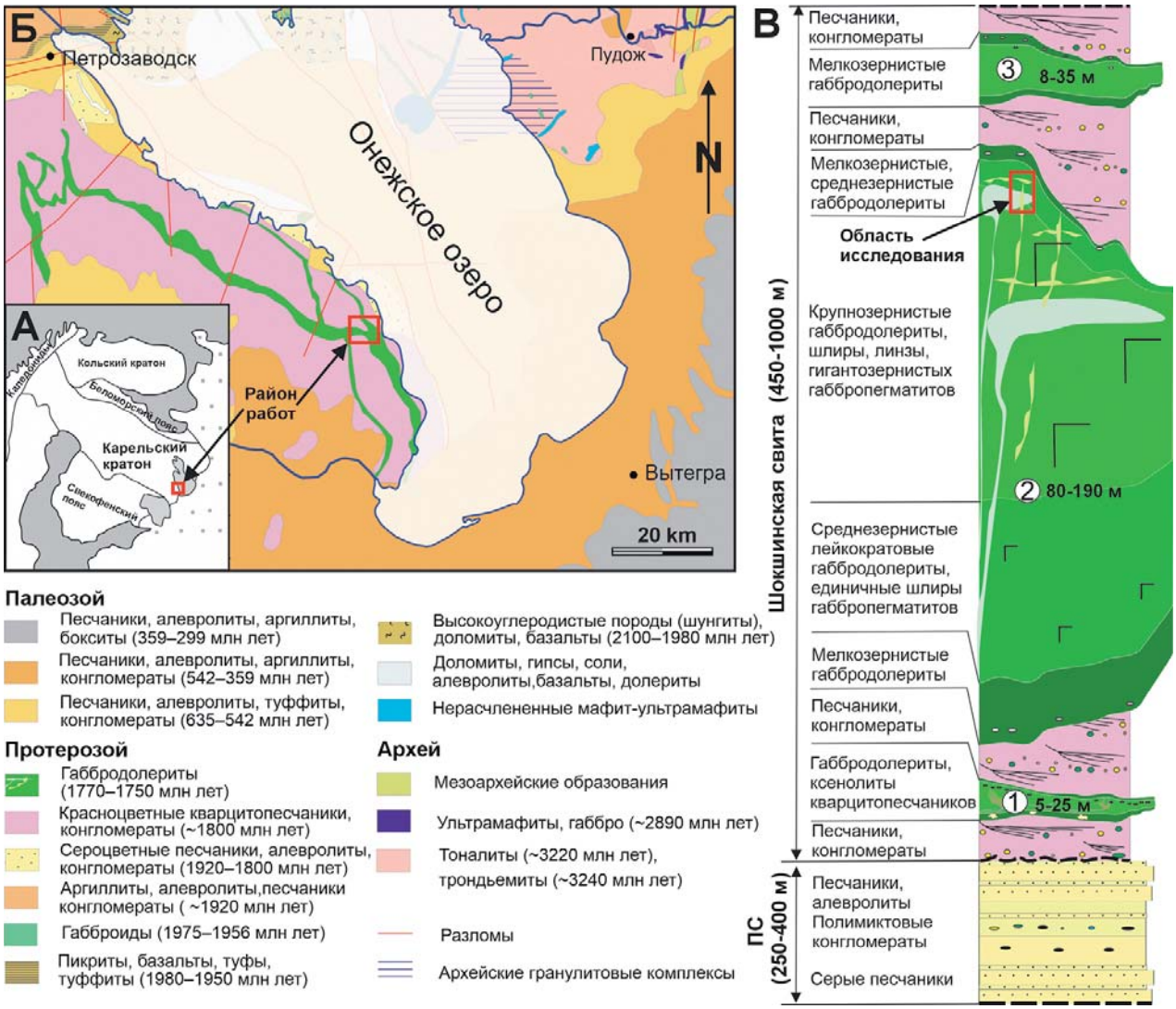


Рис. 1. А – положение Онежской структуры на Фенноскандинавском щите; Б – Геологическая схема Юго-Западного борта Онежской структуры; В – унифицированный стратиграфический разрез вепсийского (~1,8 млрд лет) горизонта в Онежской структуре на основе данных [Онежская..., 2011; Melezhik et al., 2013; Куликов и др., 2017] с добавлениями авторов. 1–3 – выделяемые уровни силла, пояснения в тексте. ПС – петрозаводская свита

Fig. 1. А – position of the Onega Basin on the Fennoscandian Shield; Б – geological scheme of the southwestern side of the Onega Basin; В – unified stratigraphic section of the Vepsian (~1.8 Ga) horizon in the Onega Basin based on data from [Onega..., 2011; Melezhik et al., 2013; Kulikov et al., 2017] with additions by the authors. 1–3 – distinguished sill levels, see explanations in the text. ПС – Petrozavodsk Formation

Петрозаводская свита выделена в р-не г. Петрозаводска и развита по западному берегу Онежского озера [Галдобина, Михайлюк, 1966]. Мощность разреза варьирует от 250 до 1000 м [Онежская..., 2011]. В основании ее залегает пачка крупно- и среднезернистых полевошпат-кварцевых песчаников с косой и горизонтальной слоистостью. Средняя часть разреза сформирована серыми полевошпат-кварцевыми песчаниками. В цементе песчаников присутствует тонкозернистое углеродистое вещество (шунгит) и халцедон. Выше разрез представлен серыми, розовато-серыми, серыми, бурыми полевошпат-кварцевыми и кварцевыми песчаниками и алевролитами. В разрезе присутствуют прослои полимиктовых конгломератов, в составе обломков которых доминируют базальты, плагиобазальты, шунгиты, т. е. породы, характерные для подстилающих горизонтов людиковия и калевия Онежской структуры.

Шокшинская свита обнажается в р-не д. Шокши (южная Карелия) [Тимофеев, 1935; Геология, 1987], ее образования распространены на западном побережье Онежского озера.

В основании свиты залегает слой мелкогалечных конгломератов, перекрывающий с размывом отложения петрозаводской свиты. Мощность шокшинской свиты варьирует от 450 до 900 м. Нижнюю часть разреза формируют бледно-сиреневые кварцитопесчаники, выше последовательно залегает: пачка переслаивания красноцветных алевролитов, мелкозернистых песчаников, малиновых кварцитопесчаников. На разных уровнях разреза встречаются тонкие прослои гравелитов и конгломератов. Характерной чертой пород свиты являются доминирующий кварцевый состав обломочного материала, ярко-красная окраска и широкая фациальная изменчивость пород, поскольку осадконакопление происходило в континентальных условиях.

Габбродолеритовый интрузивный комплекс сформирован многоуровневым латерально протяженным силлом, интрудированным в шокшинскую терригенную толщу (рис. 1, В).

Уровень 1. В нижней части разреза шокшинской свиты в разрезах Другорецкого и Ропручейского кряжей установлен горизонт основных пород – мелкозернистых габбро-долеритов мощностью от 5 до 25 м [Светов, 1979]. Данный горизонт рассматривается в качестве апофиза более мощного, вышележащего силла [Онежская..., 2011], однако, в части работ был описан как лавовый покров [Кайряк, 1973; Светов, 1979]. Горизонт в подошве содержит ксенолиты подстилающих красно-бурых кварцитопесчаников, в кровле имеет кварц-хлоритовые и кварц-гематитовые миндалины, а также области активной хлоритизации, эпидотизации. В средней его части установлены порфировые выделения плагиоклаза, заключенные в хлоритизированную средне-мелкозернистую основную массу.

Уровень 2. Наиболее широкое площадное распространение в западном борту ОС имеют габбродолериты данного стратиграфического уровня, известные в литературе под термином «Ропручейская пластовая интрузия / силл». По данным бурения, геологического и геофизического картирования [Онежская..., 2011; Рязанцев, 2012], общая площадь распространения габбродолеритов 2-го уровня превышает 10 тыс. км^2 при мощности интрузии от 80 до 190 м. Силл выклинивается по латерали, с нижнего уровня на середину разреза вмещающей шокшинской свиты в СЗ направлении. Для Ропручейского силла характерна внутренняя расслоенность:

в нижней части силла, в зоне контакта с вмещающими кварц-полевошпатовыми песчаниками, наблюдаются мелкозернистые однородные долериты, содержащие редкие округлой формы кварц-хлоритовые, хлоритовые и хлорит-эпидотовые обособления (миндалины), заключенные в микродолеритовую основную массу с редкими оплавленными микролитами плагиоклаза и пироксена. На отдельных участках выявлены крупные (до 1,5–2,0 мм) вкрапленники пироксена и плагиоклаза. Мощность зоны менее 5 м;

основание средней части интрузивного тела характеризуется переходом от мелкозернистых к среднезернистым меланократовым габбродолеритам, однородным, иногда имеющим шлировые текстуры, образованным скоплениями плоскопараллельных кристаллов пироксена и плагиоклаза. Мощность зоны менее 10 м;

средняя часть силла сформирована среднезернистыми и неравномернозернистыми кварцевыми габбродолеритами, в которых присутствуют многочисленные латерально протяженные линзовидные зоны мезократовых – лейкократовых крупнозернистых габбропегматитов, ориентированных чаще всего параллельно пластовой отдельности. Мощность данного участка может достигать 100–120 м;

в кровельной части силла установлен переход от неравномернозернистых, крупнозернистых габбродолеритов к мелкозернистым однородным меланократовым разностям. Кровельная зона силла имеет ярко проявленную плитчатую пластовую отдельность. На некоторых участках кровли выявлены миндалины размером до 1 см с кварцевым заполнением. Мощность кровельной зоны не превышает 10 м.

В средней и верхней частях силла присутствует система маломощных 0,1–0,5 м мелкозернистых и грубозернистых лейкократовых прожилков, впервые установленных С. А. Яковлевым в 1903 году и описанных им как диабаз-аплиты [Онежская..., 2011]. Прожилки располагаются как параллельно основанию силла, так и перпендикулярно ему, имеют альбит-роговообманковый состав, при этом от вмещающих пород отличаются контрастным розовато-серым цветом. По составу породы жил идентичны кислому гранофировому веществу из кровельных крупнозернистых кварцевых габбродиоритов и гигантозернистых габбропегматитов [Онежская..., 2011].

Уровень 3. В верхней части разреза шокшинской свиты присутствует еще один уровень габбродолеритовой пластовой интрузии, являющийся апофизом основного тела, имеющего мощность от 8 до 35 м. Габбродолериты данного уровня имеют мелко-среднезернистую структуру, широко проявленные зоны хлоритизации и эпидотизации, а в подошве содержат ксенолиты подстилающих кварцитопесчаников.

Абсолютный возраст пород габбродолеритового интрузивного комплекса оценивается в интервале 1,77–1,75 млрд лет (по данным изотопного датирования циркона – 1770 ± 12 млн лет и бадделеита – 1751 ± 3 млн лет) [Бибикова и др., 1990; Lubnina et al., 2012].

Объект и методы исследования

Объектом исследования является протяженная линза крупно-гигантозернистых пегматитов, осложненная системой жилоподобных образований альбититов, вскрытая в кровельной части Ропручейской пластовой интрузии в ходе буровзрывных работ на карьере предприятия ООО «Карелкамень» в 2024 году. Территориально данный объект находится вблизи д. Коккарово в Прионежском р-не Республики Карелия, стратиграфически – относится к кровельной части 2-го уровня Ропручейского силла. Полевые изыскания включали картирование пегматитовой линзы и отбор образцов для минералого-петрографического исследования. Петрографическое изучение шлифов выполнено на оптическом микроскопе ПОЛАМ Р-211. Анализ морфологии и химического состава породообразующих и акцессорных минералов проведен на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350 с использованием напыленных углеродом шлифов и аншлифов. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 20 мА, диаметре пучка 2 мкм и времени накопления спектров 90 сек. В качестве стандартов использованы кальцит, альбит, волластонит, MgO, Al_2O_3, SiO_2, FeS_2, Fe, Zn, InAs. Для оценки температуры кристаллизации минеральной пары ильменит-магнетит и расчета показателя кислородного потенциала использована программа ILMAT 1.20 [Lepage, 2003]. Температура кристаллизации кобальтина рассчитана с помощью кобальтинового термометра [Klemm, 1965]. Все аналитические исследования выполнены в Аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН (г. Петрозаводск).

Результаты

Габбродолериты силла. Окружающие пегматитовую линзу породы представлены среднезернистыми, крупнозернистыми, серо-черными или зеленовато-черными габбродолеритами с массивной текстурой. Главные породообразующие минералы габбродолеритов: пироксены (пижонит, авгит, клиноферросилит) и плагиоклаз (лабрадор – олигоклаз). Вторичные и акцессорные минералы представлены Са-амфиболами (актинолитом, Fe-актинолитом, гастингситом), биотитом и стильпномеланом (формирующим обрастания по титаномагнетиту), кварцем, пиритом, цирконом, апатитом (с содержанием 3,7 % F, 0,5 % Cl), рудные минералы – ильменитом (содержит MnO до 0,9 %) и титаномагнетитом (содержит MnO до 0,4 % и V_2O_5 до 2 %).

По данным расчетов в программе ILMAT 120 [Lepage, 2003], образование ильменит-титаномагнетитовой ассоциации габбродолеритов происходило при температуре 515–670 °С и фугитивности кислорода – $logfO_2$ –21…–27. Исходный титаномагнетит (TiO_2 3–17 %) преимущественно имеет форму октаэдрических кристаллов с закономерно ориентированными структурами распада твердого раствора (рис. 3, Б, В). В породе проявлены структуры сегрегационного обособления ильменита в титаномагнетите (рис. 3, А, В), наблюдается развитие биотита и стильпномелана по рудным минералам (иногда с образованием симплектитовых срастаний ильменита и биотита), маркирующих постмагматические преобразования пород под действием флюидов, обогащенных K и H_2O.

Рассматриваемая пегматитовая линза характеризуется субгоризонтальным простиранием с варьирующей мощностью от 0,8–1,2 до 2,5–3 м в зонах «раздувов» (рис. 2, В). По простиранию линза имеет маломощные (< 1 м) ответвления субвертикальной ориентировки. Габбродолериты рядом с пегматитовой линзой пронизываются системой тонких трещин, по которым наблюдается развитие грубозернистых пегматитоподобных прожилков мощностью до 10 см, сформированных микроклином, кварцем, амфиболом.

Пегматитовая линза имеет следующее дифференцированное строение:

Приконтактовая область пегматитовой линзы с вмещающим телом габбродолерита характеризуется прямолинейной границей, сложена крупнозернистым габбропегматитом серо-зеленого цвета (рис. 2, Б). Мощность приконтактовой области составляет около 10–30 см (рис. 2, Е). Основными породообразующими минералами габбропегматитов являются Са-амфиболы (Ti-гастингсит, гастингсит, Fe-роговая обманка, Fe-актинолит, актинолит) с реликтами пироксенов, эпидот и кварц. В них присутствуют мелкие изометричные вростки плагиоклаза (альбита). Второстепенные минералы представлены хлоритом, кальцитом, апатитом, цирконом, ильменитом (MnO 3,5 %), существенно замещенным титанитом, пиритом, кобальтином (рис. 4). Кобальтин отмечается в виде изометричных единичных кристаллов размером

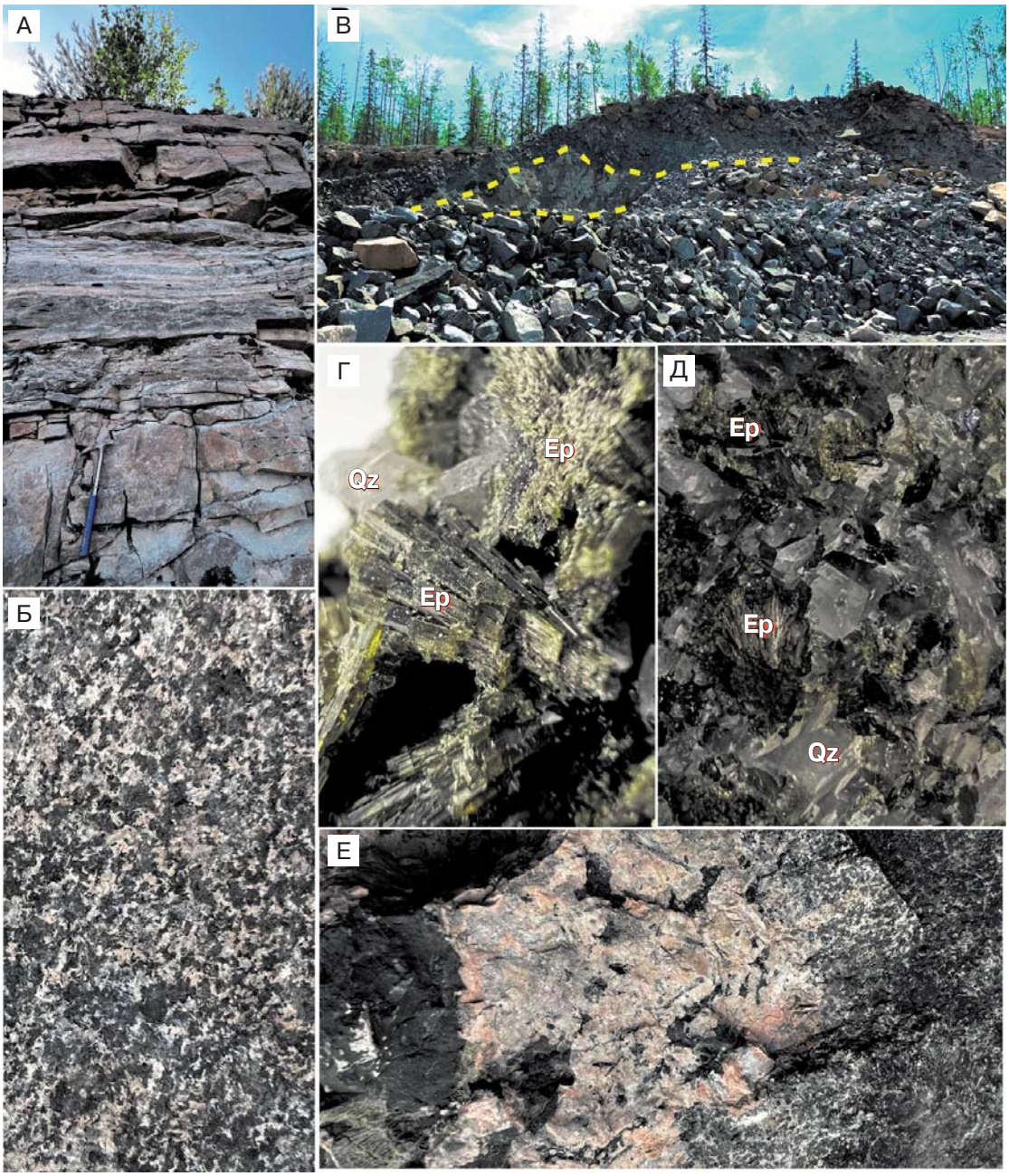


Рис. 2. Породные литотипы, вскрытые в верхней части разреза Ропручейского кряжа в карьере предприятия ООО «Карелкамень» (д. Коккарово, Прионежский р-н Республики Карелия): А – вмещающие вепсийские толщи бурых, красных кварцитопесчаников шокшинской свиты с прямой и косой слоистостью; Б – габбропегматит переходной зоны от силла к пегматитовой линзе, верхняя часть основного силла (2 уровень), штуф 5 × 10 см; В – вскрытая кровельная часть силла с выходом светлой крупнозернистой пегматитовой линзы (показана штриховой линией); Г–Д – кристаллы эпидота (Ep), кварца (Qz) в миароловой полости, штуфы 2 × 3 см; Е – краевая область пегматитовой линзы, переход от краевого среднезернистого габбродолерита (правая часть фото) к альбититу (левая часть фото), штуф 40 × 20 см

Fig. 2. Rock lithotypes exposed in the upper part of the Roprucheysky Ridge section in the Karelkamen quarry (Kokkarovo village, Prionezhsky District, Republic of Karelia): A – host Vepsian strata of brown and red quartzite sandstones of the Shoksha Formation with direct and oblique bedding; Б – gabbropegmatite of the transition zone from the sill to the pegmatite lens, the upper part of the main sill (2nd level), 5 × 10 cm sample; B – exposed roof part of the sill with an outcrop of the light-colored coarse-grained pegmatite lens; Г–Д – crystals of epidote, quartz, calcite in a miarolitic cavity, sample 2 × 3 cm; E – marginal area of the pegmatite lens, transition from marginal medium-grained gabbrodolerite (right side of the photo) to albitite (left side of the photo), sample 40 × 20 cm

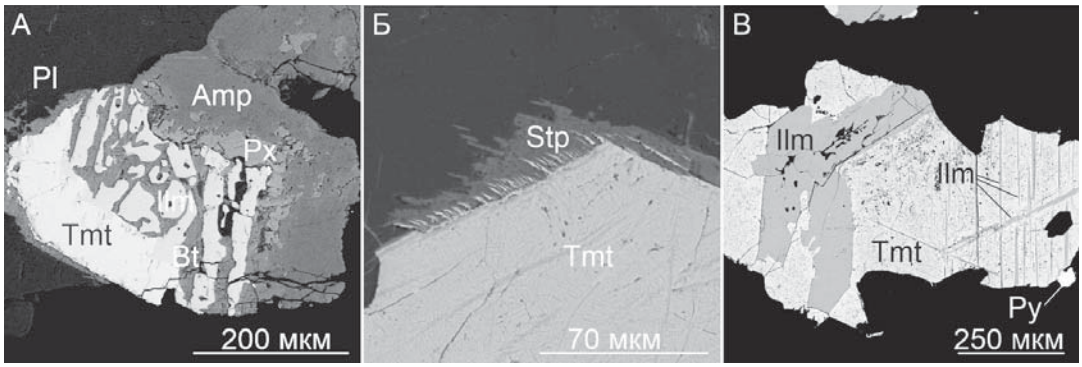


Рис. 3. BSE-изображения зерен титаномагнетита в габбродолерите Ропручейского силла: А – графические срастания титаномагнетита (Tmt), ильменита (Ilm) и биотита (Bt) в ассоциации с амфиболом (Amp); Б – закономерно ориентированные структуры распада в титаномагнетите, обрастающем стильпномеланом; В – тонкие ламели ильменита (справа) и крупные ильменитовые обособления (слева) в титаномагнетите

Fig. 3. BSE-images of titanomagnetite grains in the gabbrodolerite of the Ropruchey sill: A – graphic intergrowths of titanomagnetite (Tmt), ilmenite (Ilm) and biotite (Bt) in association with amphibole (Amf); Б – regularly oriented exsolution structures in titanomagnetite overgrown with stilpnomelane; B – thin ilmenite lamellas (right) and large ilmenite segregations (left) in titanomagnetite

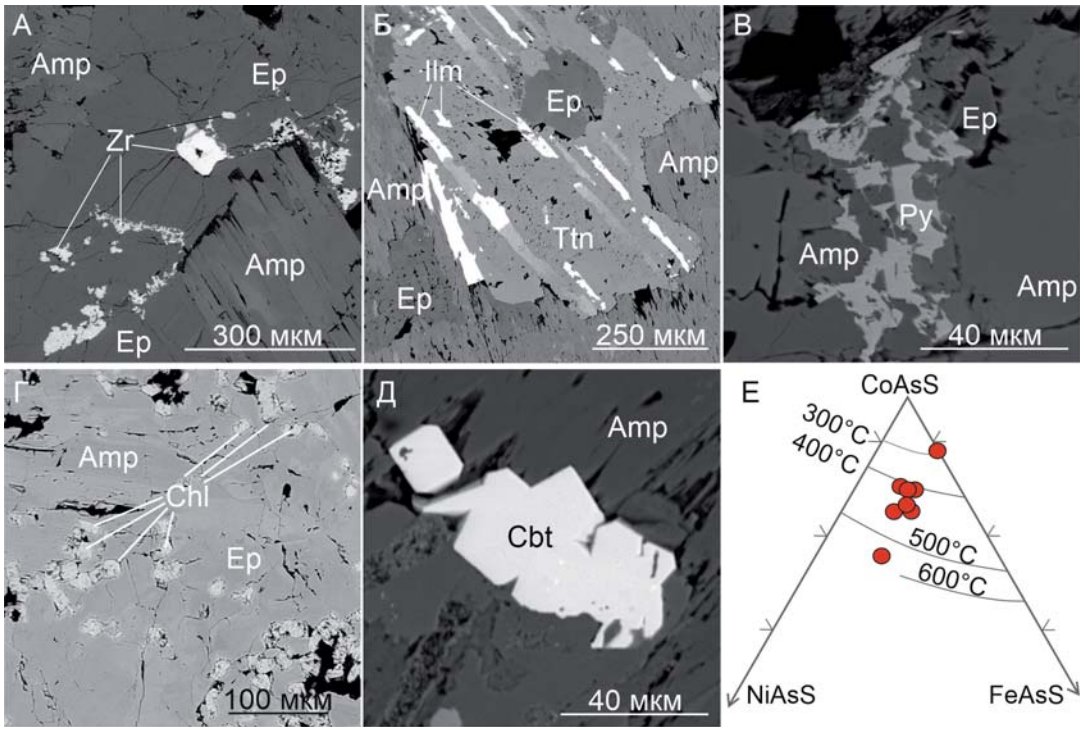
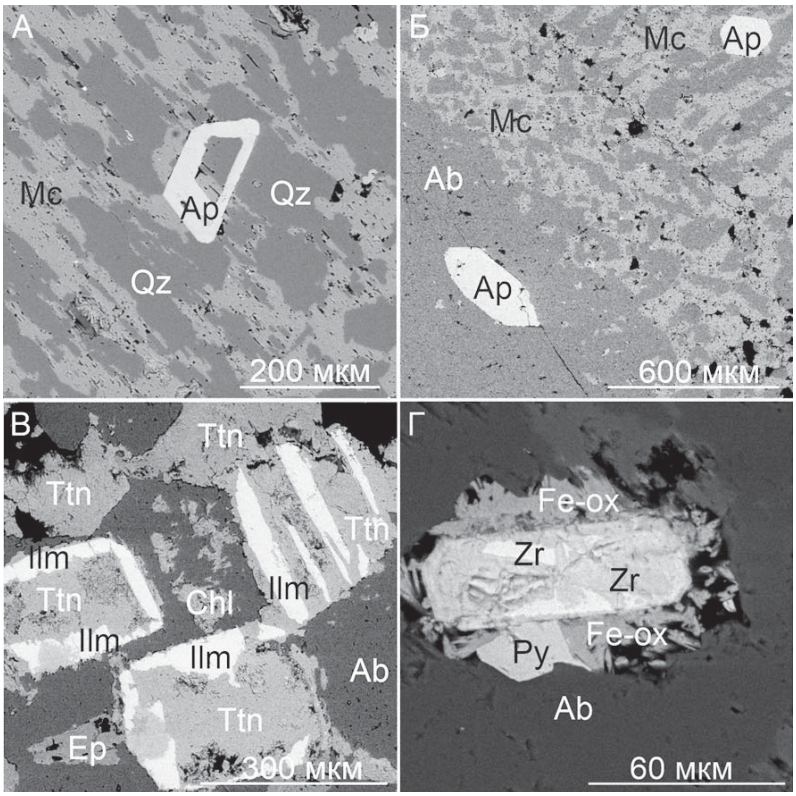


Рис. 4. BSE-изображения породообразующих минералов в приконтактовой области пегматитовой линзы с вмещающим телом габбродолерита. А – зерна цирконов (Zr) в ассоциации с эпидотом (Ep) и амфиболом (Amp); Б – зерно титанита (Ttn) с реликтами ильменита и новообразованным эпидотом в ассоциации с амфиболом; В – область развития пирита; Г – скопления чешуек хлорита в ассоциации с эпидотом; Д – агрегат кристаллов кобальтина (Cbt) в амфиболе габбропегматита; Е – состав кобальтина габбропегматитов на диаграмме устойчивости фаз CoAsS-FeAsS-NiAsS [Klemm, 1965]

Fig. 4. BSE-images of rock-forming minerals in the near-contact area of a pegmatite lens with a host gabbro-dolerite body. A – zircon (Zr) grains in association with epidote and amphibole; Б – titanite grain with ilmenite relics and newly formed epidote (Ep) in association with amphibole (Amp); B – pyrite development area; Г – chlorite flake clusters in association with epidote; Д – cobaltite (Cbt) crystal aggregate in amphibole of gabbro-pegmatite; E – cobaltite composition of gabbro-pegmatites on the CoAsS-FeAsS-NiAsS phase stability diagram [Klemm, 1965]

Рис. 5. BSE-изображения минеральной ассоциации краевой части пегматитовой линзы: А – микропегматитовая текстура с закономерными срастаниями кварца (Qz) и полевого шпата (Mc); Б – зерна апатита (Ap) в пределах пертитовых срастаний альбита (Ab) и полевого шпата; В – скелетные кристаллы ильменита (Ilm), замещаемые титанитом (Ttn); Г – кристалл циркона (Zr) содержит реликтовые (белые) участки и измененные области (серые) с примесью Ce, Nd, Hf и Ca, обрастающий оксидами железа (Fe-ox)

Fig. 5. BSE-images of the mineral association of the marginal part of the pegmatite lens: A – micropegmatite texture with regular intergrowths of quartz (Qz) and feldspar (Mc); Б – apatite (Ar) grains within perthitic intergrowths of albite (Ab) and feldspar; B – skeletal crystals of ilmenite (Ilm) replaced by titanite (Ttn); Г – zoned zircon crystal (Zr) contains relict (white) areas and altered regions (gray) with an admixture of Ce, Nd, Hf and Ca, overgrown with iron oxides (Fe-ox)



до 60 мкм, а также их сростков, содержит примесь Fe (3,1–5,2 мас.%) и Ni (0–8,2 мас.%). Эмпирическая формула кобальтина ($Co_{0,69–0,89}Fe_{0,09–0,15}Ni_{0–0,23}$) $As_{0,93–0,97}S_{0,98–1,06}$. Температурный диапазон кристаллизации минерала, определенный по кобальтиновому геотермометру [Klemm, 1965], дает широкий интервал значений от 550 до 300 °С (рис. 4, Е).

Краевая часть линзы пегматитов. По удалению от контакта, пегматитовая линза приобретает яркую розоватую окраску, крупнокристаллическое, типичное для пегматитов строение. В краевой части линзы, за счет концентрирования темноцветных минералов, проявлена пятнистая текстура породы (см. рис. 2, Е). Основными породообразующими минералами являются калиевый полевой шпат, альбит, кварц и амфибол. Амфибол образует вытянутые таблитчатые кристаллы, по составу отвечающие Ti-гастингситу и Fe-актинолиту. При микроскопическом исследовании локально устанавливается микропегматитовая текстура с закономерными кварц-полевошпатовыми срастаниями и пертитовая текстура с взаимным прорастанием калиевого полевого шпата и альбита (рис. 5, А, Б). В ассоциации с амфиболом отмечаются сростки крупноигольчатых кристаллов эпидота. В числе второстепенных минералов установлены ильменит и пирит. Ильменит повсеместно замещается титанитом, образуя скелетные кристаллы (рис. 5, В). Пирит фиксируется в виде отдельных, чаще изометричных зерен. В составе акцессорных минералов отмечены циркон и апатит (рис. 5, Б, Г). Циркон представлен призматическими кристаллами с выделяемыми светлыми и темными участками в структуре минерала, часто находится в ассоциации с пиритом и обрастает оксидами железа. Цирконы содержат до 3,3 % – CeO_2, до 3,2 % – NdO_2, до 3,4 % – CaO, до 1,6 % – HfO_2. Апатит образует крупные изометричные или игольчатые зерна размером до 1 мм.

Центральная область пегматитовой линзы характеризуется крупно-гигантозернистой структурой, с элементами графической, и отличается практически полным отсутствием темноцветных минеральных фаз. Породообразующий парагенез представлен альбитом, калиевым полевым шпатом и кварцем (рис. 6). Альбит образует пластинчатые и таблитчатые кристаллы. Микроскопически диагностируются участки микропегматитовых срастаний кварца с калиевым полевым шпатом (рис. 6, А), а также характерные мирмекитовые структуры – червеобразные вростки кварца в альбите. В породе широко проявлены процессы эпидотизации (рис. 6, А, Б), эпидот образует зерна разнообразной морфологии – от удлиненно-

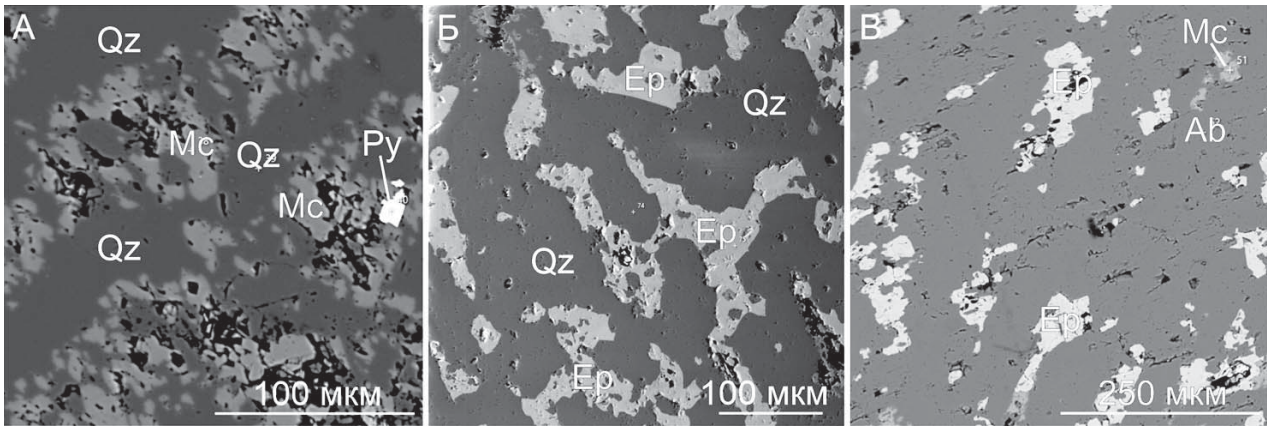


Рис. 6. BSE-изображения, иллюстрирующие микротекстуры центральной области пегматитовой линзы: А – микропегматитовые срастания кварца (Qz) и полевого шпата (Mc); Б – эпидотизация (Ep) кварца; В – эпидотизация крупнокристаллического альбита (Ab)

Fig. 6. BSE-images illustrating microtextures of the central part of the pegmatite lens: A – micropegmatite intergrowths of quartz (Qz) and feldspar (Mc); Б – epidotization (Ep) of quartz; B – epidotization of coarse-crystalline albite (Ab)

пластинчатых до округлых и изометричных. Крупные выделения эпидота совместно с кварцем формируют гнездовые скопления и тонкие прожилки (рис. 7). Кварц представлен двумя генерациями. Ранняя генерация выполнена червеобразными выделениями, входящими в состав мирмекитовых и графических срастаний с полевыми шпатами (см. рис. 6, А). Поздняя – образует секущие кварцевые прожилки и сложена изометричными зернами размером от 0,2 до 1,6 мм с неровными, извилистыми границами, что свидетельствует об их кристаллизации в условиях дефицита свободного пространства (см. рис. 7). Акцессорный минеральный ряд включает титанит (с реликтами ильменита), пирит, апатит и циркон.

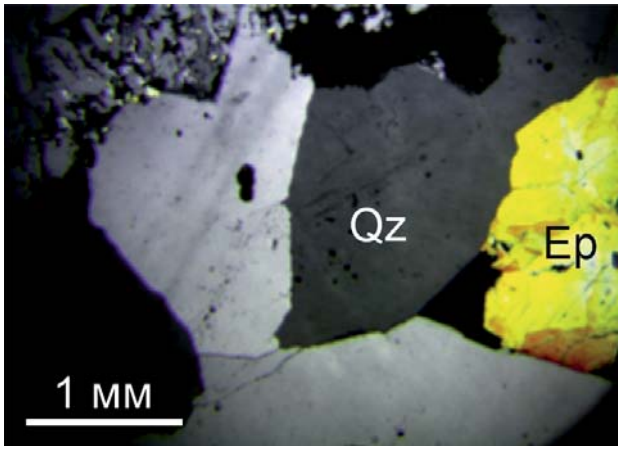


Рис. 7. Прожилок кварца (Qz) с эпидотом (Ep) в центральной части пегматитовой линзы. В левом верхнем углу мелкие изометричные зерна эпидота в полевом шпате. Фото шлифа в скрещенных николях

Fig. 7. A vein of quartz (Qz) with epidote (Ep) in the central part of a pegmatite lens. Small isometric grains of epidote in feldspar are in the upper left corner. Photo of a thin section in crossed polars

Миароловые полости в пегматитах Ропручейского силла выполнены эпидот-кварцевыми агрегатами. Срастания кристаллов кварца с эпидотом формируют контрастную минеральную ассоциацию, в которой кварц выступает в качестве структурного фона, а эпидот – доминирующим цветовым акцентом (см. рис. 2, Г, Д). Эпидот представлен радиально-лучистыми агрегатами, сложенными хорошо ограненными длиннопризматическими кристаллами насыщенного фисташково-зеленого цвета. Размер отдельных индивидов по удлинению достигает 2–3 см. Кварц присутствует в полостях в объемных соотношениях, сопоставимых с эпидотом. Кристаллы кварца имеют хорошо выраженную призматическую форму с ромбоэдрической головкой. Они преимущественно полупрозрачны, дымчато-серой окраски; средний размер кристаллов варьирует от 0,5 до 2 см, при этом отдельные индивиды достигают 7–10 см. В наиболее крупных кристаллах макроскопически диагностируются темноцветные минеральные включения (рис. 8). Согласно данным СЭМ-ЭДС анализа, включения размером от 20 мкм до 1,5 мм представлены сростками и отдельными зернами Ca-амфиболов (актинолита, гастингсита, роговой обманки) с реликтами авгита, а также эпидота, альбита, хлорита, титанита, циркона и апатита. Состав включений идентичен минеральному парагенезису самих пегматитов и вмещающих габбродолеритов,

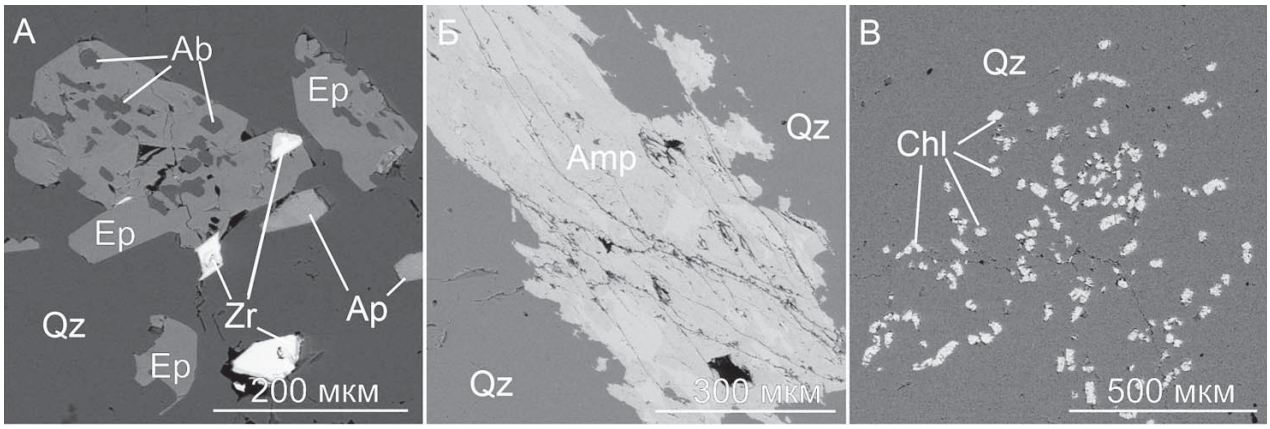


Рис. 8. BSE-изображения микровключений породообразующих минералов в кристаллах кварца (Qz) из миароловой полости в пегматите: А – кристаллы эпидота (Ep) с включениями альбита (Ab), зерна апатита (Ap) и зонального циркона (Zr); Б – неоднородный кристалл амфибола (Amf); В – сыпь чешуек хлорита (Chl)

Fig. 8. BSE-images of microinclusions of rock-forming minerals in quartz crystals (Qz) from a miarolitic cavity in a pegmatite: A – epidote crystals (Ep) with inclusions of albite (Ab), grains of apatite (Ap) and zoned zircon (Zr); Б – heterogeneous crystal of amphibole (Amf); B – accumulation of chlorite flakes (Chl)

что позволяет предполагать их захват флюидной фазой в процессе роста кристаллов кварца.

В ассоциации с кварцем и эпидотом в полостях также диагностируются агрегаты крупнокристаллического кальцита. Судя по структурным взаимоотношениям, кальцит формировался на завершающей стадии эволюции миароловых полостей в результате поступления обогащенных кальцием гидротермальных растворов в остаточное свободное пространство.

Среди второстепенных минералов в миароловых полостях установлены циркон, пирит, хлорит, апатит, паризит, алланит и титанит (рис. 9). Большинство зерен циркона (размером 20–200 мкм) характеризуются пятнистой структурой (рис. 9, А). В составе их измененных участков фиксируются примеси: CaO (до 2,8 %), Ce_2O_3 (до 2,9 %) и Nd_2O_3 (до 3 %). Пирит встречается как в виде изометричных зерен размером 20–60 мкм, так и в форме тонких прожилков в кварце (рис. 9, Б). Хлорит образует рассеянные скопления чешуек в кварце и выполняет микрополости. Зерна апатита размером до 1 мм характеризуются повышенными содержаниями F (до 3,7 %) и Cl (до 0,4 %).

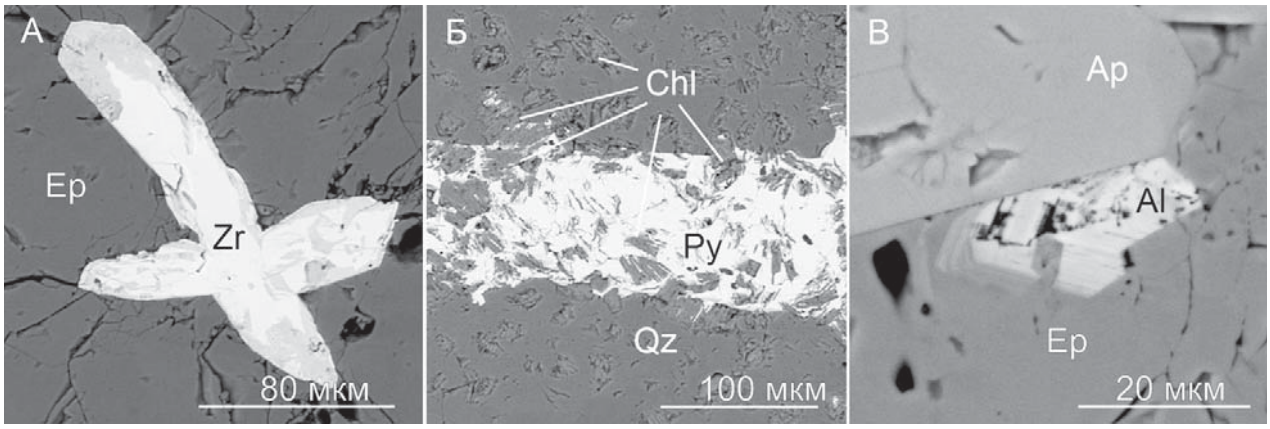


Рис. 9. BSE-изображения второстепенных минералов в кварц-эпидот-кальцитовых миароловых полостях пегматитов: А – сросток кристаллов циркона (Zr) в окружении эпидота (Ep), содержит реликтовые (белые) участки и измененные области (серые) с примесью Ca, Ce, Nd; Б – пирит (Py) в хлоритизированном кварце; В – фрагмент зерна апатита (Ap) в ассоциации с зональным алланитом (Al) и эпидотом

Fig. 9. BSE-images of minor minerals in quartz-epidote-calcite miarolitic cavities of pegmatites: A – intergrowth of zoned zircon crystals (Zr) surrounded by epidote (Ep), contains relict (white) areas and altered regions (gray) with admixture of Ca, Ce, Nd; Б – pyrite (Py) in chloritized quartz; B – fragment of apatite grain (Ap) in association with zoned allanite (Al) and epidote

Обсуждение

Минералогическое изучение пегматитовой линзы, локализованной в пределах второго уровня Ропручейского силла, выявило ее дифференцированное строение и позволило реконструировать многостадийность пегматитообразования. Установленная последовательность минеральных ассоциаций отражает длительную эволюцию магматической системы – от кристаллизации габброидного расплава до завершающих низкотемпературных гидротермальных преобразований (табл.). Ключевыми факторами, контролировавшими этот процесс, выступили длительная фракционная дифференциация габброидов и устойчиво высокий флюидный режим на всех этапах минералообразования. Габбродолеритовый расплав изначально являлся флюидонасыщенным (H_2O, F, Cl). Хлор до 0,5% фиксируется в амфиболах альбититов и габрродолеритов.

Минеральный состав пород Ропручейской интрузии, их возможная связь с этапами кристаллизации и содержания значимых информативных элементов в рудных и акцессорных фазах

Mineral composition of the rocks of the Ropruchey intrusion, their possible relationship with the stages of crystallization and the content of significant informative elements in ore and accessory phases

Породообразующие минералы Rock-forming minerals	Акцессорные минералы Accessory minerals
Габбродолерит Gabbrodolerite	
Магматический этап кристаллизации флюидонасыщенного расплава: пироксен (пижонит, авгит, клиноферросилит), плагиоклаз (№ 52–24: лабрадор → андезин→ олигоклаз), титаномагнетит с TiO_2 4–17%, MnO до 0,4%, V_2O_5 до 2%; с*убсолидусный этап, распад твердых растворов:* ильменит с MnO до 0,9% + магнетит; *Позднемагматический (пегматитовый) этап:* калиевый полевой шпат, кварц (I); *постмагматический метасоматический этап:* Ca-амфиболы (гастингсит → Fe-актинолит → актинолит), биотит; *Гидротермальный этап:* кварц (II), Стильпномелан с Cl до 0,3%	*Магматический этап:* циркон (I), апатит (I); *постмагматический метасоматический этап:* циркон (II) с REE, Ca и Hf; апатит (II) с F 3,7% и Cl 0,3%; *Гидротермальный этап:* пирит, халькопирит
Magmatic stage of fluid-saturated melt crystallization: pyroxene (pigeonite, augite, clinoferrosilite), plagioclase (no. 52–24: labradorite → andesine → oligoclase), titanomagnetite with 4–17% TiO_2, up to 0.4% MnO, and up to 2% V_2O_5; *subsolidus stage, solid-solution unmixing:* ilmenite with up to 0.9% MnO + magnetite; *late-magmatic (pegmatitic) stage:* K-feldspar, quartz (I); *post-magmatic metasomatic stage:* Ca-amphiboles (hastingsite → Fe-actinolite → actinolite), biotite; *hydrothermal stage:* quartz (II), stilpnomelane with up to 0.3% Cl	*Igneous stage:* zircon (I), apatite (I); *postmagmatic metasomatic stage:* zircon (II) with REE, Ca and Hf; apatite (II) with F 3.7% and Cl 0.3%; *Hydrothermal stage:* pyrite, chalcopyrite
Приконтактовая область габбродолеритов с пегматитовой линзой Contact area of gabbrodolerites with a pegmatite lens	
Реликтовый магматический этап: ильменит с MnO 2,3–2,6%; *Ранний метасоматический этап:* Ti-гастингсит → гастингсит → Fe-роговая обманка, титанит с V_2O_5 до 2,1% и кварц (I); *Поздний метасоматический этап:* эпидот, Fe-актинолит, актинолит; *Гидротермальный этап:* кварц (II), хлорит	*Метасоматическо-гидротермальный этап:* кобальтин (с Ni, Fe), апатит (с F 4%), циркон с Ca, пирит, кальцит
Relict magmatic stage: ilmenite with 2.3–2.6% MnO; *Early metasomatic stage:* Ti-hastingsite → hastingsite → Fe-hornblende, titanite with up to 2.1% V_2O_5, and quartz (I); *Late metasomatic stage:* epidote, Fe-actinolite, actinolite; *Hydrothermal stage:* quartz (II), chlorite	*Metasomatic-hydrothermal stage:* cobaltine (with Ni, Fe), apatite (with F 4%), zircon with Ca, pyrite, calcite
Краевая розовая область пегматитовой линзы Marginal pink area of a pegmatite lens	
Реликтовый магматический этап: магнетит, ильменит с MnO 3,5%, титаномагнетит; *Пегматитовый этап:* калиевый полевой шпат, альбит, кварц (I); *Метасоматический этап:* Ti-гастингсит → Fe-актинолит, титанит с V_2O_5 до 2,1%, эпидот; *Гидротермальный этап: к*варц (II), хлорит	*Метасоматическо-гидротермальный этап:* циркон с CaO до 3,4%, CeO_2–2,2%, NdO_2 до 2,6%, апатит с F 4,7%; *Гидротермальный этап:* пирит, Fe-оксиды (обрастания циркона)
Relict magmatic stage: magnetite, ilmenite with 3.5% MnO, titanomagnetite; *Pegmatite stage:* K-feldspar, albite, quartz (I); *Metasomatic stage:* Ti-hastingsite → Fe-actinolite, titanite with up to 2.1% V_2O_5, epidote; *Hydrothermal stage:* quartz (II), chlorite	*Metasomatic-hydrothermal stage:* zircon with up to 3.4% CaO, 2.2% CeO_2, and up to 2.6% NdO_2, apatite with 4.7% F; *Hydrothermal stage:* pyrite, Fe-oxides (coatings on zircon)

Окончание табл.
Table (continued)

Породообразующие минералы Rock-forming minerals	Акцессорные минералы Accessory minerals
Центральная область пегматитовой линзы (альбитит) Central part of the pegmatite lens (albitite)	
Пегматитовый этап: калиевый полевой шпат → альбит → кварц (I); *Метасоматический этап:* эпидот с TiO_2 до 0,5 %; *Гидротермальный этап*: кварц (II), хлорит	*Реликтовый магматический этап:* Реликты ильменита; *Метасоматическо-гидротермальный этап:* циркон с Ca, апатит с F 3–4,5 %, Cl до 0,5 %, титанит, пирит
Pegmatite stage: K-feldspar → albite → quartz (I); *Metasomatic stage:* epidote with up to 0.5 % TiO_2; *Hydrothermal stage:* quartz (II), chlorite	*Relict magmatic stage:* Ilmenite relics; *Metasomatic-hydrothermal stage:* Ca-bearing zircon, apatite with 3–4.5 % F, up to 0.5 % Cl, titanite, pyrite
Миароловые полости в пегматитах Miarolitic cavities in pegmatites	
Реликтовый этап (захвачены из пегматита): Ca-Амфиболы (гастингсит → Fe-роговая обманка → Fe-актинолит → актинолит), алланит; *Ранний гидротермальный этап:* эпидот, кварц (I), калиевый полевой шпат, альбит; *Поздний гидротермальный этап:* кварц (II), хлорит, кальцит	*Гидротермальный этап:* циркон с CaO до 2,8 %, CeO_2 – 2,9 %, NdO_2 до 3 %, апатит (F 2–3,7 %, Cl до 0,4 %), титанит, паризит, пирит
Relict stage (inherited from pegmatite): Ca-amphiboles (hastingsite → Fe-hornblende → Fe-actinolite → actinolite), allanite; *Early hydrothermal stage:* epidote, quartz (I), K-feldspar, albite; *Late hydrothermal stage:* quartz (II), chlorite, calcite	*Hydrothermal stage:* zircon with up to 2.8 % CaO, 2.9 % CeO_2, up to 3 % NdO_2; apatite (2–3.7 % F, up to 0.4 % Cl); titanite, parisite, pyrite
Кварц из миароловой полости Quartz from the miarolitic cavity	
Гидротермальный этап: крупные кристаллы кварца (I); Минеральные включения в кварце, захваченные в процессе роста: авгит, гастингсит, роговая обманка, Fe-актинолит, актинолит, эпидот, альбит, титанит, циркон, апатит	
Hydrothermal stage: large quartz crystals (I); Mineral inclusions in quartz trapped during growth: augite, hastingsite, hornblende, Fe-actinolite, actinolite, epidote, albite, titanite, zircon, apatite	

Примечание. Кварц (I–II) – ранняя (I) и поздняя (II) генерации кварца, отмечаемые в отдельных зонах пегматитовой линзы.
Note. Quartz (I–II) – early (I) and late (II) generations of quartz observed in distinct zones of the pegmatite lens.

Маркером повышенной концентрации флюида выступает апатит, в котором установлено высокое содержание F (до 4,7 %) и Cl (до 0,5 %). Фракционная дифференциация расплава привела к последовательной кристаллизации пироксенов, эволюционировавших от пижонита через авгит к клиноферросилиту и плагиоклаза – от лабрадора до олигоклаза. Этот тренд отражает прогрессивное обогащение остаточного расплава кремнеземом, железом, калием, натрием и летучими компонентами, включая воду, фтор и хлор.

В интервале температур 500–650 °C при фугитивности кислорода – $logfO_2$ от – 21 до –27 произошла кристаллизация первичного титаномагнетита. Последующий субсолидусный распад твердого раствора привел к образованию закономерно ориентированных структур ильменита в титаномагнетите. Октаэдрическая форма исходных кристаллов и высокая упорядоченность продуктов распада свидетельствуют о медленном остывании силла в условиях, близких к равновесным.

По мере кристаллизации основной массы габброидов в кровельной части интрузива происходило накопление остаточного расплава, обогащенного водой, калием, натрием, титаном, фосфором и редкоземельными элементами. Постмагматические преобразования фиксируются развитием биотита и стильпномелана по титаномагнетиту, что отражает высокую активность флюидов на этой стадии кристаллизации.

Эволюция системы привела к внедрению флюидонасыщенного остаточного расплава в ослабленные зоны кровельной части силла, вероятно, вызвав гидравлический разрыв и инъекцию по субгоризонтальным трещинам, что привело к формированию линзы мощностью от 0,5 до 3 м, а также субвертикальных ответвлений меньшей мощности. Поскольку внедрение расплава происходило в еще неостывшие габбродолериты, температурный градиент на контакте был минимален. Это исключило образование аплитовой закалочной оторочки и создало условия для длительного химического

взаимодействия между пегматитовым расплавом и вмещающими породами.

Зональное строение пегматитовой линзы отражает последовательную смену механизмов минералообразования от контакта к центру. В приконтактовой маломощной области, характеризующейся прямолинейной границей, ведущим процессом явился флюидно-метасоматический. Агрессивный водный флюид, отделившийся от основной части пегматитового расплава, инфильтрировался в приконтактовые габбродолериты, вызывая перекристаллизацию первичных магматических минералов. Пироксены и плагиоклаз подверглись гидротермальной перекристаллизации с образованием Ca-амфиболов, эволюционирующих от Ti-гастингсита через гастингсит, Fe-роговую обманку, Fe-актинолит к актинолиту, что отражает последовательное падение температуры от ~650 до ~450 °C и изменение состава флюида в ходе гидротермально-метасоматической переработки вмещающих габбродолеритов, что согласуется с существующими представлениями [Pochon et al., 2023].

Наряду с амфиболизацией широко проявилась альбитизация, выраженная в формировании мелких изометричных вростков альбита в темноцветных минералах, а также трансформация рудной системы – первичномагматический ильменит, обогащенный марганцем, замещался титанитом, обогащенным ванадием, с образованием скелетных кристаллов. По мере остывания приконтактовой зоны до температур 550–300 °C, согласно данным кобальтинового геотермометра [Klemm, 1965], сформировалась сульфоарсенидная ассоциация, представленная минералами ряда кобальтин–герсдорфит, а также пиритом.

Таким образом, приконтактовая зона является не продуктом кристаллизации пегматитового расплава, а метасоматическим фронтом, возникшим в результате активного взаимодействия флюида с вмещающими габбродолеритами.

По мере удаления от контакта влияние метасоматического фронта ослабевало, и ведущим процессом становилась кристаллизация собственно пегматитового расплава. В краевой части линзы образовались калиевый полевой шпат, альбит и кварц (I генерации), формирующие типичные для пегматитов структуры. Микропегматитовые срастания кварца с калиевым полевым шпатом и пертитовые структуры, возникающие при распаде твердого раствора K-Na-полевого шпата, указывают на кристаллизацию в условиях высокого насыщения летучими компонентами, понижавшими вязкость расплава и температуру солидуса. Это обеспечивало длительную диффузию ионов калия и натрия и формирование закономерных срастаний. Амфибол на этой стадии представлен Ti-гастингситом и Fe-актинолитом, образует вытянутые таблитчатые кристаллы в ассоциации с крупноигольчатым эпидотом; происходит сегрегация темноцветных минералов в локальных зонах, что приводит к образованию пятнистой текстуры породы. Ильменит по-прежнему замещается титанитом, а циркон и апатит фиксируются в качестве акцессорных фаз, существенно модифицированных в ходе метасоматическо-гидротермальных преобразований. Циркон характеризуется неясной зональностью и содержит значительные примеси редкоземельных элементов – Ce, Nd и Hf, что указывает на высокую степень дифференциации расплава и накопление несовместимых элементов в остаточных флюидных фазах.

Центральная область пегматитовой линзы демонстрирует полную завершенность флюидно-магматической кристаллизации. Здесь практически полностью отсутствуют темноцветные минералы, а породообразующий парагенезис представлен альбитом, калиевым полевым шпатом и кварцем. Формируются микропегматитовые срастания кварца с полевыми шпатами и мирмекитовые структуры – червеобразные вростки кварца в альбите, образующиеся при замещении первичного плагиоклаза альбитом с одновременной кристаллизацией кварца. В центральной части линзы проявлены процессы эпидотизации, затрагивающие как кварц, так и плагиоклаз; эпидот образует крупные удлиненно-пластинчатые и изометричные кристаллы, а крупные его выделения совместно с кварцем формируют гнездовые скопления. Кристаллизация кварца проходит в несколько этапов: на ранней стадии он входит в состав мирмекитовых и графических срастаний, а поздняя генерация выполняет секущие прожилки и представлена изометричными зернами.

Завершающий этап формирования пегматитовой линзы связан с образованием миароловых полостей, которые выполняются эпидот-кварцевыми агрегатами с подчиненным количеством кальцита и акцессорных минералов. В отличие от центральной и краевой зон линзы, где минералообразование контролировалось кристаллизацией остаточного флюидонасыщенного расплава, миароловые полости формируются уже исключительно из низкотемпературных гидротермальных растворов, о чем свидетельствует присутствие хорошо

ограненных призматических кристаллов кварца с ромбоэдрическими головками и радиально-лучистых агрегатов эпидота, характерных для свободного роста в открытых полостях из водных растворов.

В кристаллах кварца установлены многочисленные минеральные включения, среди них: реликтовый магматический авгит; высокотемпературные амфиболы пегматитовой стадии кристаллизации (гастингсит, роговая обманка); метасоматические минералы Fe-актинолит, альбит, титанит); акцессорные фазы, перекристаллизованные в гидротермальных условиях (циркон, апатит). Все это отражает полистадийность эволюции системы. Идентичность состава включений минеральному парагенезису вмещающих пегматитов и габбродолеритов позволяет интерпретировать их как захваченные флюидом при циркуляции раствора по полостям. Температурный диапазон формирования миароловых полостей, по косвенным оценкам (исходя из стабильности эпидот-кварцевого парагенезиса и отсутствия высокотемпературных минералов), возможно, соответствует интервалу 450–350 °С. Наличие паризита, алланита и F-Cl-апатита маркирует аномально высокую концентрацию летучих компонентов (H_2O, F, Cl, CO_2) и редкоземельных элементов в гидротермальном растворе. Таким образом, миароловые полости представляют собой продукт, завершающий основную фазу эволюции гидротермальной системы.

Важно отметить, что на локальных участках Ропручейского силла (в его кровле) отмечена эпидотизация вмещающих габбродолеритов и последующая их хлоритизация, маркирующие раннюю стадию флюидно-метасоматической переработки системы, предшествовавшей внедрению пегматитового расплава. Пространственная приуроченность этих изменений к трещиноватым зонам вблизи пегматитовой линзы указывает на то, что по данным каналам происходила инфильтрация флюидов, инициировавшая метасоматоз, который впоследствии достиг максимума в приконтактовой зоне с образованием амфибол-эпидотового парагенезиса. Таким образом, эпидотизация и хлоритизация фиксируют прогрессивное падение температуры в системе от 550 до 250 °С на этапе перехода от магматической стадии к гидротермальной.

Существование маломощных (до 0,5 м) лейкократовых прожилков в габбродолеритах, подобных диабаз-аплитам, сложенных альбит-роговообманковым агрегатом и идентичных габбропегматитам, может быть следствием существования продуктов экстракции и инъекций остаточного дифференцированного расплава, обогащенного кремнеземом, натрием, калием и летучими компонентами, на заключительных этапах кристаллизации габброидного расплава. В контексте описываемой модели формирование прожилков предшествует или происходит синхронно с формированием основной пегматитовой линзы и отражает тот же процесс накопления остаточных расплавов.

Субвертикальная и субгоризонтальная ориентировка прожилков указывает на миграцию флюидонасыщенного расплава по системе тектонически ослабленных зон и трещин, что создавало сеть проницаемых каналов для движения флюида и способствовало формированию пегматитовых тел в зонах разуплотнения. При этом альбит-роговообманковый состав прожилков отражает начальную стадию метасоматической переработки, которая впоследствии, с максимальной интенсивностью, проявится в приконтактовых зонах пегматитовых линз (развитие Ca-амфиболов, альбитизация, эпидотизация). Таким образом, лейкократовые прожилки являются структурно-вещественными предшественниками пегматитообразования, фиксирующими переход от магматической дифференциации к флюидно-метасоматическому этапу эволюции системы.

Предложенная модель рассматривает формирование пегматитовых линз Ропручейского силла как закономерное завершение длительной эволюции габброидного расплава, протекавшей на поздней стадии в закрытой системе, с постепенным накоплением летучих и редких элементов в остаточных расплавах и флюидах.

Отмечаемый привнос F, Cl, Ca, V, As, S и РЗЭ, вероятно, связан с контаминационными процессами на инициальной стадии внедрения расплава, когда система функционировала в открытом режиме, что способствовало первичному обогащению ее флюидным компонентом и элементами-примесями из вмещающих пород.

Зональное строение пегматитовых линз отражает последовательную смену физико-химических параметров – от высокотемпературного флюидно-метасоматического воздействия на контакте через флюидно-магматическую кристаллизацию во внутренних зонах к низкотемпературной гидротермальной деятельности, завершившейся образованием миароловых полостей с РЗЭ-F-Cl минерализацией.

Наряду с этим, при формировании отдельных пегматитовых апофизов в Ропручейском

силле не исключается существование реверсивных стадий кристаллизации, проявленных в последовательной смене температурных режимов – от магматической кристаллизации через субсолидусные преобразования к гидротермальным процессам, с возможным возвратом к более высокотемпературным условиям. Это могло происходить при внедрении новых порций магматического расплава в ходе гидроразрыва и последующих инъекций в частично закристаллизованные пегматитовые полости, что коррелирует с современными представлениями о полистадийной природе пегматитообразования [Simmons, Webber, 2008; Огородников и др., 2020]. Возможным маркером процесса могут являться отдельные находки высокотемпературных амфиболовых (гастингситовых) минеральных зон в поздних эпидотовых прожилках.

Все полученные минералогические материалы позволяют рассматривать Ропручейский силл как эталонную природную модель палеопротерозойской флюидно-магматической интрузивной системы, и обращают внимание на особенности ее REE специализации.

Выводы

Пегматитовые линзы, изученные в палеопротерозойском (1,75 млрд лет) Ропручейском силле габбродолеритов в Онежской структуре (Карельский кратон), демонстрируют дифференцированное зональное строение, отражающее длительную эволюцию флюидно-магматической системы. Минералогическое картирование выявило закономерную смену минеральных парагенезов: от приконтактовых метасоматитов через калишпат-альбитовые пегматиты к альбит-кварцевым центральным зонам с мирмекитами и завершающими эпидот-кварцевыми миароловыми полостями. Обнаружение в миароловых полостях минералов паризита и алланита свидетельствует о РЗЭ специализации заключительной гидротермальной стадии развития габбропегматитов.

Авторы благодарят руководство предприятия ООО «Карелкамень» за содействие в проведении полевых исследований на действующем карьере в июне 2024 года, а также сотрудников института геологии О. Б. Лаврова, Ю. Н. Смирнова за помощь в проведении полевых работ, Ю. А. Марковского и А. А. Федорова за содействие в аналитических СЭМ исследованиях, В. И. Иващенко и рецензентов за обсуждение материалов работы и ценные замечания.

Литература

Афанасьев Г. В., Клюев Н. К. Строение, динамика формирования и металлогения Онежского геоблока (Юго-Восток Балтийского щита) // Региональная геология и металлогения. 2006. № 28. С. 31–47.

Бибикова Е. В., Кирнозова Е. И., Лазарев Ю. Н., Макаров В. А., Николаев А. А. U-Pb изотопный возраст вепсия Карелии // Доклады АН СССР. 1990. Т. 310, № 1. С. 212–216.

Гарбар Д. И. Йотний Юго-Западного Прионежья: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Л., 1970, 18 с.

Геология Карелии / Отв. ред. В. А. Соколов. Л.: Наука, 1987. 231 с.

Гинзбург А. И., Тимофеев И. Н., Фельдман Л. Г. Основы геологии гранитных пегматитов. М.: Недра, 1979. 296 с.

Голдобина Л. П., Михайлюк Е. М. Литогенез иотнийских образований Онежской синеклизы // Проблемы осадочной геологии докембрия. Вып. 1. М.: Недра, 1966. С. 54–60.

Гродницкий Л. Л., Полин А. К. Пегматиты северной Карелии и их ореолы (классификация, петрографические и геохимические особенности, условия формирования). Петрозаводск: Карелия, 1975. 227 с.

Кайряк А. И. Бесовецкая серия в Онежской структуре. Л.: Недра, 1973. 176 с.

Кратц К. О. Геология карелид Карелии. М.; Л., 1963. 212 с.

Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А. Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000: Новые подходы к составлению // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 3–41. doi:10.17076/geo444

Минерально-сырьевая база Республики Карелия Кн. 2: Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи / В. П. Михайлов и др. Петрозаводск: Карелия, 2006. 355 с.

Негруца В. З. Раннепротерозойские этапы развития восточной части Балтийского щита Л.: Наука, 1984. 270 с.

Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Кисин А. Ю., Савичев А. Н. Гранитные пегматиты и пегматоиды Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2020. 432 с.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Рязанцев П. А. Комплексный геофизический профиль через Ропручейский силл габбродолеритов на участке Ржаное – Анашкино // Труды Карельского научного центра РАН. 2012. № 3. С. 165–171.

Светов А. П. Платформенный базальтовый вулканизм карелид Карелии. Л.: Наука, 1979. 208 с.

Таланцев А. С. Камерные пегматиты Урала. М.: Наука, 1988.144 с.

Тимофеев В. М. Петрография Карелии. М.; Л.: АН СССР, 1935. 256 с.

Ферсман А. Е. Пегматиты, их научное и практическое значение. Т. 1: Гранитные пегматиты. Ленинград: Изд-во Академии наук СССР, 1931. 648 с.

Černý Petr. Rare-element granitic pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatitic deposits. Geoscience Canada. 1991a. Vol. 18, no. 2. P. 49–67.

Černý Petr. Rare-elementgranitic pegmatites. Part II: Regionaltoglobal environments and petrogenesis. Geoscience Canada. 1991b. Vol. 18, no. 2. P. 68–81.

Klemm D. D. Synthesenund Analyseninden Dreiecks diagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS_2-CoS_2-NiS_2 // Neues Jahrbuchfuor Mineralogie Abhandlungen. 1965. Vol. 103. P. 205–255.

Kuznetsov N. B., Kolodyazhnyi S. Yu., Romanyuk T. V., Strashko A. V., Baluev A. S., Terekhov E. N., Mezhelovskaya S. V., Dubensky A. S., Sheshukov V. S. On the Time and Conditions of Formation of the Shoksha Quartzite-Sandstones of the South Onega Depression Based on the New Data from Isotope Geochronology. Geodynamics & Tectonophysics. 2023. Vol. 14, no. 1. P. 0685. doi: 10.5800/GT-2023-14-1-0685

Lepage L. D. ILMAT: an excel worksheet for ilmenite magnetite geothermometry and geobarometry. Computers and Geosciences. 2003. Vol. 29, no. 5. P. 673–678.

London D. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites. Lithos. 2014 Vol. 184. P. 74–104.

Lubnina N. V., Pisarevsky S. A., Söderlund U., Nilsson M., Sokolov S. J., Khramov A. N., Iosifidi A. G., Ernst R., Romanovskaya M. A., Pisakin B. N. New Palaeomagnetic and Geochronological Data from the Ropruchey Sill (Karelia, Russia): Implications for Late Palaeoproterozoic Palaeogeography / Eds. S. Mertanen, L. J. Pesonen, P. Sangchan, 2012, Supercontinent Symposium 2012 (September 25–28, 2012). Programme and Abstracts. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland. P. 81–82.

Melezhik V. A., Medvedev P. V., Svetov S. A. The Onega basin // Reading the Archive of Earth's Oxygenation. P. 387–490.

Pochon A., Iacono-Marziano G., Gloaguen E., Tuduri J., Erdmann S. High-temperature alteration during cooling of mafic intrusions: Insights from the Saint-Jean-du-Doigt intrusive complex (Armorican Massif, France) // Lithos. 2023. Vol. 436–437, 106977. doi:10.1016/j.lithos.2022.106977

Simmons W. B., Webber K. L. Pegmatite genesis: state of the art // European Journal of Mineralogy. 2008. Vol. 20, no. 4. P. 421–438. doi: 10.1127/0935-1221/2008/0020-1833

Wise M. A., Müller A., Simmons W. B. A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites // The Canadian Mineralogist. 2022. Vol. 60, no. 2. P. 229–248. doi:10.3749/canmin.1800006

References

Afanas'ev G. V., Klyuev N. K. Structure, formation dynamics, and metallogeny of the Onega geoblock (southeast of the Baltic Shield). *Regional'naya geologiya i metallogeniya = Regional Geology and Metallogeny*. 2006;28:31–47. (In Russ.)

Bibikova E. V., Kirnozova E. I., Lazarev Yu. N., Makarov V. A., Nikolaev A. A. U-Pb isotope age of the Vepsian in Karelia. *Doklady AN SSSR = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1990;310(1):212–216. (In Russ.)

Černý P. Rare-element granitic pegmatites. Part I: anatomy and internal evolution of pegmatitic deposits. *Geoscience Canada.* 1991a;18(2):49–67.

Černý P. Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regional to global environments and petrogenesis. *Geoscience Canada.* 1991b;18(2):68–81.

Fersman A. E. Pegmatites, their scientific and practical significance. Vol. 1: Granite pegmatites. Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1931. 648 p. (In Russ.)

Garbar D. I. Yotniy of the Southwestern Onega region: Summary of PhD (Cand. of Geol.-Min.) thesis. Leningrad; 1970. 18 p. (In Russ.)

Ginzburg A. I., Timofeev I. N., Fel'dman L. G. Fundamentals of the geology of granite pegmatites. Moscow: Nedra; 1979. 296 p. (In Russ.)

Glushanin L. V. Sharov N. V., Shchiptsov V. V. (eds.). Onega Paleoproterozoic structure (geology, tectonics, deep structure, and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 431 p. (In Russ.)

Goldobina L. P., Mikhailyuk E. M. Lithogenesis of the lotnian formations of the Onega Syneclise. *Problemy osadochnoi geologii dokembriya = Problems of the Precambrian sedimentary geology*. Iss. 1. Moscow: Nedra; 1966. P. 54–60. (In Russ.)

Grodnitskii L. L., Polin A. K. Pegmatites of Northern Karelia and their halos (classification, petrographic and geochemical features, and formation conditions). Petrozavodsk: Karelia; 1975. 227 p. (In Russ.)

Kairyak A. I. Besovetskaya Series in the Onega Structure. Leningrad: Nedra; 1973. 176 p. (In Russ.)

Klemm D. D. Synthesen und Analysen in den Dreiecks diagrammen FeAsS-CoAsS-NiAsS und FeS_2–CoS_2–NiS_2. *Neues Jahrbuch fuor Mineralogie Abhandlungen*. 1965;103:205–255.

Kratz K. O. Geology of the Karelides in Karelia. Moscow-Leningrad, 1963. 212 p. (In Russ.)

Kulikov V. S., Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikova V. V., Polin A. K., Golubev A. I., Gor'kovets V. Ya., Ivashchenko V. I., Gogolev M. A. Geological map of southeastern Fennoscandia at a scale of 1:750,000: new approaches to its compilation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.* 2017;2:3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444

Kuznetsov N. B., Kolodyazhnyi S. Yu., Romanyuk T. V., Strashko A. V., Baluev A. S., Terekhov E. N., Mezhelovskaya S. V., Dubensky A. S., Sheshukov V. S. On the time and conditions of formation of the Shoksha quartzite-sandstones of the South Onega Depression based on the new data from isotope geochronology. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023;14(1):0685. doi:10.5800/GT-2023-14-1-0685

Lepage L. D. ILMAT: an excel worksheet for ilmenite magnetite geothermometry and geobarometry. *Computers and Geosciences*. 2003;29(5):673–678.

London D. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites. *Lithos*. 2014;184:74–104.

Lubnina N. V., Pisarevsky S. A., Söderlund U., Nilsson M., Sokolov S. J., Khramov A. N., Iosifidi A. G., Ernst R., Romanovskaya M. A., Pisakin B. N. New palaeomagnetic

and geochronological data from the Ropruchey Sill (Karelia, Russia): implications for Late Palaeoproterozoic palaeogeography. Eds. S. Mertanen, L. J. Pesonen, P. Sangchan, 2012, Supercontinent Symposium 2012 (Sept. 25–28, 2012). Programme and Abstracts. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, p. 81–82.

Melezhik V. A., Medvedev P. V., Svetov S. A. The Onega basin. In *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Volume 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. P. 387–490. doi: 10.1007/978-3-642-29682-6_9

Mikhailov V. P. et al. (eds.). Mineral resource base of the Republic of Karelia. Book 2: Non-metallic minerals. Underground water and therapeutic mud. Petrozavodsk: Karelia; 2006. 355 p. (In Russ.)

Negrutsa V. Z. Early Proterozoic stages of the development of the eastern part of the Baltic Shield. Leningrad: Nauka; 1984. 270 p. (In Russ.)

Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Kisin A. Yu., Savichev A. N. Granite pegmatites and pegmatoids of the Urals. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020. 432 p. (In Russ.)

Pochon A., Iacono-Marziano G., Gloaguen E., Tuduri J., Erdmann S. High-temperature alteration during cooling of mafic intrusions: insights from the Saint-Jean-du-Doigt intrusive complex (Armorican Massif, France). *Lithos.* 2023;436–437:106977. doi: 10.1016/ j.lithos. 2022.106977

Ryazantsev P. A. Complex geophysical profile through the Ropruchey sill of gabbro-dolerites in the Rzhanoye – Anashkino area. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.* 2012;3:165–171. (In Russ.)

Simmons W. B., Webber K. L. Pegmatite genesis: state of the art. *European Journal of Mineralogy*. 2008;20 (4):421–438. doi: 10.1127/0935-1221/2008/0020-1833

Sokolov V. A. (ed.). Geology of Karelia. Leningrad: Nauka; 1987. 231 p. (In Russ.)

Svetov A. P. Platform basaltic volcanism of the karelides of Karelia. Leningrad: Nauka; 1979. 208 p. (In Russ.)

Talantsev A. S. Chamber pegmatites of the Urals. Moscow: Nauka; 1988. 144p. (In Russ.)

Timofeev V. M. Petrography of Karelia. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1935. 256 p. (In Russ.)

Wise M. A., Müller A., Simmons W. B. A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. *The Canadian Mineralogist.* 2022; 60(2):229–248. doi:10.3749/canmin.1800006

Поступила в редакцию / received: 22.07.2026; принята к публикации / accepted: 07.09.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Светов Сергей Анатольевич

д-р геол.-мин. наук, директор,
главный научный сотрудник
лаборатории литологии и геохимии

e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Светова Евгения Николаевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: ensvetova@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Svetov, Sergei

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Director, Chief Researcher

Svetova, Evgeniya

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 91–109
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 91–109
DOI: 10.17076/geo2391

УДК 537.9(470.22)

ГЕОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ГРАФИТОВЫХ РУД ИХАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ, РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

М. В. Солонинкина[1]*, В. В. Щипцов[1, 2], Д. В. Логинов[2], Н. Н. Рожкова[1]

[1] Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)
**mas31393@yandex.ru*
[2] Петрозаводский государственный университет
(пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

В статье анализируется современное состояние изученности графитовых руд, их потребности и основные направления использования в мировой экономике. Дана геологическая и минералого-технологическая прогнозная оценка крупного Ихальского месторождения крупночешуйчатого графита (Республика Карелия). Проведен комплексный анализ фазового состава и структурных особенностей природного графита Ихальского месторождения и продуктов его обогащения. Методами РСА, СТА и КРС установлено, что исходное сырье характеризуется высокой минеральной загрязненностью (содержание углеродной фазы до 64,3 %, примеси кварца, полевых шпатов, сульфидов и биотита). Показано, что различные методы обогащения позволяют получать концентраты с принципиально разным полиморфным углеродом: от 95 % содержания углерода с преобладанием гексагональной модификации α-графита (флотационный концентрат КарНЦ РАН) до 96,1 % (из них 9 % ромбоэдрической модификации β-графита). Методом КРС выявлена значительная микронеоднородность всех образцов, заключающаяся в сосуществовании зон идеального (I_D/I_G = 0,012) и дефектного (I_D/I_G = 0,22) графита. Обнаруженные структурно-фазовые особенности являются отражением метаморфогенного генезиса месторождения. Доказана эффективность комплексного подхода для оценки качества графитовых концентратов, установлена корреляция между данными применяемых методов. Результаты работы важны для оптимизации технологий обогащения и прогнозирования свойств графитовых материалов.

Ключевые слова: природный графит; Ихальское месторождение; обогащение; рентгенофазовый анализ; термогравиметрический анализ; спектроскопия комбинационного рассеяния света; фазовый состав; структурная неоднородность

Для цитирования: Солонинкина М. В., Щипцов В. В., Логинов Д. В., Рожкова Н. Н. Геология, минералогия и технология графитовых руд Ихальского месторождения (Западное Приладожье, Республика Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 91–109. doi: 10.17076/geo2391

Финансирование. Работа выполнена в рамках Госзадания КарНЦ РАН – FWME-0222-2019-0065.

M. V. Soloninkina[1]*, V. V. Shchiptsov[1, 2], D. V. Loginov[2], N. N. Rozhkova[1].
GEOLOGY, MINERALOGY AND TECHNOLOGY OF GRAPHITE ORES OF THE IHALA DEPOSIT (WESTERN LADOGA AREA, REPUBLIC OF KARELIA)

[1] Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)
*[2] Petrozavodsk State University (33 Lenin Ave., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *mas31393@yandex.ru*

The article analyzes the current state of research on graphite ores, demand for them, and their main uses in the global economy. A geological and mineralogical-technological predictive assessment of the large Ihala deposit of large flake graphite (Republic of Karelia) is provided. A comprehensive analysis of the phase composition and structural features of natural graphite from the Ihala deposit and the products of its enrichment has been conducted. X-ray diffraction analysis (XRD), simultaneous thermal analysis (STA), and Raman scattering (RS) showed that the initial raw material was highly mineralized (with a carbon phase content of up to 64.3 %, with impurities such as quartz, feldspars, sulfides, and biotite). It was also demonstrated that different enrichment methods can produce concentrates with significantly different polymorphic carbon compositions, ranging from 95 % carbon content with a predominance of the hexagonal α-graphite modification (flotation concentrate from the KarRC RAS) to 96.1 % (including 9 % of the rhombohedral β-graphite modification). Raman spectroscopy revealed significant microheterogeneity in all samples, manifested in the coexistence of zones of ideal (I_D/I_G = 0.012) and defective (I_D/I_G = 0.22) graphite. The detected structural and phase features reflect the metamorphogenic genesis of the deposit. The integrated approach for assessing the quality of graphite concentrates proved effective, and outputs of the applied methods were in good alignment. The results are important for optimizing enrichment technologies and predicting the properties of graphite materials.

Keywords: natural graphite; Ihala deposit; beneficiation; X-ray diffraction analysis; thermogravimetric analysis; Raman spectroscopy; phase composition; structural heterogeneity

For citation: Soloninkina M. V., Shchiptsov V. V., Loginov D. V., Rozhkova N. N. Geology, mineralogy and technology of graphite ores of the Ihala deposit (Western Ladoga area, Republic of Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026. No. 10. P. 91–109. doi: 10.17076/geo2391

Funding. This work was supported by the State Assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (project no. FWME-0222-2019-0065).

Введение

Графит – один из самых интересных минералов, встречающихся на Земле. Он отмечается в природе, а также производится в синтетических процессах.

Самое раннее применение графита восходит к первобытному человеку, который рисовал им на стенах пещер. Египтяне также применяли его для украшения керамики. В средние века графит использовался как огнеупор для облицовки форм с целью изготовления более гладких пушечных ядер, которыми можно было стрелять на большие расстояния. На протяжении всей истории графит путали с другими минералами, особенно с галенитом и молибденитом. Для описания минерала использовались такие названия, как плюмбаго и черный свинец. Со временем термин графит (что означает «писать») был окончательно установлен для описания «карандашного» минерала.

Современный этап развития науки и технологий характеризуется возрастающим интересом к углеродным материалам, в частности, к графиту, что обусловлено его уникальными физико-химическими свойствами и широкими перспективами практического применения. Графит, являясь ключевым материалом для современных технологий, находит применение в энергетике (аноды литий-ионных аккумуляторов), металлургии (огнеупоры, смазки), электронной промышленности (теплоотводящие элементы), атомной и медицинской отраслях [Кононов, 2021; Государственный доклад..., 2024]. Особенно важно выделить использование графита в высоких технологиях [Щипцов и др., 2022]:

первая группа – промышленный графит (фольга и экранирование (нуклеарный класс)),

высокотехнологичные компоненты батарей (СЕМ). В общем объеме важных сырьевых материалов данная группа составляет 35 %;

вторая группа – электроды (ЭАФ), тигли, части ракеты. Ее объем достигает 45 %;

третья группа – батареи БАМ и ГЭМ, огнеупоры, пресс-формы, синтетические алмазы, порошкообразные металлы, дымомаскирующие средства (технология ослабления ЭМ), смазочные материалы. Объем составляет 20 %.

При этом эффективность использования графита в значительной степени определяется его структурой, а именно: степенью кристалличности, типом структурной упорядоченности, наличием и распределением дефектов, морфологией частиц и пористостью, что также важно и для нанотехнологий. Графит обладает формой чистого углерода, которая существует в простом составе и имеет слоистую структуру. Особенности строения кристаллической решетки графита преломляются в химико-физических свойствах графита.

Именно все это вкупе позволяет считать, что промышленный минерал графит относится к важнейшему минералу XXI века.

Целью настоящей работы являлось комплексное исследование структурных особенностей графита Ихальского месторождения в исходном состоянии и после обогащения различными методами. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведение рентгеноструктурного анализа для идентификации кристаллических фаз, определения размеров кристаллитов и оценки степени графитизации образцов; оценка структурного совершенства и дефектности методом спектроскопии комбинационного рассеяния света; а также количественное определение содержания углерода методом синхронного термического анализа.

Состояние изученности и использование графитовых руд

Мировые запасы графитовой руды составляют около 286,5 млн т, их крупными держателями являются Китай (27 %), Бразилия (26 %), Мадагаскар и Мозамбик (по 9 %). Россия обеспечивает 1,4 % мировой добычи графита, занимая 7-е место в рейтинге мировых производителей [Государственный доклад…, 2024; Щипцов, Светов, 2026].

Прогнозируется рост мирового спроса на графит. Китай является крупнейшим в мире производителем и экспортером переработанного мирового графита в материал, который используется практически во всех анодах электромобилей. По данным компании Benchmark Mineral Intelligence в ближайшее время литий-ионные аккумуляторы обгонят сталелитейную промышленность по спросу на графит.

В природе встречаются три природных морфотипа графита [Кононов, 2021; Государственный доклад…, 2024; Щипцов, Светов, 2026] и один синтетический [Островский и др., 1986; Государственный доклад…, 2024]:

а) чешуйчатый графит – кристаллические разноразмерные чешуйки графита в виде отдельных плоских, похожих на пластины частиц с содержанием С 80–98 %;

б) скрытокристаллический графит с содержанием С 70–85 %;

в) кусковой (жильный) графит в трещинных жилах или разломах в виде массивных пластинчатых наростов волокнистых кристаллических агрегатов с содержанием С 90–95 %;

г) синтетический графит – материал, который производится в электропечах при нагреве смеси тонкоизмельченного кокса и углеродистых связующих. Для этого используют нефтяной, антрацитовый или пековый кокс, а в качестве связующих веществ – пек или гудрон.

Природные графиты разделяются на явнокристаллический (средний размер кристаллов более 1 мкм) и скрытокристаллический [Методические рекомендации…, 2007]. Степени чистоты чешуйчатого графита в графитовой продукции различаются – *Cg* 85–90 %, 90–94 %, 94–96 % и выше. Содержание *Cg* более 98–99 %, как правило, достигается с помощью очистки химическими и/или термическими методами [Государственный доклад…, 2024].

Чешуйчатый графит имеет прямую зависимость от метаморфических процессов, связанных с условиями, где органический углерод, отложенный в осадочных и осадочно-вулканогенных породах, преобразуется в графит под влиянием условий давления, обычно превышающего 5 кбар, и температуры около 650–700 °С и выше [Щипцов и др., 2022]. Метаморфические реакции, в результате которых образуется графит, приводят к высокой электропроводности, поляризуемости и пониженной теплопроводности [Beyssac, Rumble, 2014; Engvik et al., 2020].

Ожидается, что потребности на графит будут неуклонно расти, в основном благодаря расширению мирового рынка на спрос литий-ионных аккумуляторов. В этом отношении выделяется огромный потенциал графитовых проектов Танзании (проект Линди-Джамбо, проект Бунью) в сочетании с продолжающимися геологоразведочными работами, что делает эту страну одним из ключевых игроков на мировом рынке

графита. Проявлен рост технологичности графитовой промышленности Танзании в организации производства важнейшего продукта второго передела графитового сырья – сферического (шарового) графита [Государственный доклад..., 2024].

Несмотря на использование синтетического графита в анодах аккумуляторов и косвенным влиянием тем самым на ценообразование природного чешуйчатого и сферического (шарообразного) графита, Агентство *Benchmark Mineral Intelligens* прогнозирует рост глобального спроса на анодный материал на основе природного графита для использования только в *Li*-ионных батареях с 255 тыс. т в 2023 году до 1,2 млн т в 2030 году. При этом для производства 1,2 млн т активного анодного материала на основе природного графита потребуется до 2,5 млн т чешуйчатого графита (–100 *mesh* 94–96 % *Cg*). Важными сферами применения графита также являются огнеупоры, электроды, науглероживание стали, литейное производство и производство смазочных материалов, изготовление формованных изделий, фрикционных материалов. В меньшей степени графит идет в производство грифелей, красок, пластмасс, искусственных алмазов и др. [Государственный доклад..., 2024].

На территории России существует единственное разрабатываемое Тайгинское месторождение кристаллического графита в Челябинской области, на котором ежегодно добывают около 10 тыс. т графита. Основу потенциальной сырьевой базы страны составляют крупное по запасам Курейское месторождение скрытокристаллического графита в Красноярском крае и среднее Союзное месторождение чешуйчатого графита высокого качества в Еврейской АО [Государственный доклад..., 2024]. Дефицит графита восполняется за счет импорта сырья из-за границы.

Прогнозные ресурсы графитовых руд России локализованы в пределах пяти рудных провинций: Карело-Кольской (Республика Карелия и Мурманская обл.), Уральской (Свердловская и Челябинская области), Забайкальской (Республика Бурятия и Иркутская обл.) и Буреинской (Приморский край и Еврейская АО) [Государственный доклад..., 2024].

Классификация запасов и прогнозных ресурсов графитовых руд в РФ базируется на степени геологической изученности, сложности строения месторождений и технологических свойствах графита (размер чешуек, содержание углерода). Основная часть запасов разведываемых объектов относится к категориям C_1 и C_2 [Методические рекомендации..., 2007].

Геологические особенности графитовых руд Ихальского месторождения (также именуемое как «Ихала-3»)

Месторождения и проявления чешуйчатого графита Фенноскандинавского щита переживают второе рождение за счет важной потенциальной базы, внимание к которой стало актуальным на примере динамики развития и оценки объектов в Норвегии, Финляндии и Швеции [Щипцов, 2022]. Обширная часть Фенноскандинавского щита включает Свекофеннскую область с характерными метаморфическими породами от амфиболитовой до гранулитовой фаций метаморфизма. Поскольку высокое качество графита связывается с высоким уровнем метаморфизма супракрустальных пород Свекофеннского домена, то на этом основании прогнозируются перспективные объекты для разработки месторождений высококачественного чешуйчатого графита. Месторождения графита в Фенноскандии изучены достаточно полно [Gautneb, Tveten, 2000; Palosaari et al., 2016; Rønning et al., 2018 и др.]. С 2016 года несколько проектов по разведке графита были активными и актуальными в Норвегии, Швеции и Финляндии [Gautneb, Wanvik, 2016]. На данный момент действующим графитовым рудником в Фенноскандии является Skaland Graphite AS в Норвегии. Возобновляется добыча на графитовом руднике Woxna в Швеции, которая была приостановлена в 2015 году [Leading Edge Materials..., 2019]. Динамика началась от нулевого показателя в 2015 году и будет резко увеличиваться в перспективе по данным прогноза спроса на сферический (шаровидный) графит (SPC) и природные аноды.

Геологические структуры Российского Приладожья являются юго-восточным продолжением Раахе-Ладожской тектонической зоны Фенноскандинавского щита [Ekdahl, 1993; Ладожская..., 2020].

В Ладожской подвижной зоне открыто более 30 проявлений, в которых отмечены два типа графита: 1 – легкообогатимые руды явнокристаллического крупно-среднечешуйчатого графита; 2 – труднообогатимые руды скрытокристаллического графита.

В Западном Приладожье выделены два домена – Северный (СД) и Южный (ЮД), эволюция которых существенно отличается в палеопротерозое. Эти домены имеют тектоническую природу сочленения, определяемую как Мейерская зона [Балтыбаев и др., 1996; Ладожская..., 2020].

Супракрустальный комплекс СД сложен в основном палеопротерозойскими метавулканитами сортавальской и метатурбидитами ладожской серий, испытывающими зональный метаморфизм андалузит-силлиманитового типа, возрастающий к югу от зеленосланцевой до амфиболитовой со спорадическим появлением анатектической мигматизации пород.

ЮД сложен осадочными и вулкано-плутоногенными породами. В большинстве они метаморфизованы до гранулитового уровня и практически повсеместно мигматизированы. Из-за интенсивного преобразования и утери стратиграфических маркеров супракрустальные породы ЮД, хотя и объединены в лахденпохскую метаморфическую серию, но тем не менее рассматриваются как высокотемпературные аналоги осадков ладожской серии. С севера область распространения условно ограничивается осевой частью шовной зоны Мейерского надвига.

В последние годы по оценке графитовых руд Западного Приладожья выполнены следующие работы [Щипцов, Светов, 2026]:

1. Поисковые работы на крупночешуйчатый графит в пределах перспективных участков Кирьяволахтинской площади (Республика Карелия) в период 2022–2024 гг.

Исполнитель АО «Центральное ПГО».

2. Разведочные работы на участке Ихальского месторождения графитов («Ихала-3») 2017–2018 гг.

Исполнитель ООО «Промышленные инвестиции».

3. Поисковые и оценочные работы на графит на участке «Ихала-4». 2022–2023 гг.

Исполнитель ООО «Графит-Пром».

4. Информационный отчет о выполнении работ по геологическому изучению по участку недр «Ихала-6». 2023 год.

Исполнитель ООО «Русский графит».

5. Информационный отчет о выполнении работ по геологическому изучению по участку недр «Ихала-7». 2023 год.

Исполнитель ООО «Русский графит».

Основным методом поисковых и разведочных работ на данных площадях являлось бурение колонковых скважин. При поиске и разведке месторождений графитовых руд широко применялись геофизические методы. Геофизические исследования, особенно электромагнитные, являются очень эффективным методом для обнаружения нераскрытых залежей графита при поисках объектов на графит.

Последовательность геодинамических графитформирующих процессов в пределах Ихальского рудного поля от палеопротерозоя до фанерозоя приводится в опубликованной статье [Щипцов, Светов, 2026].

Учитывая потребность в суперчистом чешуйчатом графите, оценка графита связана прямым образом с приложением к исследованиям современных высокоточных аналитических методов. Примером таких исследований послужила территория Ихальского месторождения («Ихала-3») [Щипцов, 2022; Щипцов, Светов, 2026].

Ихальское месторождение было открыто в 1971 году геологами Карельской комплексной геологоразведочной экспедиции [Минерально-сырьевая база..., 2006]. На данной площади этой экспедицией проводились поисковые и поисково-оценочные работы на графит в периоды 1983–1986 (Т. П. Мочаловой и др.) и 1989–1993 гг. (К. И. Степановым и др.).

Основная краткая характеристика Ихальского месторождения приводится на основе обобщенных сведений из статьи [Щипцов, Светов, 2026]. Указывается, что месторождение приурочено к графитовой стратиформной формации кристаллических сланцев людиковийской системы палеопротерозоя. Графитовые руды метаморфогенного класса рассматриваются в едином блоке свекофеннид, и их формирование прямым образом связывается с высокотемпературными условиями метаморфизма гранат-кордиерит-ортоклазовой фации гранулитовой ступени метаморфизма с возрастом 1,89–1,85 млрд. Региональный метаморфизм пород отвечает условиям высокотемпературной амфиболитовой фации силлиманит-альмандин-калиевополевошпатовой субфации, местами гранулитовой фации, что впервые было отмечено Ю. И. Нагайцевым [Нагайцев, 1974].

Типизация графитовых руд проводилась по текстурно-структурным признакам. Графитовые руды (графиты) делятся на явно- и скрытокристаллические. Среди первых выделены плотнокристаллические и чешуйчатые разновидности. По морфологическим особенностям графитовые руды представляют собой крутопадающие пластообразные тела, сложенные графитсодержащими биотитовыми сланцами и мигматитами по ним. Простираются в субмеридиональном направлении. Площадь составляет 8,2 км^2. Длина залежи по простиранию равна 1700 м, мощность достигает 450 м. По падению залежь прослежена до глубины 100 м и не имеет признаков разубоживания. Основным природным типом графитовых руд являются мелко-, среднезернистые биотитовые гнейсы с содержанием чешуйчатого графита от 2,8 до 9,2%

и более. Другие минеральные разновидности графитоносных метаморфитов имеют подчиненное значение, обычно они образуют полосы и линзы среди графитсодержащих биотитовых гнейсов.

В серии работ сотрудников ИГГД РАН [Великославинский, 1972; Шульдинер и др., 1997; Балтыбаев, 2002] детально охарактеризованы метаморфические комплексы Южного домена данной территории, где преобладают первичные метапелиты и в которую вписывается Ихальское рудное поле. Гиперстеновая зона пиковой стадии метаморфизма соответствует условиям Т 800–900 °С и Р 5–6 кбар, что определяет параметры гранулитовой фации. Время гранулитовой стадии метаморфизма глиноземистых гнейсов установлено как 1880,1 ± 7,7 млн лет по Pb-Pb возрасту силлиманита [Балтыбаев, Левченков, 2005]. В дальнейшем условия метаморфизма смещаются в область амфиболитовой фации, что привело к новообразованным минеральным парагенезисам, флюидным включениям в поздних жильных телах, определяемых диапазоном их формирования – от 600–660 °С до 450–500 °С при давлении примерно 4 кбар, в наиболее поздних жилах – около 3–3,5 кбар, отмеченных в серии работ [Балтыбаев и др., 2000, 2009; Глебовицкий и др., 2001 и др.].

Руды оценены на обогатимость в границах «Ихала-3» на стадии поисково-оценочных работ. Испытания выполнялись в Уралмеханобр, ВНИИнеруд и ИГ КарНЦ РАН [Бискэ, 1987; Бискэ, Скамницкая, 2018; Скамницкая, Бискэ, 2019 и др.]. При химическом дообогащении неизмененных биотитовых гнейсов Ихальского месторождения содержание углерода в графитовом концентрате достигает 99,9 % [Скамницкая, Бискэ, 2019].

Запасы определены в трех блоках в количестве 81,4 млн т руды до глубины 120 м при среднем содержании углерода 3,01 % (борт 2 %). Прогнозные ресурсы категории P_1 оценены в 124 млн т до глубины 170 м при среднем содержании углерода 3,07 % [Недра Северо-Запада..., 2003].

Таким образом, Ихальское месторождение обладает значительными подтвержденными запасами крупночешуйчатого графита, а проведенные технологические исследования подтверждают принципиальную возможность получения высококачественных концентратов, соответствующих действующим стандартам.

Однако если традиционные области применения регламентированы в первую очередь химической чистотой и гранулометрическим составом, то новые направления использования графита, например, как прекурсора для получения графена, предъявляют принципиально иные требования к однородности и совершенству его кристаллической структуры. В этом случае ключевую роль играет не только чистота, но и плотность дефектов исходного графита. Исследования показывают, что чем меньше размер кристаллитов (L_c = 5–30 нм) и ниже кристалличность исходного графита, тем меньше количество слоев будет содержать получаемый графен [Mori et al., 2018]. Более того, высокая степень структурного совершенства графита ($d_{002} \leq 0{,}336$ нм, степень графитизации 85–93 %) и минимальное количество примесей в прекурсоре напрямую влияют на электронные свойства итогового материала [Wong et al., 2015].

Но, несмотря на детальное изучение геологии месторождения [Бискэ, Колодей, 2014; Бискэ, Скамницкая, 2018, 2019; Щипцов и др., 2020 и др.] и структурного состояния природного графита (табл. 1), влияние различных методов обогащения на кристаллическую структуру, дефектность и фазовый состав конечного графитового концентрата исследовано недостаточно.

Аналогом графитовых руд Ихальского рудного поля являются графиты эксплуатируемого месторождения «Завальевское» [Щипцов, Ковалевский, 2024]. Залежи связаны с палеопротерозойскими образованиями тетерьевской серии в составе Украинского кристаллического массива (хронологический интервал 2,5–2,3 млрд лет). Продуктивные толщи на месторождении представлены графитоносными биотит-хлоритовыми и полевошпат-гранатовыми гнейсами. Они соответствуют второй группе по классификации запасов и прогнозных ресурсов месторождений графитовых руд [Методические рекомендации..., 2007].

Технологические регламенты были разработаны украинскими промышленными предприятиями совместно с российскими. ОАО «Завальевский графитовый комбинат» (Кировоградская обл.) производил 25 марок графита размером 4–200 мкм с содержанием углерода от 85,00 до 99,95 %. На этом предприятии также существовало производство коллоидно-графитовых препаратов.

Таблица 1. Сводные данные по природному графиту Ихальского месторождения из литературных источников [Бискэ, Колодей, 2014; Бискэ, Скамницкая, 2018, 2019; Щипцов и др., 2020]

Table 1. Summary data on the natural graphite of the Ikhalskoye deposit from literature sources [Biske, Kolodey, 2014; Biske, Skamnitskaya, 2018, 2019; Shchiptsov et al., 2020]

Тип руды Type of ore	Метаморфогенный Metamorphogenic
Тип природного графита Type of natural graphite	Чешуйчатый Flaky
Размер чешуек графита Size of graphite flakes	Крупно- и мелкочешуйчатый Размер чешуек – от 0,01 до 3–4 мм. Средний размер – 0,3–0,6 мм Coarse- and fine-flaky Flake size: from 0.01 to 3–4 mm. Average size: 0.3–0.6 mm
Содержание графита в руде Graphite content in the ore	2,91–6,11 %
Породообразующие минералы Rock-forming minerals	кварц – 20–35 %, полевые шпаты – 25–40 % (преобладает плагиоклаз), биотит – 15–32 % и сульфиды (преимущественно пирротином) – 7–21 % quartz – 20–35 %, feldspars – 25–40 % (plagioclase predominates), biotite – 15–32 %, and sulfides (predominantly pyrrhotite) – 7–21 %
Содержание графита в концентратах Graphite content in concentrates	92–95 %
Данные РСА природного графита X-ray diffraction analysis (XA) data of natural graphite	Присутствует пик 002, характерный для α-графита, межслоевое расстояние (d) – 3,354–3,359 Å, степень графитизации – 1,9 A peak at 002 characteristic of α-graphite is present, the interlayer distance (d) is 3.354–3.359 Å, the degree of graphitization is 1.9
Данные КРС Raman spectroscopy	КР спектр характерен для монокристаллического графита: интенсивная узкая полоса G (на ~1580 $см^{-1}$), резко асимметричная полоса 2D (~2700 $см^{-1}$). В спектрах отдельных, более мелких чешуек в области 1100–1800 $см^{-1}$ проявляются слабые полосы «дефектов» D1 и D2 The Raman spectrum is characteristic of single-crystal graphite: an intense narrow G band (~1580 cm^{-1}), a sharply asymmetric 2D band (~2700 cm^{-1}). In the spectra of individual, smaller flakes, weak “defect” bands D1 and D2 appear in the 1100–1800 cm^{-1} region
Данные СТА Simultaneous thermal analysis (STA)	Содержание углерода в образцах не превышает 13 вес.%. На кривых ДСК наблюдаются экзотермические процессы горения углерода в двух температурных диапазонах: 400–650 °С и 700–850 °С The carbon content in the samples does not exceed 13 wt.%. Exothermic processes of carbon combustion are observed on the DSC curves in two temperature ranges: 400–650 °C and 700–850 °C

Методика проведения эксперимента и материалы

Объекты исследования

Материалом для исследований послужили образцы исходной графитовой руды Ихальского месторождения и обогащенных графитовых концентратов, полученных с использованием различных методов обогащения. Образец № 1 представляет собой измельченный графитсодержащий кварцбиотитово-полевошпатовый сланец. Образец № 2 – графитовый концентрат, полученный путем химического обогащения графитовой руды плавиковой кислотой (получен ИГ КарНЦ РАН). Образец № 3 – продукт промышленного обогащения, полученный флотационным методом в ВНИИнеруд г. Тольятти [Типовые нормы выработки..., 1984]. Образец № 4 – графитовый концентрат, полученный методом флотационного обогащения (ИГ КарНЦ РАН) [Бискэ, 1977].

Методы исследования

Методологической основой исследования послужил комплексный подход (РСА, КРС, СТА), успешно апробированный нами ранее для анализа структуры бразильского графита [Солонинкина и др., 2025].

Рентгеноструктурный анализ (РСА). Исследование выполнено на автоматизированном дифрактометре ДРОН-4 (Учебно-научная лаборатория РСА ПетрГУ, Петрозаводск) в геометрии Дебая-Шеррера (на просвет) с использованием MoKα-излучения (λ = 0,7107 Å), монохроматизированного кристаллом пиролитического графита. Выбор данного излучения обусловлен отсутствием флуоресценции со стороны углерода и его высокой проникающей способностью в образец. Дифракционные картины регистрировали в автоматическом режиме в двух угловых интервалах: 2–70° (шаг 0,02°, время счета 10 с/точка) и 70–145° (шаг 0,05°, время счета 10 с/точка). Для повышения

статистической достоверности данных, каждое измерение повторяли десять раз с последующим усреднением зависимости интенсивности от угла, I (2θ°). Положение образца фиксировали на оси вращения гониометра.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС регистрировали на дисперсионном спектрометре Nicolet Almega XR (Thermo Scientific) в аналитической лаборатории КарНЦ РАН (Петрозаводск). Измерения проводили с использованием лазера с длиной волны 532 нм через 50-кратный объектив. Спектры регистрировали в диапазоне 400–4000 $см^{-1}$ с временем накопления 300 с. Обработку спектров, включая аппроксимацию и разложение на компоненты, выполняли в программном обеспечении «Omnic».

Синхронный термический анализ (СТА). Термический анализ проведен на синхронном анализаторе STA 449 F1 Jupiter (NETZSCH) в лаборатории физико-химических исследований наноматериалов КарНЦ РАН (Петрозаводск). Образцы нагревали на воздухе со скоростью 10 °С/мин. до температуры 1200 °С. Обработку полученных термогравиметрических (ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) кривых выполняли с использованием программного обеспечения Proteus.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлены рентгенограммы исследованных образцов. Анализ дифракционных картин выявил существенные различия в их кристаллической структуре, непосредственно связанные с примененным методом обогащения.

Дифракционные картины образцов № 1, № 2 и № 3 характеризуются признаками сильно разупорядоченной, нанокристаллической структуры. На это указывает наличие широкого диффузного гало, на фоне которого наблюдаются слабые и уширенные дифракционные максимумы, соответствующие графитовой фазе. Такая картина типична для материалов с высоким содержанием дефектов, малым размером кристаллитов (турбостратная структура) или наличием сильно разупорядоченного углеродного компонента [Цыбуля, Черепанова, 2009]. В контексте данных образцов, наличие гало может быть обусловлено: присутствием аморфного углерода или силикатных примесей в исходном материале (№ 1),

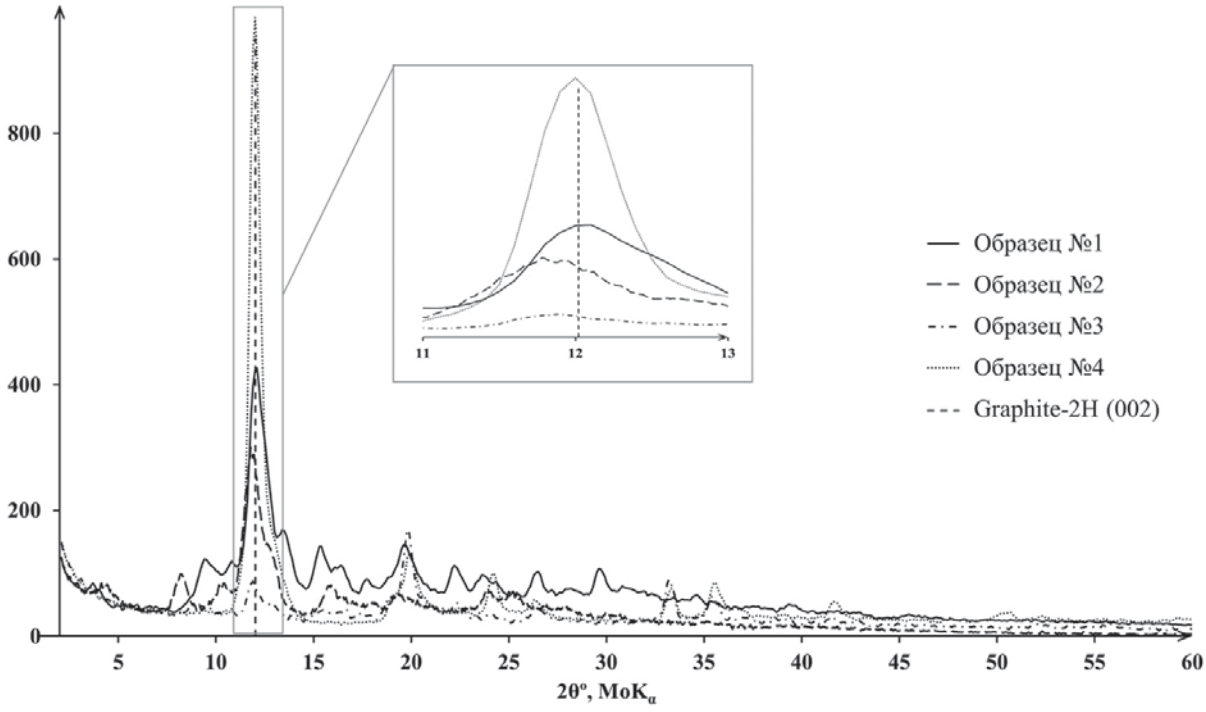


Рис. 1. Дифракционные картины рассеяния исследуемых образцов в сравнении, где:

– образец № 1; –- образец № 2; –·– образец № 3; ···· образец № 4; – эталонное положение пика графита 2H (002). На вставке вынесен участок дифрактограммы с пиком (002)

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the studied samples for comparison, where:

– sample no. 1; –- sample no. 2; –·– sample no. 3; ···· sample no. 4; – reference position of the 2H graphite (002) peak. The inset shows a section of the diffractogram featuring the (002) peak

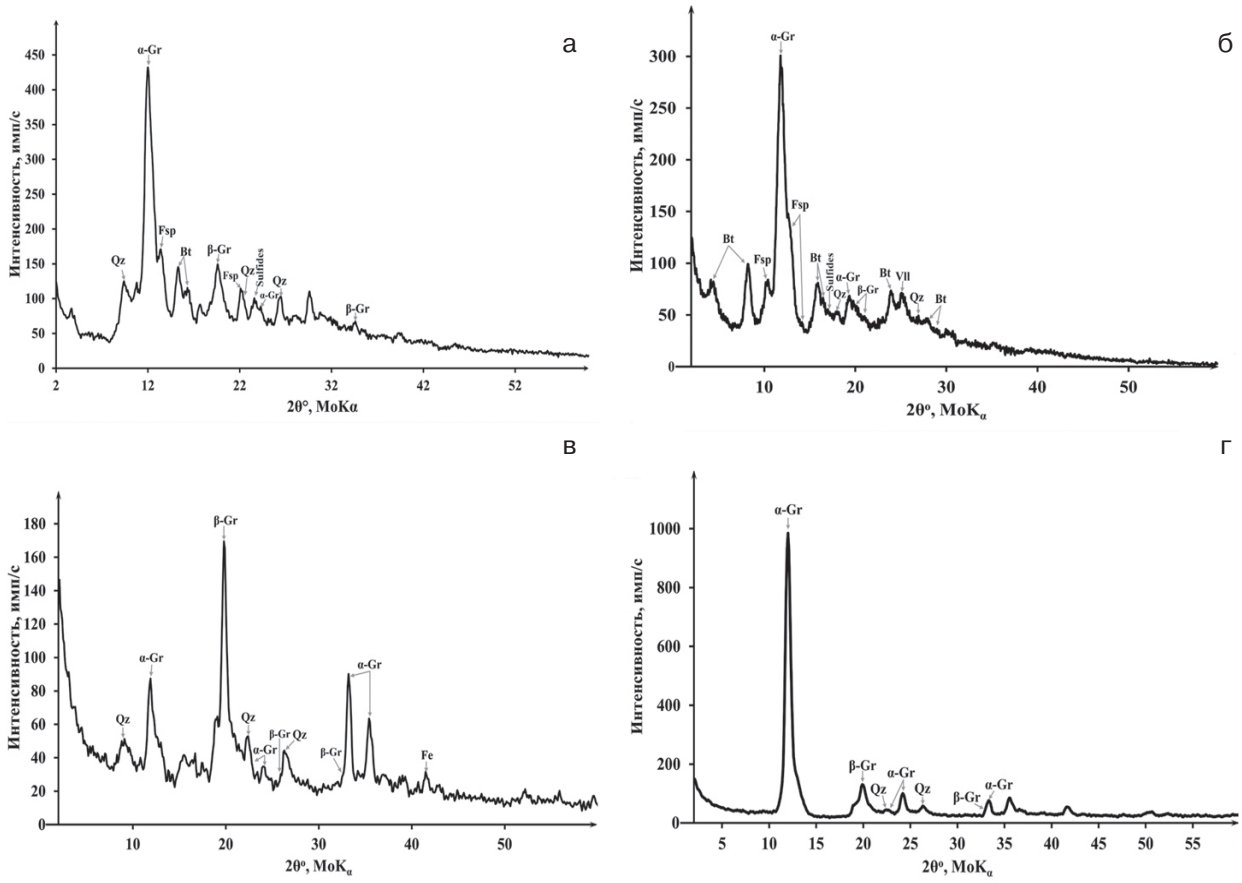


Рис. 2. Рентгенограммы исследуемых образцов Ихальского месторождения с указанием положения рефлексов (характеристических пиков) идентифицированных фаз, где:

а) – образец № 1, б) – образец № 2, в) – образец № 3, г) – образец № 4. Качественный и количественный фазовый анализ выполнен с использованием базы данных COD

Fig. 2. X-ray images of the studied samples of the Ikhalskoye deposit indicating the position of the reflexes (characteristic peaks) of the identified phases, where:

а) – sample no. 1, б) – sample no. 2, в) – sample no. 3, г) – sample no. 4. Qualitative and quantitative phase analysis was performed using the COD database

разрушением кристаллической решетки графита в процессе химического (№ 2) или механического (№ 3) воздействия, приводящего к росту дефектов и уменьшению размера кристаллитов.

В отличие от них, образец № 4 (флотационный концентрат) отражает картину, типичную для хорошо кристаллизованного графита. Наблюдаются интенсивные и узкие рефлексы, соответствующие гексагональной фазе графита с плотнейшей двухслойной упаковкой, что хорошо согласуется с литературными данными [Кузьмичева, 2000]. На высокое структурное совершенство указывает интенсивный и симметричный пик (002), свидетельствующий о строгой периодичности вдоль оси «с».

Для всех образцов на дифрактограммах наблюдается пик в области 2θ ≈ 12° (см. рис. 1), который соответствует отражению (002) гексагонального графита и характеризует межплоскостное расстояние. Полуширина этого пика минимальна для образца № 4, а для образцов № 1–3 она существенно возрастает, что указывает на меньший размер кристаллитов и повышенную дефектность их структуры. Кроме того, положение пика (002) для образцов № 1–3 незначительно смещено в сторону меньших углов по сравнению с образцом № 4. Это смещение может свидетельствовать об увеличенном среднем расстоянии между графеновыми слоями, наличием турбостратного графита или внедрением примесей между графеновыми слоями.

Идентификация кристаллических фаз во всех образцах была выполнена методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием программного комплекса Match! и базы данных Crystallography Open Database (COD). На рис. 2, а представлена дифрактограмма

исходного образца природного графита Ихальского месторождения (образец № 1) с отмеченными положениями рефлексов идентифицированных фаз.

В результате РФА установлено (табл. 2), что исходный образец содержит несколько кристаллических фаз, представленных преимущественно β- и α-графитами, а также идентифицируются такие породообразующие минералы, как кварц, полевой шпат, сульфиды и биотит. Полученный состав согласуется с особенностями геологического строения месторождения, представленного графитсодержащими сланцами и гнейсами с неоднородной степенью мигматизации.

Таблица 2. Характеристики образцов, полученные в ходе РФА и РСА

Table 2. Sample characteristics obtained from X-ray phase analysis (XPA) and X-ray diffraction (XRD) analyses

Рентгенофазовый анализ (РФА) X-ray phase analysis (XPA)				
Образец Sample	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Наименование кристаллической фазы и ее содержание The name of the crystalline phase and its content	β-графит (~18,2 мас.%) β-graphite (~18.2 wt.%)	β-графит (~0,8 мас.%) β-graphite (~0.8 wt.%)	β-графит (9,0 мас.%) β-graphite (9.0 wt.%)	β-графит (~0,6 мас.%) β-graphite (~0.6 wt.%)
	α-графит (46,1 % мас.%) α-graphite (46.1 wt.%)	α-графит (74,5 мас.%) α-graphite (74.5 wt.%)	α-графит (87,1 мас.%) α-graphite (86.6 wt.%)	α-графит (94,4 мас.%) α-graphite (94.4 wt.%)
	кварц (10,5 мас.%) quartz (10.5 wt.%)	кварц (3,7 мас.%) quartz (3.7 wt.%)	кварц (1,0 мас.%) quartz (1.0 wt.%)	кварц (5,0 мас.%) quartz (5.0 wt.%)
	полевой шпат (14,7 мас.%) feldspar (14.7 wt.%)	полевой шпат (9,2 мас.%) feldspar (9.2 wt.%)	н/д n/a	н/д n/a
	сульфиды (8,2 мас.%) sulfides (8.2 wt.%)	сульфиды (2,1 мас.%) sulfides (2.1 wt.%)	н/д n/a	н/д n/a
	биотит (2,4 мас.%) biotite (2.4 wt.%)	биотит (~7,6 мас.%) biotite (~7.6 wt.%)	н/д n/a	н/д n/a
	н/д n/a	виллиомит (2,1 мас.%) villiomite (2.1 wt.%)	железо (2,9 мас.%) iron (2.9 wt.%)	н/д n/a

Рентгеноструктурный анализ (РСА) X-ray Diffraction Analysis (XA)				
Образец Sample	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Межплоскостное расстояние d, нм Interplane distance d, nm	0,341	0,343	0,346	0,342
Размер кристаллитов L_c, нм Crystallite size L_c, nm	4,22	6,07	4,88	5,74
Степень граффитизации g, % Degree of graphitization g, %	87,8	26	≈ 0	87,8

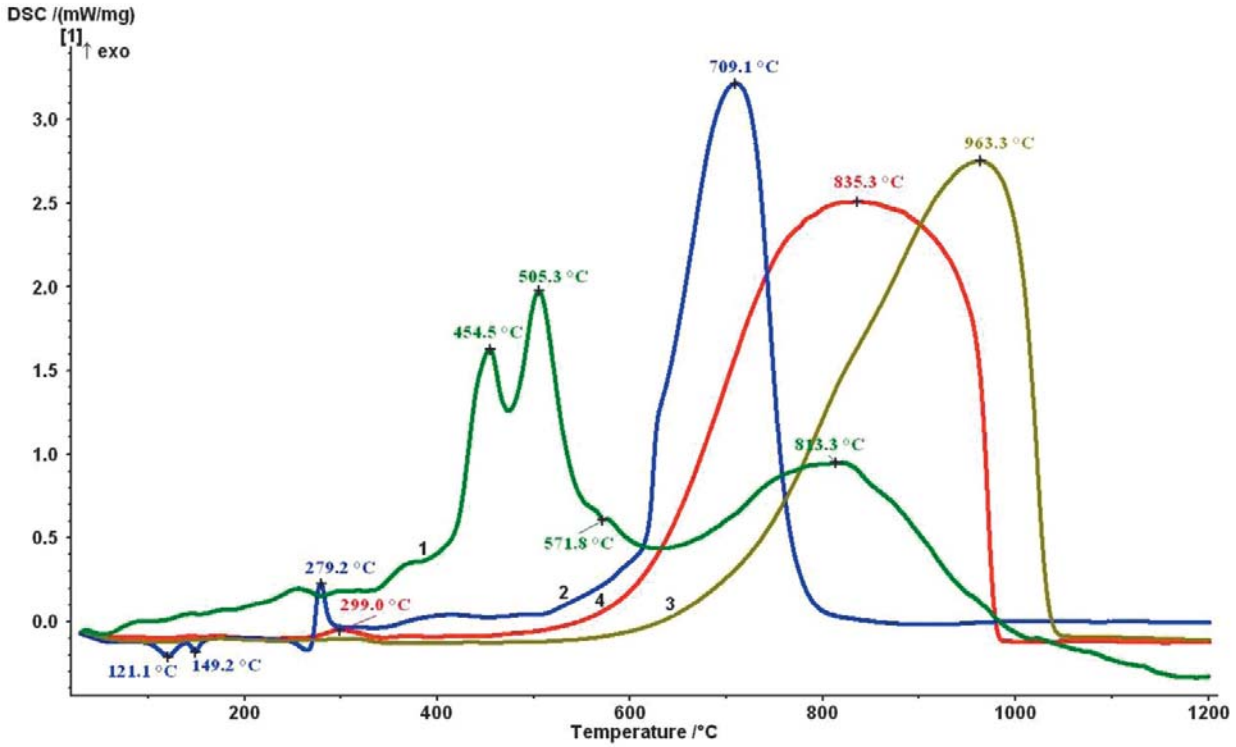


Рис. 3. Результаты синхронного термического анализа образцов графита (кривые ДСК), где: 1 – образец № 1, 2 – образец № 2, 3 – образец № 3, 4 – образец № 4

Fig. 3. Results of the simultaneous thermal analysis of the graphite samples (DSC curves), where: 1 – sample no. 1, 2 – sample no. 2, 3 – sample no. 3, 4 – sample no. 4

Для углеродной фазы рассчитаны ключевые структурные параметры, представленные в табл. 2. Согласно результатам, межплоскостное расстояние характерно для β-графита, размер кристаллитов вдоль оси «c» позволяет вычислить количество слоев, которое составило 12. Рассчитанная степень графитизации «g» соответствует частично графитизированному углероду. Наличие нескольких фаз в образце напрямую коррелирует с данными, полученными методом СТА (рис. 3), где каждая кристаллическая фаза проявляется в виде серии последовательных экзо- и эндотермических пиков (454,5 °C; 505,3 °C; 572,0 °C; 813,3 °C).

В табл. 3 представлены результаты, полученные в ходе исследования образцов методом СТА. Согласно данным, полученным при СТА (ТГ, ДТГ, ДСК, ДДСК), основная потеря массы составила ~8,98 % связанная с окислением отдельных чешуек графита и пирротина, что проявляется в серии доминирующих экзотермических эффектов (max ДСК-пиков при ~454,5 и 505,3 °C). Наложение слабого эндотермического эффекта на пик при ~572,0 °C отражает процесс инверсии кварца, что объясняет высокую остаточную массу (91,02 %). Эндотермический эффект в области ~700,1050 °C соответствует разложению фазе углерода.

Таблица 3. Характеристические температуры ТГ и ДСК исследуемых углеродных материалов

Table 3. Key thermal parameters (TGA and DSC) of the studied carbon materials

Образец Sample	Температура, °C Temperature, °C			Содержание углерода, % Carbon content, %
	начала окисл. the beginning of oxidation	конца окисл. the ends are oxidized	max ДСК-пика max DSC peaks	
№ 1	665,6	957,8	813,3	5,81
№ 2	615,7	766,1	709,1	76,28
№ 3	695,6	1034,1	963,3	86,49
№ 4	614,7	978,7	835,3	96,45

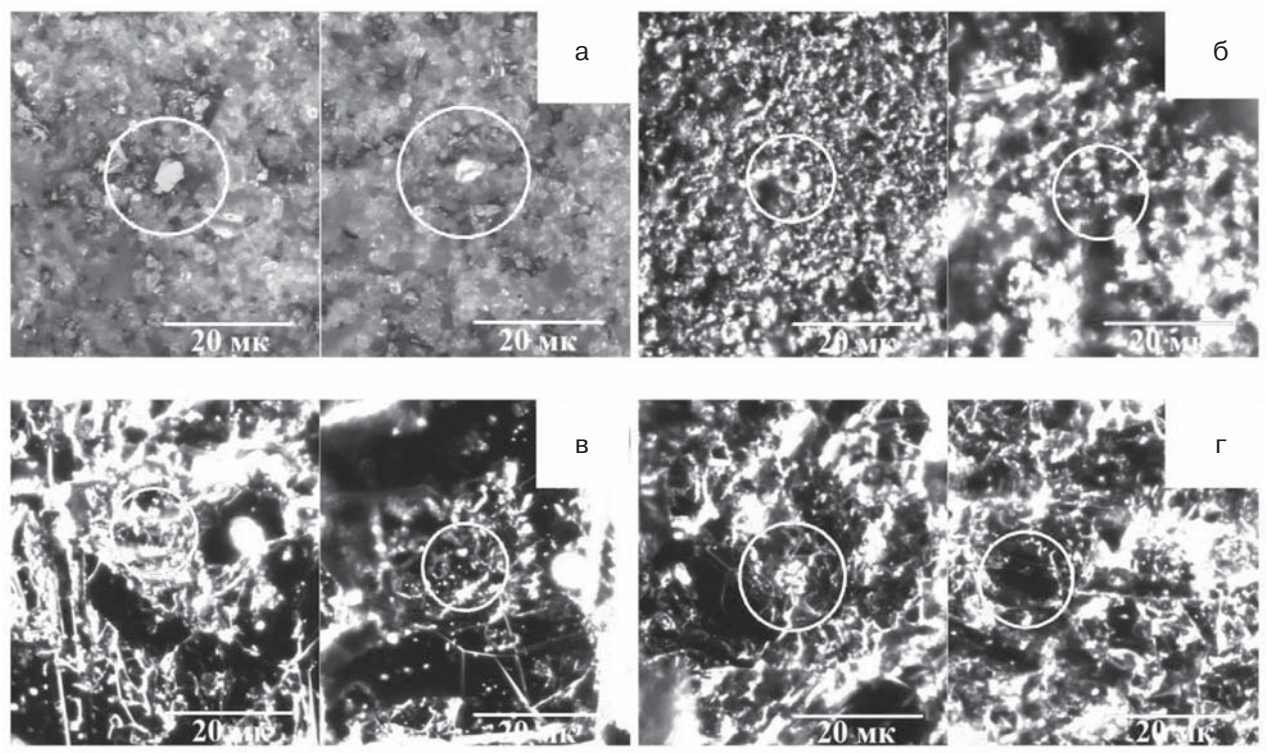


Рис. 4. Оптические микрофотографии образцов с указанием точек проведения спектроскопии КРС:
а – образец № 1, б – образец № 2, в – образец № 3, г – образец № 4

Fig. 4. Optical microphotographs of the samples showing the Raman spectroscopy measurement points:
a – sample № 1, b – sample № 2, c – sample № 3, d – sample № 4

Спектроскопия КРС, полученная в нескольких точках образца (рис. 4, а), также выявила неоднородность степени упорядочения графита.

На рис. 5, а представлены спектры КРС, а полученные сведения позиций основных пиков графитовой фазы и рассчитанные значения интегральных интенсивностей (I_D/I_G) пиков D и G сведены в табл. 4. Спектры демонстрируют широкий диапазон структурных состояний – от зон с исключительно высокой степенью совершенства ($I_D/I_G \rightarrow 0$) до областей с сильным разупорядочением ($I_D/I_G = 0{,}56$).

Для количественной оценки структурного совершенства графита традиционно используется отношение интегральных интенсивностей D- и G-пиков (I_D/I_G). G-полоса (~1580 $см^{-1}$) соответствует колебаниям атомов углерода в идеальной гексагональной решетке и присутствует во всех графитоподобных материалах. D-полоса (~1350 $см^{-1}$), напротив, является индикатором дефектности: ее интенсивность возрастает при нарушении дальнего порядка – наличии краев кристаллитов, точечных дефектов, гетероатомов или иных искажений решетки. Соответственно, чем меньше значение I_D/I_G, тем выше структурное совершенство и больше размер кристаллитов, и наоборот [Tuinstra, Koenig, 1970; Ferrari, Robertson, 2000]. Таким образом, регистрируемые значения I_D/I_G от 0 до 0,56 отражают широкий спектр структурных состояний углерода – от практически идеального монокристаллического графита до сильно дефектного нанокристаллического материала.

В части микрозон наблюдаются спектры, характерные для структурно совершенного графита: присутствует лишь узкий G-пик и интенсивный 2D-пик при полном отсутствии D-пика, что указывает на минимальное количество дефектов. Помимо этого, идентифицированы зоны с умеренной дефектностью, где в спектрах четко наблюдаются как D-, так и G-пики графита с характерным соотношением их интенсивностей. В этих же областях зарегистрированы спектральные линии минеральных примесей, в частности, кварца (~463 $см^{-1}$).

Для оценки эффективности химического обогащения был исследован образец № 2, полученный после обработки исходного природного графита плавиковой кислотой (HF). Сравнительный анализ выявил существенное влияние кислотной обработки на фазовый состав и структурные характеристики углеродной фазы.

Таблица 4. Позиции основных пиков в спектрах КРС, отношение интегральных интенсивностей (I_D/I_G) пиков D и G

Table 4. Positions of the main peaks in the Raman spectra and the integral intensity ratio (I_D/I_G) of the D and G peaks

Образец Sample	Позиция, $см^{-1}$ Position, cm^{-1}				(I_D/I_G)
	D	G	2D	D’	
№ 1	–	1578,7	2706,0	–	0
	1316,0	1581,0	–	–	0,56
№ 2	1350,9	1573,7	2699,6		0,17
	1353,3	1577,7	2704,8		0,21
№ 3	1352,4	1580,8	2709,5		0,04
	1350,9	1580	2711,7		0,22
№ 4	1334,5	1578,9	2717,0		0,01
	1346,3	1579,9	2716,0		0,18

Результаты рентгенофазового анализа образца № 2 (см. рис. 2, б) выявили кардинальное изменение фазового состава. Обработка плавиковой кислотой приводит к уменьшению содержания породообразующих минералов, что свидетельствует о высокой эффективности HF по отношению к силикатным и сульфидным фазам. Кроме того, идентифицирована новая фаза (см. табл. 2) – виллиомит, который является вторичным продуктом реакции взаимодействия кислоты с полевыми шпатами. Наблюдаемое преимущественное замещение метастабильной ромбоэдрической модификации (β-графит) стабильной гексагональной

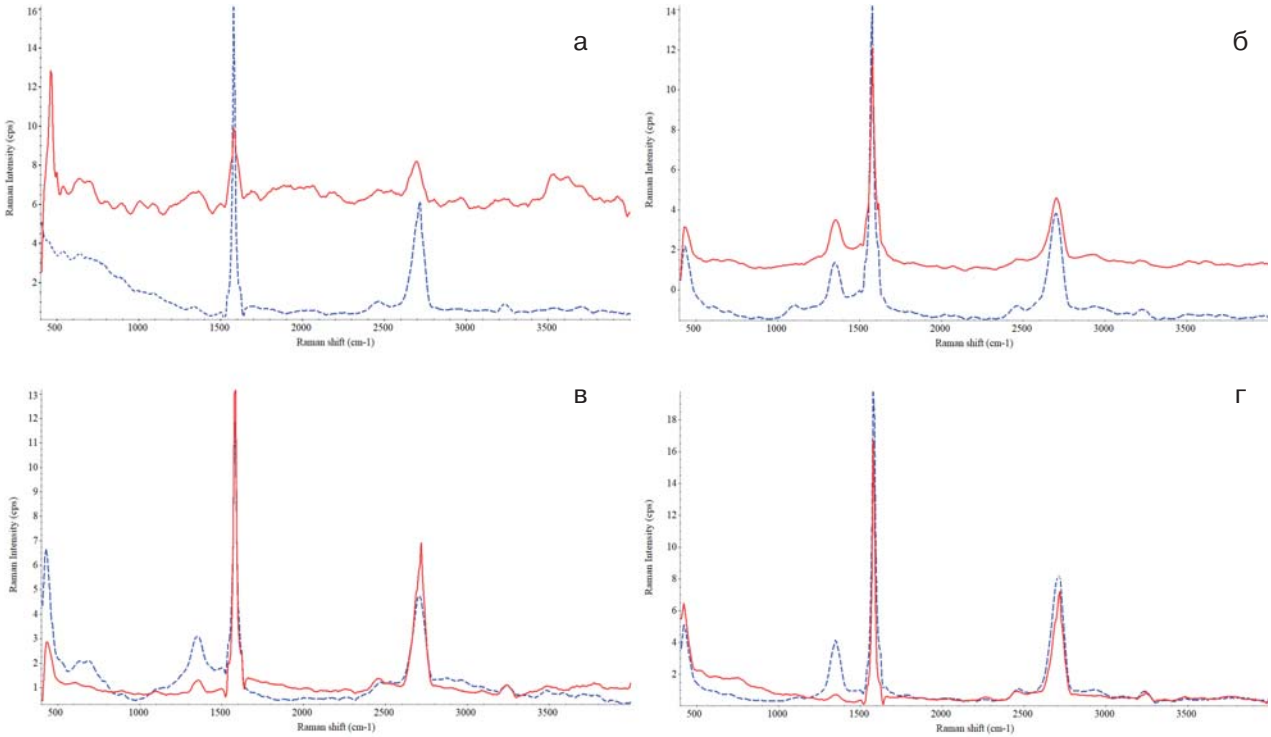


Рис. 5. Спектры КРС образцов, демонстрирующие структурное состояние углеродной фазы в разных точках (— точка 1, – – точка 2): а – образец № 1, б – образец № 2, в – образец № 3, г – образец № 4

Fig. 5. Raman spectra of the samples demonstrating the structural state of the carbon phase at different measurement points (— point 1, – – point 2): a – sample no. 1, б – sample no. 2, в – sample no. 3, г – sample no. 4

(α-графит), вероятно, связано с процессом перекристаллизации в ходе химической обработки. Для углеродной фазы рассчитаны структурные параметры (см. табл. 2). Установлено, что межплоскостное расстояние существенно превышает теоретическое значение для идеального α-графита (~0,335 нм). Такое увеличение является характерным признаком турбостратной упаковки графеновых слоев, при которой нарушается их четкая ориентация друг относительно друга. Вклад в увеличение d_{002} также могут вносить остаточные межслоевые примеси и дефекты. Рассчитанное значение размера кристаллитов L_c соответствует нанокристаллическому строению, однако, превышает таковое значение для исходного образца (4,2 нм), что свидетельствует об устранении части дефектов и упорядочении структуры в процессе очистки. Степень графитизации осталась в интервале, характерном для частично графитизированного углерода.

Данные СТА (см. рис. 3) подтвердили изменение фазового состава. Термограмма образца № 2 отличается от термограммы исходного графита, как по количеству, так и по характеру тепловых эффектов, что отражает формирование новых фаз.

На кривой ДСК четко наблюдаются два эндотермических эффекта (см. табл. 3) до ~150 °С, которые соответствуют процессам удаления воды. Интенсивный экзотермический эффект с максимумом при 709,1 °С сопровождается основной потерей массы и представляет собой сложный процесс окисления основной массы α-графита. Важным наблюдением является наличие на кривой ДСК плеча в области ~650 °С, который соответствует окислению остаточных углеродных фаз с более высокой дефектностью или иным типом упаковки слоев, что согласуется с гипотезой о превращении β-графита в более устойчивую фазу графита – α-графит. Экзотермический пик при 279,2 °С может быть связан с окислением органических соединений. На кривых ТГ наблюдался ступенчатый характер потери массы (суммарно 76,28 %), который отражает разложение новообразованных фаз, а высокая остаточная масса обусловлена наличием виллиомита и оксидами.

Структурная неоднородность образца № 2, визуально наблюдаемая на рис. 4, б, была детально исследована методом КРС. На рис. 5, б представлены спектры КРС, зарегистрированные в указанных точках, которые также показывают структурную неоднородность образца. В частности, наблюдаются зоны со спектрами, характерными для графитов с высоким структурным порядком и умеренным уровнем дефектов (см. табл. 4). Также присутствует промежуточный тип спектра, соответствующий микрокристаллическому графиту со средней степенью упорядоченности.

Для переработки природного графита также применяются промышленные методы. В рамках данного исследования был изучен образец, обогащенный по стандартной технологии во ВНИИнеруде (г. Тольятти) (образец № 3) [Бискэ, Скамницкая, 2018]. Сравнительный анализ с исходным образцом (образец № 1) позволил оценить эффективность данной технологии в повышении содержания углеродной фазы и изменении ее структурных характеристик.

По данным РСА и рентгенофазового анализа (см. рис. 2, в), суммарная доля углеродных фаз в образце возросла до 96,1 % по сравнению с 64,3 % в исходной руде (см. табл. 2). Расчетные структурные параметры углеродной фазы свидетельствуют о ее глубоком структурном разупорядочении. Межплоскостное расстояние превышает значения как для идеального β-графита (~0,344 нм), так и для α-графита (~0,335 нм). Такое увеличение, наряду с малым размером кристаллитов, является характерным признаком турбостратной упаковки слоев с высокой плотностью дефектов. Степень графитизации (g) соответствует сильно разупорядоченному (турбостратному) углероду. Обработка позволила значительно снизить содержание основных примесей: доля кварца уменьшилась, а полевые шпаты, сульфиды и биотиты, присутствовавшие в исходном образце, были полностью удалены, что свидетельствует об эффективности данной технологии в отношении породообразующих минералов. При этом в составе образца № 3 обнаружена металлическая фаза железа, которая может являться как продуктом преобразования биотитов и сульфидов в процессе обогащения, так и техногенной примесью (например, продуктом износа оборудования).

Данные СТА (см. рис. 3) согласуются с результатами РСА и наглядно демонстрируют эффективность промышленного обогащения. На кривой ДСК наблюдается единственный интенсивный экзотермический пик (см. табл. 3), с плечом в области ~820 °С, который соответствует процессу окисления углеродной фазы. Кривая ТГ продемонстрировала три ступени потери массы. Незначительные потери на первых двух ступенях (0,08 % и 1,64 %) могут быть связаны с удалением воды с поверхности или удалением следовых органических примесей. Основная масса теряется на третьей ступени, что напрямую связано с окислением углерода. Суммарная потеря массы хорошо коррелирует

с высоким содержанием углеродной фазы (90,0 %), установленным методом РСА. Низкая остаточная масса (11,73 %) подтверждает эффективное удаление минеральных примесей в процессе обогащения, в первую очередь – кварца.

Структурная неоднородность образца № 3 (см. рис. 4, в) была исследована методом КРС. На рис. 5, в представлены спектры КРС, зарегистрированные в указанных точках, которые показывают принципиальные различия в составе и строении углеродной фазы в различных микрозонах образца (табл. 4).

В первой зоне наблюдается спектр с доминирующей острым G-пиком и минимальным отношением интенсивностей D- и G-пиков, что свидетельствует о присутствии участков графита с практически идеальной кристаллической решеткой. Спектр второй зоны контрастен первой и характеризуется интенсивными, но уширенными D- и G-пиками. Значительно более высокое отношение их интенсивностей указывает на область с высокой концентрацией дефектов в углеродной матрице. На всех полученных спектрах идентифицирован пик, соответствующий кварцу, что подтверждает наличие данной минеральной примеси во всем исследованном объеме материала.

Результаты РФА графитового концентрата (образец № 4), представленные на рис. 3, г, демонстрируют его высокую степень очистки. Дифрактограмма характеризуется интенсивными и резкими рефлексами, соответствующими преимущественно α-графиту (см. табл. 2). Идентифицирована лишь фаза кварца и незначительное содержание β-графита. Рассчитанные структурные параметры углеродной фазы показывают, что межплоскостное расстояние близко к значению идеального α-графита, незначительное увеличение d_{002} относительно теоретического значения (~0,335 нм) может быть связано с остаточной турбостратной упаковкой слоев, характерной для природных графитов. Размер кристаллитов указывает на наноразмерность вдоль оси «c», а рассчитанная степень графитизации на высокий уровень кристаллического совершенства. Количественный анализ подтвердил, что доля стабильной углеродной фазы в данном концентрате достигает 94,4 %, что делает его наиболее чистым материалом среди всех исследованных образцов.

Данные СТА (см. рис. 3), полученные при нагреве до 1200 °С, полностью коррелируют с выводами РСА о высокой чистоте концентрата. На кривой ДСК наблюдаются два экзотермических эффекта (см. табл. 3). Слабый пик при 299,0 °С может быть связан с окислением небольшого количества аморфного углерода или органических примесей. Доминирующий интенсивный экзотермический пик, сопровождающийся потерей 96,45 % массы, соответствует окислению основной массы кристаллического графита. Суммарная выгоревшая масса хорошо согласуется с содержанием углеродной фазы, установленным методом РСА. Крайне низкая остаточная масса (3,04 %) подтверждает эффективность удаления минеральных примесей.

Методом КРС детально исследована визуально наблюдаемая структурная неоднородность образца на рис. 4, г. Анализ выявил гетерогенность даже в высокоочищенном концентрате, представленную участками с принципиально различным строением.

Зарегистрированы спектры (рис. 5, г), характерные для практически идеального графита с исключительно низким уровнем дефектов и полным отсутствием посторонних фаз (см. табл. 4). В других зонах наблюдается сильно дефектная углеродная фаза с более высокой плотностью нарушений в кристаллической решетке. Общим для всех исследованных областей является присутствие пика кварца (~426 $см^{-1}$).

Полученные данные убедительно доказывают, что даже наиболее эффективное обогащение не устраняет полностью микронеоднородность природного графита. Концентрат представляет собой сложный материал, содержащий как зоны исключительного структурного совершенства, так и области с развитой дефектной структурой, что определяет его свойства и потенциальные области применения.

Выводы

Комплексное применение рентгенофазового анализа, синхронного термического анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния света показало высокую информативность данных методов для установления фазового состава, количественного содержания углерода и структурных характеристик природного графита Ихальского месторождения и продуктов его обогащения.

Установлено, что исходный природный графит («Ихала-1») характеризуется сложным фазовым составом с низким содержанием углеродной фазы, представленной β-графитом (18,2 %) и α-графитом (46,1 %), а также значительной долей минеральных примесей: кварца (10,5 %), полевого шпата (14,7 %), сульфидов (8,2 %) и биотитов (2,4 %), что обусловливает необходимость его обогащения.

Различные методы обогащения по-разному влияют на фазовый состав и структуру конечного продукта:

а) химическое обогащение (плавиковая кислота) уменьшает количество минеральных примесей в образце, снижает содержание β-графита до 0,8 % и увеличивает содержание гексагонального графита до 76,5 %;

б) промышленное флотационное обогащение (ВНИИнеруд, г. Тольятти) позволяет получить концентрат с содержанием углерода > 90,0 % с преобладанием гексагональной модификации графита;

в) разработанная методика Н. С. Бискэ (КарНЦ РАН) [Бискэ, 1977] обеспечивает получение наиболее чистого концентрата (95 % углерода), представленного преимущественно α-графитом с высокой структурной упорядоченностью.

Также установлена корреляция между данными РСА, СТА и КРС. Показано, что суммарная выгоревшая масса при окислении (по данным ТГ) хорошо согласуется с содержанием углеродной фазы, определенным методом РСА.

Структурно-фазовые характеристики находятся в прямой связи с геологическими условиями формирования Ихальского месторождения. Выявленная микронеоднородность, тесное нахождение графита с кварцем, сульфидами железа, полевыми шпатами и биотитами, а также одновременное существование полиморфных модификаций графита (α- и β-графит) являются прямым отражением метаморфогенного происхождения руд в процессе регионального метаморфизма углеродсодержащих толщ.

Комплекс полученных данных характеризует технологические свойства сырья. В частности, все три обогащенных образца (№ 2, № 3, № 4) имеют размер кристаллитов L_c в диапазоне 4,88–6,07 нм, что соответствует рекомендуемому диапазону для использования в качестве прекурсоров для получения малослойного графена (5–30 нм) [Mori et al., 2018]. Наиболее перспективным в этом отношении является образец № 3, который демонстрирует турбостратную структуру с максимальным межплоскостным расстоянием (0,346 нм) и наименьшим размером кристаллитов (4,88 нм). Однако присутствие металлической фазы железа (4,7 %) требует дополнительной очистки.

Проведенные исследования доказывают, что для комплексной оценки структуры и свойств природного графита необходимо сочетание РСА, СТА и КРС методов анализа. Установленная связь между особенностями вещественного состава и геологической историей месторождения позволяет не только оптимизировать технологии обогащения графитового сырья, но и прогнозировать структурно-фазовые характеристики концентратов в зависимости от генетического типа руд.

Литература

Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В., Шульдинер В. И. Мейерский надвиг – главный элемент строения сутуры на границе Карельского кратона и свекофеннского комплекса в Приладожье, Балтийский щит // Доклады Российской академии наук. 1996. Т. 348, № 3. С. 353–356.

Балтыбаев Ш. К. Флюидые включения и РТ-режим формирования лейкосом мигматитов натрового ряда в гранулитовой части Приладожья (Ю. Карелия) // Зап. ВМО. 2002. Ч. CXXXI, № 5. С. 22–39.

Балтыбаев Ш. К., Левченков О. А. Вулканиты в свекофеннидах Приладожья и результаты U-Pb, Pb-Pb датирования пород разного генезиса как основа для корреляции свекофеннских событий // Геологическая корреляция. 2005. Т. 13, № 2. С. 3–18.

Балтыбаев Ш. К., Глебовицкий В. А., Козырева И. В. и др. Геология и петрология свекофеннид Приладожья. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. 200 с.

Балтыбаев Ш. К., Левский Л. К., Левченков О. А. Свекофеннский пояс Фенноскандии: пространственно-временная корреляция раннепротерозойских эндогенных процессов. М.: Наука, 2009. 276 с.

Бискэ Н. С. Оптимальные условия обогащения и возможности применения кристаллического графита [Текст]. Петрозаводск, 1977. [3] с. (Информ. листок о науч.-техн. достижении / Карельский МТЦНТИ; № 76–77).

Бискэ Н. С. Графитовое оруденение Северного Приладожья (геология и генетические особенности). Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. 172 с.

Бискэ Н. С., Колодей В. А. КР-спектры графита из месторождений и проявлений Приладожья // Проблемы и перспективы современной минералогии (Юшкинские чтения–2014). Сыктывкар, 2014. С. 94–95.

Бискэ Н. С., Скамницкая Л. С. Графитовые руды Карелии: обогатимость и перспективы промышленного использования // Разведка и охрана недр. 2018. № 12. С. 33–40.

Великославинский Д. А. Сравнительная характеристика регионального метаморфизма умеренных и низких давлений. Л.: Наука, 1972. 192 с.

Глебовицкий В. А., Балтыбаев Ш. К., Левченков О. А. и др. Время и длительность и РТ-параметры полистадийного метаморфизма свекофеннид Приладожья: результаты определения изотопного возраста // ДАН. 2001. Т. 377, № 5. С. 667–671.

Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году / Гл. ред. Д. Д. Тетенькин, О. В. Казанов. М.: ФГБУ «ВИМС», 2024. 710 с.

Кононов В. А. Графит: рынок, добыча, свойства, применение // Новые огнеупоры. 2021. № 3. С. 3–10. doi: 10.17073/1683-4518-2021-3-3-10

Кузьмичева Г. М. Теория плотнейших шаровых упаковок и плотных шаровых кладок. М.: Изд-во МГУ, 2000. 36 с.

Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Графит // Инструкция утверждена распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р. М.: ФГУ ГКЗ, 2007. 30 с. + 1 прил. URL: https: //www.geokniga.org›geokniga-metrek-grafit

Минерально-сырьевая база Республики Карелия / Ред. В. П. Михайлов, В. Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2006. Кн. 2. 356 с.

Нагайцев Ю. В. Петрология метаморфических пород ладожского и беломорского комплексов. Л.: Наука, 1974. 180 с.

Недра Северо-Запада Российской Федерации / В. А. Коровкин, Л. В. Турылев, Д. Г. Руденко, В. А. Журавлев, Г. Н. Ключникова. СПб.: Изд-во СПб фабрики картографии ВСЕГЕИ, 2003. 520 с.

Островский В. С., Виргильев Ю. С., Костиков В. И., Шипков Н. Н. Искусственный графит. М.: Металлургия, 1986. 272 с.

Скамницкая Л. С., Бискэ Н. С. Графитовые руды Ихальского месторождения: основные природные типы и их технологическая оценка // Горный журнал. 2019. № 3. С. 55–60. doi: 10.17580/gzh2019.03.11

Солонинкина М. В., Логинов Д. В., Мошкалев С. А., Рожкова Н. Н. Анализ структуры бразильского графита посредством методов рентгеновской дифракции, растровой электронной микроскопии и термогравиметрического анализа с синхронной дифференциальной сканирующей калориметрией // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2025. № 4. С. 11–19. doi: 10.31857/S1028096025040026

Типовые нормы выработки на производство графита / разраб. ВНИИнеруд; утв. М-вом пром-сти строит. материалов СССР 12.09.1984. Тольятти: ВНИИнеруд, 1984. 18 с.

Цыбуля С. В., Черепанова С. В. Введение в структурный анализ нанокристаллов. Новосибирск: НГУ, 2009. 59 с.

Шульдинер В. И., Балтыбаев Ш. К., Козырева И. В. Тектоно-метаморфическое районирование Приладожья // Вестник СПбГУ. 1997. Вып. 3, сер. 7. С. 63–70.

Щипцов В. В., Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С. Теория и практика обогащения минерального сырья Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 9. С. 183–196.

Щипцов В. В., Бурцев И. Н., Жиров Д. В. и др. Промышленные минералы севера европейской части России // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 6. С. 7–35. doi: 10.17076/them1267

Щипцов В. В. Графитоносные рудные районы Фенноскандинавского щита // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 2. С. 33–49. doi: 10.17078/geo1551

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Никифоров А. Г., Фролов П. В. Минералого-технологические особенности графитовых руд Фенноскандинавского щита // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. С. 16–23. doi: 10.17076/tm14_32

Щипцов В. В., Ковалевский В. В. Сравнительное исследование графитов месторождений Завальевское (Украина) и Ихальское (Республика Карелия, Россия) // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горно-химического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов. Плаксинские чтения–2024. Апатиты: КНЦ РАН, 2024. С. 115–118. doi:10/37614/978-5-91137-532-2

Щипцов В. В., Светов С. А. Минерально-сырьевая база Карелии: промышленные минералы // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 5–44. doi: 10.17016/geo2208

Beyssac O., Rumble D. Graphitic carbon: a ubiquitos, diverse and useful geomaterial // Elements. 2014. no. 10. P. 415–420. doi:10.2113/gselements.10.6.415

Ekdahl E. Early proterozoic Karelian and Svecofennian formations and the Evolution of the Raahe-Ladoga Ore Zone, based on the Pielavasi area, central Finland // Geol. Surv. of Finland. Bull. 1993. no. 173. 137 p.

Engvik A. K., Gautneb H., Knežević Solberg J., Rønning J. S. & Austrheim H. High-grade formation of graphite in Vesterålen, northern Norway, and its consequences for petrophysical properties of the lower continental crust // NGF Abstracts and Proceedings of 34th Nordic Geological Winter Meeting. 2020. P. 56.

Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Physical review B. 2000. Vol. 61, no. 20. C. 14095.

Gautneb H., Tveten E. The geology, exploration and characterization of graphite deposits in the Jennestad area, Vesterålen area northern Norway // Norges geologiske undersøkelse Bulletin. 2000. Vol. 436. P. 67–74.

Gautneb H., Wanvik J. E. The graphite shchists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway // Report NGU no. 2016.10. 2016.

Leading Edge Materials. Wohna graphite. 2018. URL: https: // leadingedgematerialscom/woxna-graphite / Accessed 27 October 2019

Mori F., Kubouchi M., Arao Y. Effect of graphite structures on the productivity and quality of few-layer graphene in liquid-phase exfoliation // Journal of materials science. 2018. Vol. 53, no. 18. P. 12807–12815.

Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H. et al. High-quality flake graphite occurrences in a high-grade metamorphic region in Sortland, Vesterålen, northern Norway // Nor. J. Geol. 2016. no. 96. P. 19–26.

Rønning J. S., Gautneb H., Larsen B. E. et al. Geophysical and geological investigations of graphite occurrences in Vesterålen and Lofoten, Northern Norway 2017 // NGU report 2018.011. Geological Survey of Norway. 2018.

Tuinstra F., Koenig J. L. Raman spectrum of graphite // The Journal of chemical physics. 1970. Vol. 53, no. 3. P. 1126–1130.

Wong C. H. A., Sofer Z., Pumera M. Geographical and geological origin of natural graphite heavily influence the electrical and electrochemical properties of chemically modified graphenes // Chemistry–A European Journal. 2015. Vol. 21, no. 23. P. 8435–8440.

References

Baltybaev Sh. K., Glebovitsky V. A., Kozyreva I. V., Shul'diner V. I. The Meyersky Thrust as the main structural element of the suture at the boundary between the Karelian Craton and the Svecofennian Complex in the Ladoga region, Baltic Shield. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences.* 1996;348(3):353–356. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K. Fluid inclusions and P-T conditions of leucosome formation in sodic migmatites of the granulite facies in the Ladoga region (South Karelia). *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva = Zapiski of the Russian Mineralogical Society.* 2002; CXXXI(5):22–39. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A. Volcanics in the svecofennides of the Ladoga region and results of U-Pb, Pb-Pb dating of rocks of different genesis as a basis for correlation of Svecofennian events. *Geol. korrelyatsiya = Geol. Correlation.* 2005;13(2):3–18. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Glebovitsky V. A., Kozyreva I. V. et al. Geology and petrology of the svecofennides of the Ladoga region. St. Petersburg: St. Petersburg State University Press; 2000. 200 p. (In Russ.)

Baltybaev Sh. K., Levsky L. K., Levchenkov O. A. The Svecofennian Belt of Fennoscandia: spatiotemporal correlation of Early Proterozoic endogenous processes. Moscow: Nauka; 2009. 276 p. (In Russ.)

Beyssac O., Rumble D. Graphitic carbon: a ubiquitous, diverse and useful geomaterial. *Elements*. 2014;10:415–420. doi: 10.2113/gselements.10.6.415

Biske N. S. Optimal enrichment conditions and the possibility of using crystalline graphite. Information leaflet on scientific and technical achievements. Karelian Intersectoral Territorial Centre for Scientific and Technical Information and Propaganda. No. 76–77. Petrozavodsk: 1977. 3 p. (In Russ.)

Biske N. S. Graphite mineralization of the Northern Ladoga region (geology and genetic features). Petrozavodsk: Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1987. 172 p. (In Russ.)

Biske N. S., Kolodey V. A. Raman spectra of graphite from deposits and occurrences in the Ladoga region. Problems and perspectives of modern mineralogy (Yushkin Readings – 2014). Syktyvkar; 2014. P. 94–95. (In Russ.)

Biske N. S., Skamnitskaya L. S. Graphite ores of Karelia: beneficiation and prospects for industrial use. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2018;12:33–40. (In Russ.)

Ekdahl E. Early Proterozoic Karelian and Svecofennian formations and the evolution of the Raahe-Ladoga ore zone, based on the Pielavesi area, central Finland. *Geol. Surv. of Finland. Bull*. 1993;173:137.

Engvik A. K., Gautneb H., Knežević Solberg J., Rønning J. S., Austrheim H. High-grade formation of graphite in Vesterålen, northern Norway, and its consequences for petrophysical properties of the lower continental crust. *NGF Abstracts and Proceedings of 34th Nordic Geological Winter Meeting*. 2020. 56 p.

Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*. 2000;61(20):14095.

Gautneb H., Tveten E. The geology, exploration and characterization of graphite deposits in the Jennestad area, Vesterålen area northern Norway. *Norges Geologiske Undersøkelse Bulletin*. 2000;436:67–74.

Gautneb H., Wanvik J. E. The graphite shists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway. NGU Report no. 2016.10. Geological Survey of Norway. 2016.

Glebovitsky V. A., Baltybaev Sh. K., Levchenkov O. A. et al. Time, duration, and P-T parameters of the polystage metamorphism of the Ladoga region Svecofennides: results of isotopic dating. *Doklady Akademii nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2001;377(5):667–671. (In Russ.)

Kononov V. A. Graphite: market, mining, properties, application. *Novye ogneupory = New Refractories*. 2021;3:3–10. (In Russ.). doi: 10.17073/1683-4518-2021-3-3-10

Korovkin V. A., Turylev L. V., Rudenko D. G., Zhuravlev V. A., Klyuchnikova G. N. Subsoil resources of the Northwestern Russian Federation. St. Petersburg: Cartographic Factory of VSEGEI; 2003. 520 p. (In Russ.)

Kuz'micheva G. M. Theory of densest sphere packings and dense sphere assemblages. Moscow: Moscow State University Press; 2000. 36 p. (In Russ.)

Leading edge materials. Woxna graphite. 2018. URL: https://leadingedgematerials.com/woxna-graphite (accessed 27.10.2019).

Methodological guidelines for the application of the classification of reserves of deposits and predicted resources of solid minerals. Graphite. Instruction approved by order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 37-r dated 05.06.2007. Moscow: FSI GKZ; 2007. 30 p. (In Russ.). URL: https://www.geokniga.org/geokniga-metrek-grafit

Mikhailov V. P., Aminov V. N. (eds.). Mineral resource base of the Republic of Karelia. Book 2. Petrozavodsk: Karelia; 2006. 356 p. (In Russ.)

Mori F., Kubouchi M., Arao Y. Effect of graphite structures on the productivity and quality of few-layer graphene in liquid-phase exfoliation. *Journal of Materials Science*. 2018;53(18):12807–12815.

Nagaitsev Yu. V. Petrology of metamorphic rocks of the Ladoga and Belomorian Complexes. Leningrad: Nauka; 1974. 180 p. (In Russ.)

Ostrovskii V. S., Virgil'ev Yu. S., Kostikov V. I., Shipkov N. N. Artificial graphite. Moscow: Metallurgiya; 1986. 272 p. (In Russ.).

Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H. et al. High-quality flake graphite occurrences in a high-grade metamorphic region in Sortland, Vesterålen, northern Norway. *Nor. J. Geol*. 2016;96:19–26.

Rønning J. S., Gautneb H., Larsen B. E. et al. Geophysical and geological investigations of graphite occurrences in Vesterålen and Lofoten, Northern Norway 2017. NGU Report 2018.011. Geological Survey of Norway. 2018.

Sharov N. V. (ed.). Ladoga Proterozoic structure (geology, deep structure and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2020. 435 p. (In Russ.)

Shul'diner V. I., Baltybaev Sh. K., Kozyreva I. V. Tectonic-metamorphic zoning of the Ladoga region. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta = Vestnik of St. Petersburg University*. 1997;3(7):63–70. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Kameneva E. E., Skamnitskaya L. S. Theory and practice of mineral raw materials beneficiation in Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2006;9:183–196. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Burtsev I. N., Zhirov D. V., Voloshin A. V., Mashin D. O. Industrial minerals of North European Russia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2020;6:7–35. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1276

Shchiptsov V. V. Graphite-bearing ore regions of the Fennoscandian Shield. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2022;2:33–49. (In Russ.). doi: 10.17078/geo1551

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Nikiforov A. G., Frolov P. V. Mineralogical and technological features of graphite ores of the Fennoscandian Shield. *Technological mineralogy in the assessment of the quality of mineral raw materials of natural and technogenic origin*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre RAS; 2022. P. 16–23. (In Russ.). doi: 10.17076/tm14_32

Shchiptsov V. V., Kovalevskii V. V. Comparative study of graphites from the Zavalievskoe (Ukraine) and Ikhal (Republic of Karelia, Russia) deposits. *Innovative processes of beneficiation and deep processing of rare metal, mining-chemical raw materials and complex ores of non-ferrous and ferrous metals. Plaksin readings – 2024*. Apatity: KSC RAS; 2024. P. 115–118. (In Russ.). doi: 10/37614/978-5-91137-532-2

Shchiptsov V. V., Svetov S. A. Mineral resource base of Karelia: industrial minerals. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026;2:5–44 (In Russ.)

Skamnitskaya L. S., Biske N. S. Graphite ores of the Ikhal deposit: main natural types and their technological assessment. *Gornyi Zhurnal.* 2019;3:55–60. (In Russ.). doi: 10.17580/gzh.2019.03.11

Soloninkina M. V., Loginov D. V., Moshkalev S. A., Rozhkova N. N. Analysis of the structure of Brazilian graphite using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and thermogravimetric analysis with synchronous differential scanning calorimetry *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2025;4:11–19. (In Russ.). doi: 10.31857/S1028096025040026

Standard output norms for graphite production: developed by VNIInerud; approved by the Ministry of the Construction Materials Industry of the USSR, dated 12.09.1984. Tolyatti: VNIInerud; 1984. 18 p. (In Russ.)

Teten'kin D. D., Kazanov O. V. (eds.). State report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023. Moscow: FGBU VIMS; 2024. 710 p. (In Russ.)

Tsybulya S. V., Cherepanova S. V. Introduction to structural analysis of nanocrystals. Novosibirsk: NGU; 2009. 59 p. (In Russ.)

Tuinstra F., Koenig J. L. Raman spectrum of graphite. *The Journal of Chemical Physics*. 1970;53(3):1126–1130.

Velikoslavinskii D. A. Comparative characteristics of regional metamorphism of moderate and low pressures. Leningrad: Nauka; 1972. 192 p. (In Russ.)

Wong C. H. A., Sofer Z., Pumera M. Geographical and geological origin of natural graphite heavily influence the electrical and electrochemical properties of chemically modified graphenes. *Chemistry–A European Journal*. 2015;21(23):8435–8440.

Поступила в редакцию / received: 27.04.2026; принята к публикации / accepted: 09.09.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Солонинкина Мария Васильевна
инженер-физик
e-mail: mas31393@yandex.ru

Щипцов Владимир Владимирович
д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории рудообразующих систем и минеральных ресурсов ИГ КарНЦ РАН, профессор ПетрГУ
e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com

Логинов Дмитрий Владимирович
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела
e-mail: logindm@mail.ru

Рожкова Наталья Николаевна
д-р хим. наук, заведующая лабораторией физико-химических исследований наноматериалов
e-mail: rozhkova@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Soloninkina, Maria
Physics Engineer

Shchiptsov, Vladimir
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Professor

Loginov, Dmitry
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof.

Rozhkova, Natalya
Dr. Sci. (Chem.), Head of Laboratory

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 110–120
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 110–120
DOI: 10.17076/geo2451

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ
Original articles

УДК 549.514.5:552.18

ДЮМОРТЬЕРИТ В РОЗОВОМ КВАРЦЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПИРТОСТРОВ, СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ

Е. Н. Светова[1]*, С. И. Исаенко[2]

[1] *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *ensvetova@krc.karelia.ru*

[2] *Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина, ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН» (ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167982)*

Впервые детально исследован розовый пегматитовый кварц проявления Пиртостров в Лоухском р-не Карелии. В пределах пегматитовах жил глубокометаморфизованного хетоламбинского комплекса, представленного амфиболитами и амфиболовыми гнейсами, розовый кварц наряду с белыми и дымчатыми разностями слагает крупные блоки. Кварц образует в жилах плотные зернистые агрегаты, имеет полупрозрачную структуру с обилием тонких трещин. Для выявления петрографических и структурных особенностей, определения микроэлементного состава кварца использованы оптическая и электронная сканирующая микроскопия, порошковая рентгеновская дифрактометрия, КР-спектроскопия, атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой. Микроскопическими методами в кварце установлены микроминеральные включения полевых шпатов, мусковита и кальцита, а также многочисленные, хаотично ориентированные игольчатые включения толщиной около 0,5 мкм, идентифицированные методом КР-спектроскопии как боросиликатный минерал дюмортьерит $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$. Субмикроскопические включения дюмортьерита, выявляемые в розовом массивном кварце гранитных пегматитов различных регионов мира, как показывают исследования, определяют розовую окраску кварца. Результаты микроэлементного ICP-AES анализа кварца проявления Пиртостров свидетельствуют о повышенном содержании бора и алюминия, что косвенно указывает на возможное присутствие включений боросиликата алюминия в матрице кварца. Предположительно, образование дюмортьерита в пегматитовом кварце происходило на завершающих стадиях эволюции кислых магм, когда остаточные гидротермальные флюиды, обогащенные кремнием, алюминием и бором кристаллизуются в режиме снижения температуры и давления. В условиях высоких температур кристаллическая решетка кварца захватывает примесные элементы, а в ходе остывания пегматитового тела происходит ее сжатие и вынос инородных химических элементов в межкристаллическое пространство, где происходит зарождение центров кристаллизации новой микроскопической фазы. Условия дефицита железа и магния препятствовали росту турмалина (шерла) и благоприятствовали синтезу дюмортьерита.

Ключевые слова: дюмортьерит; розовый кварц; Северная Карелия; Пиртостров; КР-спектроскопия, СЭМ-ЭДС анализ

Для цитирования: Светова Е. Н., Исаенко С. И. Дюмортьерит в розовом кварце проявления Пиртостров, Северная Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 110–120. doi: 10.17076/geo2451

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГ КарНЦ РАН (№ 1022040400124-6-1.5.5) и ИГ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600009-2).

E. N. Svetova[1]*, S. I. Isaenko[2]. DUMORTIERITE IN ROSE QUARTZ FROM THE PIRTOSTROV OCCURRENCE IN NORTHERN KARELIA

[1] *Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Science (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *ensvetova@krc.kerelia.ru*

[2] *Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Pervomaiskaya St., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia)*

The article reports the first ever detailed study of rose pegmatite quartz from the Pirtostrov occurrence in the Loukhsky District of Karelia. Rose quartz, together with white and smoky quartz varieties, forms large blocks within the pegmatite veins of the deeply metamorphosed Khetolamba complex, which consists of amphibolites and amphibole gneisses. The quartz forms dense granular aggregates in the veins and has a translucent structure with numerous fine cracks. Optical and scanning electron microscopy, powder X-ray diffraction, Raman spectroscopy, and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry were used to identify the quartz petrographic and structural features and determine its trace element composition. Microscopic methods revealed micromineral inclusions of feldspar, muscovite, and calcite, as well as numerous, randomly oriented acicular inclusions approximately 0.5 μm thick, identified by Raman spectroscopy as the borosilicate mineral dumortierite $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$. According to research, submicroscopic dumortierite inclusions in massive rose quartz from granite pegmatites in various regions of the world are responsible for the rose coloration. The results of ICP-AES trace-element analysis of quartz from the Pirtostrov occurrence indicate elevated boron and aluminum levels, suggesting a possible presence of aluminum borosilicate inclusions in the quartz matrix. Dumortierite is supposed to have formed in pegmatitic quartz during the final stages of acid magma evolution, when residual hydrothermal fluids enriched in silicon, aluminum, and boron crystallized under decreasing temperature and pressure. Under high temperature conditions, the quartz crystal lattice captures trace elements, and as the pegmatite body cools, it contracts, forcing these elements into the intercrystalline space, where crystallization centers for a new microscopic phase nucleate. Iron- and magnesium-deficient conditions inhibited the growth of tourmaline (schorl) and favored the synthesis of dumortierite.

Keywords: rose quartz; Northern Karelia; Pirtostrov; Raman spectroscopy; SEM-EDS analysis

For citation: Svetova E. N., Isaenko S. I. Dumortierite in rose quartz from the Pirtostrov occurrence in Northern Karelia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 110–120. doi: 10.17076/geo2451

Funding. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to IG KarRC RAS. (No. 1022040400124-6-1.5.5) and the IG Komi SC UB RAS (No. 122040600009-2).

Введение

Розовый кварц является относительно редкой цветной разновидностью кварца и в природе представлен двумя основными типами. К первому типу относится массивный полупрозрачный кварц, часто встречающийся в ядерных зонах гранитных пегматитов, где он формирует отдельные, иногда до нескольких кубических метров участки в белом кварце или связывает калиевые полевые шпаты в блоковых зонах пегматитов [Лабунцов, 1939; Cassedanne, Roditi, 1991]. Цвет массивного розового кварца может варьировать от бледно-розового до ярко-малинового. Сопутствующими минералами обычно являются микроклин, альбит,

мусковит, шерл, берилл. На полированной поверхности шаров или кабошонов из такого кварца нередко проявляется эффект астеризма – отражение света в виде шестилучевой звезды [Schmetzer, Krzemnicki, 2006]. Месторождения розового пегматитового кварца известны в Бразилии, США, Африке, Мадагаскаре, Казахстане, России (Карелия, Забайкалье) и других странах. Согласно анализа газово-жидких и расплавных включений его кристаллизация происходила при температуре 600–700 °С и давлении до 3 кбар [Долгов, 1969]. Второй тип розового кварца представлен друзовыми скоплениями хорошо ограненных прозрачных кристаллов размером до первых сантиметров. В природе они встречаются достаточно редко. Температура образования кристаллов друзовидного розового кварца не превышает 300 °С, а давление – первых сотен атмосфер [Балицкий и др., 1996].

Многочисленными исследованиями, проводимыми в последнее столетие, предложено множество возможных механизмов окраски как массивного, так и друзовидного розового кварца, но единого мнения по этому поводу не достигнуто [Watson, Beard, 1917; Holden, 1924; Rossman, 1994; Goreva et al., 2001; Kibar et al., 2007]. Основываясь на результатах химического анализа, Е. Холден [1924] полагал, что розовый цвет массивного кварца обусловлен пигментацией Mn^{3+}. Позднее, исследователи этой разновидности кварца приписывали розовый цвет присутствию ионов Ti^{3+} в кристаллической структуре кварца [Wright et al., 1963; Smith et al., 1978; Cohen, Makar, 1984]. Окраска друзовидного кварца объяснялась радиационными электронно-дырочными центрами, возникающими при парном замещении соседних ионов Si^{4+} в тетраэдрах решетки кварца разновалентными ионами – Al^{3+} и P^{5+} [Maschmeyer, Lehmann, 1983]. Последняя модель дополнительно была поддержана экспериментами В. С. Балицкого с соавторами [1996], которые синтезировали монокристаллический розовый кварц, содержащий эти типы электронно-дырочных центров.

Вместе с тем, во многих исследованиях розового кварца из ядерных зон пегматитов отмечается наличие в нем мельчайших волокнистых включений. Первоначально ошибочно считалось, что это рутиловые иглы, обусловливающие слабую прозрачность, характерную для большинства образцов и астеризм [например, Holden, 1924; Wright et al., 1963]. К. Эпплин и Б. Хикс [1987], выделив субмикроскопические волокна из образцов розового кварца из горного хребта Руби-Рэндж (штат Монтана, США), идентифицировали их по рентгенограммам как дюмортьерит – сложный боросиликат алюминия $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$ [Alexander et al., 2026]. Чтобы проверить, является ли это частным случаем или общим правилом, группа ученых из Калифорнийского университета [Goreva et al., 2001] изучила образцы розового пегматитового и гидротермального жильного кварца из 29-ти различных месторождений мира, включая Бразилию, Аргентину, Мадагаскар, Намибию, США, Норвегию, Россию (Урал). Во всех 29-ти локациях внутри кварца (за исключением образца ограненного розового кристалла) были найдены идентичные волокна дюмортьерита толщиной 0,1–0,5 мкм. Дальнейшие исследования авторов показали, что кристаллическая структура этого «розово-кварцевого» дюмортьерита немного отличается от стандартного синего дюмортьерита, поскольку он имеет «сверхрешетку» с увеличенными в два раза параметрами осей *a* и *b* [Ma et al., 2002]. В связи с этим ученые назвали эти волокна «dumortierite-related fibers», т. е. «родственные дюмортьериту», а розовый цвет волокон объяснили наличием межвалентного переноса заряда между Fe^{2+} и Ti^{4+}, происходящего в позиции M1 структуры дюмортьерита.

Месторождения и проявления розового кварца хорошо известны на территории Республики Карелия и связаны преимущественно с пегматитовыми жилами и докембрийскими метаморфическими комплексами Беломорской провинции [Минерально-сырьевая..., 2006]. Розовый кварц встречается в жилах месторождений Тэдино, Хетоламбина, Черная Салма, Никонова Варакка, Малиновая Варакка, Блинковые Варакки, проявлениях Лисий Бор-1, Пиртостров, жиле Панфилова Варакка (Лоухский р-н), а также замечен в кварцевых жилах проявлений Шуерецкий участок и Шуйостров (Беломорский р-н).

В данной работе впервые проведено детальное минералогическое изучение розового кварца из пегматитовой жилы проявления Пиртостров. Историческая копь, заложенная по данной пегматитовой жиле на берегу оз. Сонозеро, была описана советским минералогом А. Н. Лабунцовым [1939]. Именно здесь, по его оценке, были найдены образцы кварца с наиболее интенсивной розовой окраской. В результате настоящего исследования в изучаемом кварце были выявлены тонкоигольчатые включения дюмортьерита, по-видимому, подтверждающие связь с ними розовой окраски кварца.

Геологическая характеристика проявления Пиртостров

Проявление Пиртостров находится приблизительно в 20 км к северо-востоку от железнодорожной станции и п. Амбарный в месте соединения протокой оз. Юлозеро и оз. Сонозеро на одноименном острове. Четыре сближенные силекситовые кварцевые жилы ветвящейся формы залегают в пределах интрузии габброноритов, прорывающих породы глубокометаморфизованного хетоламбинского комплекса мезоархейского (2,9–2,8 млрд лет) возраста [Гродницкий, 1982; Данилевская и др., 2004]. Породы комплекса представлены амфиболитами и амфиболовыми гнейсами. Формирование пегматитовых жил связано со свекофеннской эпохой тектоно-термальной активизации (1,85–1,7 млрд лет). В пределах жил выделяются блоки, сложенные белым, дымчатым и розовым кварцем, достигающие в размере 5 × 12 м. К наиболее эффектной разновидности относится розовый полупрозрачный кварц, образующий плотные зернистые агрегаты.

Объект и методы исследования

Исследован образец розового кварца из фондов музея Геологии докембрия Института геологии КарНЦ РАН (коллекция В. В. Щипцова). Образец представлен массивным агрегатом нежно-розового цвета без видимых отдельно оформленных кристаллов, имеет полупрозрачную структуру с обилием тонких трещин (рис. 1).

Минералого-петрографическое изучение кварца проведено с использованием оптического микроскопа ПОЛАМ Р-211 и сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH (Tescan) с энерго-дисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) в ЦКП ФИЦ «КарНЦ РАН», Петрозаводск. Порошковая рентгенограмма кварца получена на рентгеновском дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA при следующих параметрах: излучение CuKα, напряжение 40 кВ, ток 30 мА, диапазон записи 5–75 °2θ с шагом 0,4 °2θ/мин. Для прецизионного измерения параметров элементарной ячейки рентгенограмма дополнительно записывалась в интервале углов отражения 136–156 °2θ с шагом 0,01 °2θ/мин. Параметры элементарной ячейки *a* и *c* определены с точностью ± 0,0001 Å, объем *V* – с точностью ± 0,01 Å^3. Определение концентрации элементов-примесей в кварце выполнено методом ICP-AES на спектрометре JY 38 (Jobin Yvon, Франция) в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва). Предварительно измельченный кварц навеской 2 г разлагался в автоклаве в смеси (8 мл конц. HF + 0,2 мл HNO_3 + 0,2 мл маннита 2 %) с последующим упариванием в стеклоуглеродных тиглях в открытой системе. Анализировался полученный осадок, растворенный в 1,2 мл 1 М HCl. Идентификация дюмортьерита методом КР-спектроскопии проводилась в ЦКП «Геонаука» (ИГ ФИЦ «КомиНЦ УрО РАН», Сыктывкар) на высокоразрешающем спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon). Параметры регистрации спектров: He-Ne лазер (выходная мощность 2–20 мВт, λ = 632,8 нм), решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия – 300 мкм, щели – 100 мкм, объектив × 100, время накопления сигнала – 5 сек., количество измерений на одном участке спектрального диапазона – 10–20. Спектры регистрировались при комнатной температуре в диапазоне 100–2000 см$^{-1}$.



Рис. 1. Розовый кварц из пегматитов проявления Пиртостров (Лоухский р-н, Карелия). Выставочный образец музея Геологии докембрия (из коллекции В. В. Щипцова). Размер образца: 10 × 13 × 6 см

Fig. 1. Rose quartz from the pegmatite of the Pirtostrov occurrence (Loukhi District, Karelia). Exhibition specimen at the Precambrian Geology Museum (from the collection of V. V. Shchiptsov). Sample size: 10 × 13 × 6 cm

Результаты и обсуждение

По данным изучения шлифов в проходящем свете кварц имеет крупно-гигантозернистую структуру, представлен зернами различной формы размерами от 1 × 2 до 5 × 10 мм (рис. 2, А, Б). В большинстве крупных зерен наблюдается параллельно-линейное блокование. Границы зерен извилистые, бухтообразные.

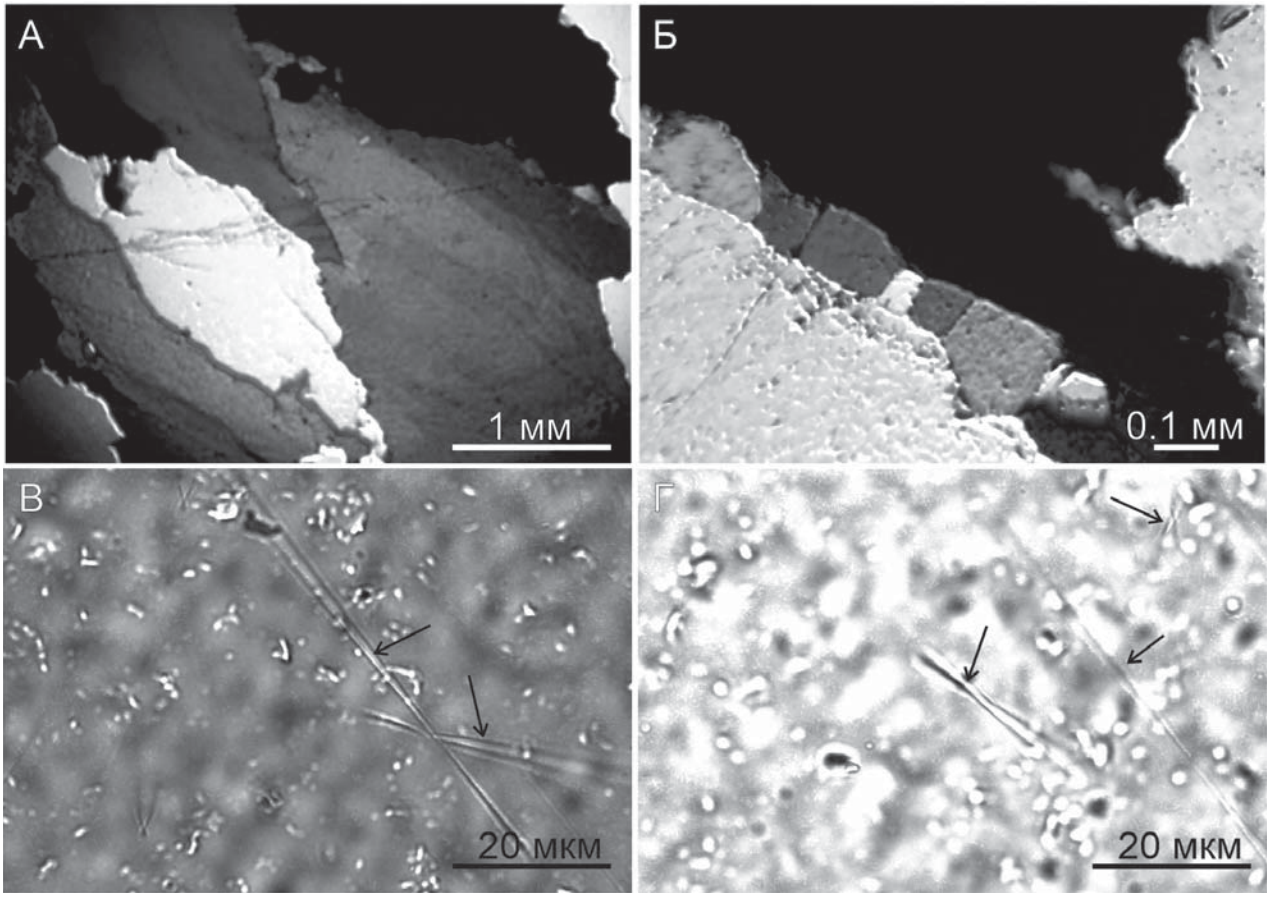


Рис. 2. Фотографии шлифов розового кварца в проходящем свете: А – параллельно-линейное блокование в крупных зернах кварца; Б – зерна новообразованного кварца по границе первичного зерна кварца; В, Г – тонкоигольчатые включения в кварце отмечены стрелками. Фото (А, Б) – с поляризатором, (В, Г) – без поляризатора

Fig. 2. Transmitted-light photomicrographs of the thin sections of rose quartz: A – parallel-linear blocking in large quartz grains; Б – grains of newly formed quartz along the boundary of a primary quartz grain; В, Г – fine-needle inclusions in quartz are indicated by arrows. А, Б – under crossed polars, В, Г – under plane-polarized light

Присутствуют поздние разнонаправленные трещины, пересекающие по несколько зерен. По границам крупных зерен, а также внутри блокованных зерен кварца наблюдаются микрозерна новообразованного кварца округлой, овальной, пластинчатой формы с ровными и извилистыми краями и ровным погасанием (рис. 2, А, Б). Размер таких зерен от 0,02 × 0,03 до 0,3 × 1,3 мм. В зернах кварца вдоль поздних трещин и на участках блокования развиты многочисленные газово-жидкие включения размером менее 10 мкм. Выявлены редкие микровключения тонкопластинчатой слюды, полевых шпатов и кальцита. При большом увеличении (× 100) в кварце визуализируются множественные тонкоигольчатые включения, приблизительно одинаковой формы, напоминающей песочные часы – широкие на концах и узкие посередине (рис. 2, В, Г). В небольшом поле зрения распределение коротких иголок беспорядочное и редкое, без явной симметрии. Толщина иголок составляет около 0,5 мкм, а длина различна. Следует заметить, что подобные включения отмечались нами ранее при технологическом изучении обломков розового кварца из отвалов пегматитовых месторождений Чупинского ГОКа (Лоухский р-н, Карелия) и не встречались в молочно-белых, дымчатых и бесцветных разностях того же кварца [Светова и др., 2025].

На СЭМ-изображениях тонкоигольчатые включения также хорошо выявляются (рис. 3, А, Б). ЭДС анализ иголок показал, что они имеют в химическом составе Al, Si, O, и, по-видимому, содержат другие, не определяемые детектором элементы, поскольку общая сумма анализа имеет небольшой дефицит. Ввиду малой толщины иголок, возможность точного определения их состава также технически ограничена диаметром электронного пучка.

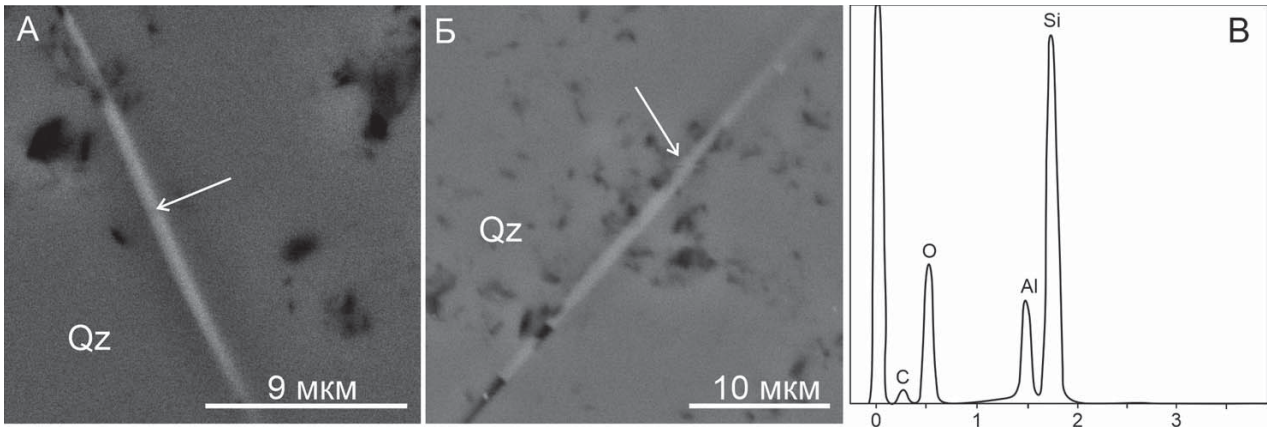


Рис. 3. BSE-изображения тонкоигольчатых включений в розовом кварце (А, Б) и соответствующий им энергодисперсионный рентгеновский спектр (В)

Fig. 3. BSE-images of fine-needle inclusions in the rose quartz (А, Б) and the corresponding energy-dispersive X-ray spectrum (В)

На порошковой дифрактограмме розового кварца фиксируются исключительно отражения α-кварца. Рассчитанные параметры элементарной ячейки (*a* – 4,9136 Å; *c* – от 5,4052 Å; *V* – 113,02 Å^3) в пределах погрешности измерений идентичны параметрам ячейки бесцветного кристаллического кварца.

В результате локального анализа методом КР-спектроскопии получены спектры игольчатых включений и вмещающего их кварца (рис. 4). На КР-спектре минерала хозяина фиксируются характеристические линии кварца с пиками 128, 205, 355, 465, 695, 807, 1082, 1158 см$^{-1}$. Значимых различий между спектром изучаемого розового кварца и стандартным спектром кристаллического бесцветного кварца не обнаружено.

Согласно опубликованным данным [Goreva et al., 2001; Hu, Guo, 2018], положения максимумов линий в КР-спектрах дюмортьерита в основном находятся вблизи 205–209, 265–280, 403–405, 508, 950 и 1000 см$^{-1}$, из которых два последних пика являются наиболее интенсивными. Предполагается, что эти пики относятся к различным колебательным модам Al-O и B-O [Li et al., 2015; Atuchin et al., 2017]. Дюмортьерит $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$ имеет кристаллическую структуру островного типа [Applin, Hicks, 1987]. Присутствие алюминия в октаэдрической координации приводит к смещению симметричных колебаний растяжения немостикового кислорода Si-O (800–1200 см$^{-1}$) в структуре. Полоса с пиком 850 см$^{-1}$ на КР-спектре, соответствующим тетраэдру Si-O, смещается в сторону увеличения относительного волнового числа и появляется при 950 см$^{-1}$ [Akaogi et al., 1984]. Характерные пики 950 см$^{-1}$ и 1000 см$^{-1}$ игольчатых кристаллов отражают симметричные колебания растяжения немостикового кислорода Si-O.

На КР-спектрах иголок в изучаемом нами кварце всегда присутствует характерный дублет с пиками 941 и 983 см$^{-1}$, а также ряд интенсивных линий с положениями 128, 205, 264, 355, 465, 696, 807, 1080, 1160 см$^{-1}$, часть из которых может быть отнесена к кварцу (рис. 4). Наличие линий кварца на КР-спектрах связано с тем, что область сбора сигнала составляла 3 мкм, что превышает толщину игольчатых включений, и происходит одновременное измерение включения и вмещающего его кварца. По данным КР-спектроскопии игольчатые включения в розовом кварце Пиртострова в целом имеют соответствие с дюмортьеритом, обнаруженным в образцах розового кварца других регионов [Goreva et al., 2001; Hu, Guo, 2018] и с эталонным спектром дюмортьерита (Сан-Диего, Калифорния, США, #X050064) из базы данных Rruff.info (см. рис. 4). Наблюдаемое отличное от эталона соотношение интенсивностей полос 941 и 983 см$^{-1}$ мы связываем с анизотропией дюмортьерита.

Методом микроэлементного ICP-AES анализа среди примесей в кварце установлены (ppm): Ca – 110, Al – 59, Na – 27, Fe – 12, Ti – 7,4, K – 7, Mg – 5,8, Cu – 4,1, B – 3,4, Li – 0,34, Mn – 0,23. Повышенное содержание Ca, Al, Na, K, Fe связано в основном с их присутствием в составе микроминеральных включений полевых шпатов, кальцита и слюды. Обращает на себя внимание высокое содержание бора в розовом кварце (3,4 ppm), которое превышает типовые значения этого элемента, установленные нами ранее в розовом (2,5–2,9 ppm), молочно-белом (1,5 ppm) и дымчато-сером (1,6–1,8 ppm) пегматитовом кварце из техногенных отвалов

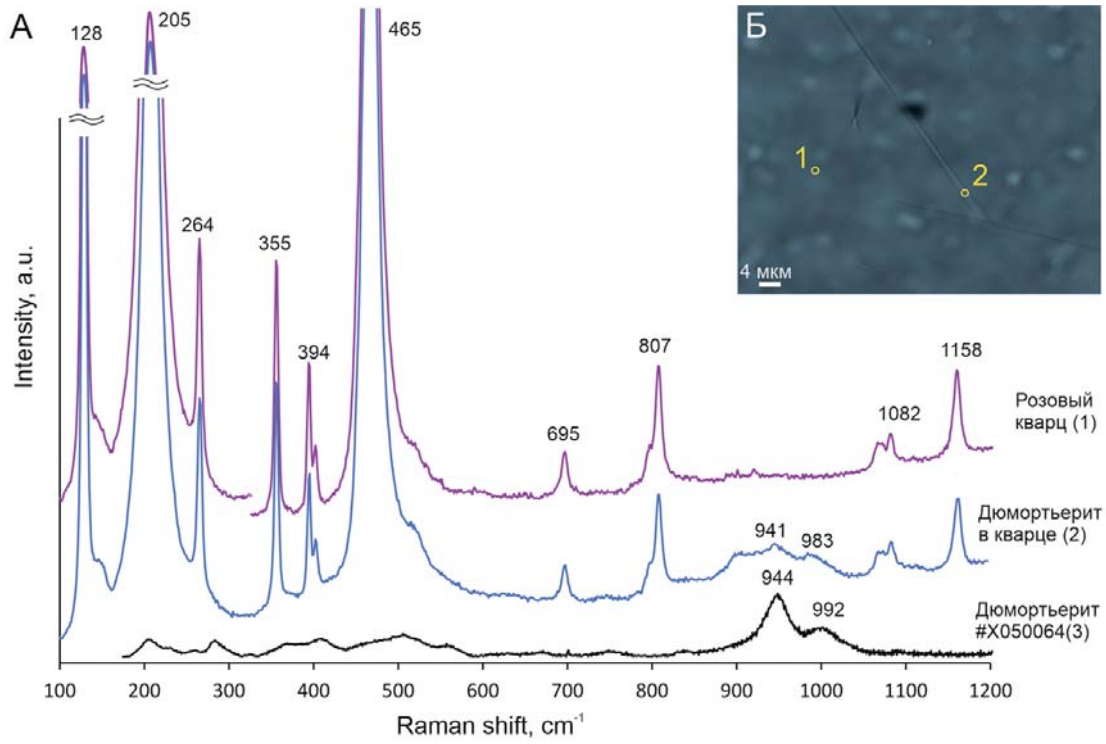


Рис. 4. А – КР-спектры розового пегматитового кварца проявления Пиртостров (1), тонкоигольчатого включения дюмортьерита из розового кварца (2), эталонного образца дюмортьерита (Сан-Диего, Калифорния, США, #X050064) из базы данных Ruff.info (3). Б – фотография игольчатого включения в кварце в проходящем свете с положением точек анализа (1) и (2)

Fig. 4. А – Raman spectra of rose pegmatite quartz from the Pirtostrov occurrence (1), fine-acicular dumortierite inclusion from rose quartz (2), reference dumortierite sample (San Diego, California, USA, #X050064) from the Ruff.info database (3). Б – transmitted-light photomicrographs of the acicular inclusion in quartz with the positions of analysis points (1) and (2)

Чупинского ГОКа [Светова и др., 2025]. Однако в целом видна тенденция концентрирования бора в розовом кварце, при том, что для других элементов связь их содержаний с принадлежностью кварца к какой-либо из цветовых разновидностей не прослеживалась. Отметим, что бор может накапливаться в пегматитовом кварце в виде включений боросиликатных минералов (дюмортьерита, турмалина), а также входить в кристаллическую решетку при замещении $Si^{4+} \rightarrow B^{3+}$ [Baron et al., 2015]. Накопление бора в пегматитовом кварце, вероятнее всего, связано с его транспортом в виде летучего комплекса BF_3, которым обогащен минералообразующий магматический флюид [Götze et al., 2012]. По данным прецизионного LA-ICP-MS анализа генетически различных типов кварца Норвегии, концентрация бора в пегматитовом кварце р-на Фроланн может достигать 2,7 ppm, в то время как в кварце гидротермальных жил, кварцитов и гранитов содержание бора находится ниже предела обнаружения (1,3 ppm) данного метода [Müller, Koch-Müller, 2009].

Известно, что дюмортьерит является вторым по распространенности боросиликатным минералом после турмалина и встречается, главным образом, в качестве второстепенного компонента в высокотемпературных богатых алюминием и бором метаморфических породах, пегматитах, иногда в гранитоидах и кварцевых жилах [Garašić et al., 2024 и ссылки в ней]. К настоящему времени процессы минерализации дюмортьерита и факторы, контролирующие его распространение, изучены ограничено. В частности, показано, что в пегматитовых жилах эклогитов Салмы Беломорской эклогитовой провинции (Карелия) образование дюмортьерита в ассоциации с полевыми шпатами, биотитом, мусковитом, кианитом, корундом, связано с наложенным метаморфизмом в условиях гранулитовой фации повышенных давлений и температуры 850–900 °С [Докукина и др., 2017]. В метаморфическую стадию также произошла кристаллизация дюмортьерита в гранитных пегматитах Вирорко (Пампасские хребты, центральная Аргентина) [Galliski et al., 2012]. Минерализация дюмортьерита

в кианит-мусковит-дюмортьеритовых жилах, встречающихся в метапелитах Амгаонского гнейсового комплекса (регион Саколи, Центральная Индия), явилась результатом гидротермальной активности, возможно, в переходной магматически-гидротермальной среде, вероятно, при P > 2,5 кбар и 400° < T < 550°, что может быть связано с внедрением гранитных интрузий в этом районе [Dandekar et al., 2025].

Интересно, что в кристаллах горного хрусталя дюмортьерит может присутствовать в виде визуально различимых радиально-лучистых пучков и розеток игольчатых кристаллов синих оттенков размером до первых сантиметров, создающих эффект морозных узоров (так называемый дюмортьеритовый кварц, имеющий высокую коллекционную ценность) [Renfro et al., 2015]. Предполагается, что формирование таких включений происходило из пересыщенных бором и алюминием горячих растворов в результате первичной (или параллельной с осаждением кремнезема) кристаллизации дюмортьерита и последующим захватом их растущими гранями кристаллов кварца. Под воздействием давления в направлении роста кварца игольчатые кристаллы ориентируются параллельно или в виде радиально-лучистых пучков. Условия дефицита железа и магния препятствуют росту турмалина (шерла) и благоприятствуют синтезу боросиликата алюминия – дюмортьериту.

В массивном розовом кварце дюмортьерит, как было показано в нашем и других исследованиях [Goreva et al., 2001; Hu, Guo, 2018], образует тончайшую субмикроскопическую взвесь тонких иголок, концентрация которых определяет насыщенность розового оттенка. Аналогичным примером роста игольчатых кристаллов может служить «рутиловый кварц», внутри которого находятся тончайшие игольчатые или волосовидные включения рутила. Современные исследования выделяют два основных механизма образования рутиловых игл в кварце: механизм экссолюции (распад твердого раствора) и сингенетический рост (первичный захват) [Li et al., 2011]. Процесс экссолюции подразумевает, что при высоких температурах кварц способен вмещать в кристаллическую решетку значительное количество титана. С понижением температуры растворимость титана падает, он становится избыточным и выделяется в виде собственной фазы – микроскопических игл рутила внутри кристалла хозяина. В случае сингенетического роста, титан, высвобождающийся из флюида, сначала образует тонкие иглы рутила, а растущие грани кварца просто «обволакивают» и механически захватывают уже существующие или одновременно растущие рутиловые иглы. Исходя из микроскопического размера дюмортьеритовых включений в розовом кварце, их морфологии и однородности распределения, для их образования наиболее предпочтительным, на наш взгляд, является процесс экссолюции. Формирование дюмортьерита в пегматитовом кварце происходило на завершающих стадиях эволюции кислых магм, когда остаточные гидротермальные флюиды, обогащенные кремнием, алюминием и бором, кристаллизуются в режиме снижения температуры и давления. На этапе поздней магматической или ранней гидротермальной кристаллизации пегматита кварц растет при температуре выше 500–600 °С [Долгов, 1969; Müller et al., 2015]. В таких условиях кристаллическая решетка кварца способна вмещать в себя примеси бора и алюминия. В результате образуется единый, но нестабильный пересыщенный раствор. По мере остывания пегматитового тела температура падает, кристаллическая решетка кварца начинает сжиматься и стремится очиститься, «выталкивая» инородные химические элементы в межкристаллическое пространство или локализуя их в дефектах структуры. В дефектных областях атомы перегруппируются и закладывают центры кристаллизации новой микроскопической фазы. Полноценно разрастись внутри прочной матрицы кварца новый минерал не может ввиду отсутствия свободного пространства. Поэтому рост идет ограниченно: кристаллы приобретают форму тончайших иголок. Таким образом, внутри прозрачного пегматитового кварца возникает микроскопическая «сеть» дюмортьеритовых игл, которая придает кварцу розовый оттенок.

Заключение

В результате проведенного минералогического исследования массивного розового кварца из пегматитовой жилы проявления Пиртостров в Карелии были выявлены многочисленные равномерно распределенные в объеме кварца игольчатые включения толщиной около 0,5 мкм, идентифицированные методом КР-спектроскопии как боросиликатный минерал дюмортьерит $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3(O,OH)_3$. Микроскопический размер дюмортьеритовых включений, их морфология и характер распределения позволили предположить, что они образовались из пересыщенных кремнием, бором и алюминием флюидов в результате процесса экссолюции на этапе поздней магматической или ранней гидротермальной

кристаллизации пегматита. Условия дефицита железа и магния препятствовали росту турмалина (шерла) и благоприятствовали синтезу дюмортьерита.

Литература

Балицкий В. С., Махина И. Б., Емельченко А. Г., Марьин А. А., Шингли Д., Фрич Э., Койвула Д. Экспериментальное изучение условий образования кристаллов розового фосфоросодержащего кварца и причины его редкой встречаемости в природе // Геохимия. 1996. № 11. С. 1074–1081.

Гродницкий Л. Л. Гранитные пегматиты Балтийского щита. Л.: Наука, 1982. 295 с.

Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 226 с.

Докукина К. А., Конилов А. Н., Ван К. В., Минц М. В. Дюмортьерит- и корундсодержащие кварц-полевошпат-слюдяные пегматоидные породы Беломорской эклогитовой провинции: пример плавления фенгит+кварц // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477, № 3. С. 337–341.

Долгов Ю. А. Становление гранитных интрузий и образование камерных пегматитов // Условия образования пьезооптических минералов в пегматитах / Ред. В. П. Бутузов. Труды Всесоюзного научно-исследовательского института синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС). М.: Недра, 1969. С. 3–22.

Лабунцов А. Н. Пегматиты СССР. Т. 2. Пегматиты Северной Карелии и их минералы. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 260 с.

Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2. / Ред. В. П. Михайлов, В. Н. Аминов. Петрозаводск: Карелия, 2006. С. 87–102.

Светова Е. Н., Бубнова Т. П., Пикулев В. Б., Логинова С. В. Технологические свойства кварца из техногенных отвалов слюдоносных пегматитов Северной Карелии (Россия) // Журнал прикладной спектроскопии. 2025. № 1. С. 51–58.

Akaogi M., Ross N. L., Mcmillan P., Navrotsky A. The Mg_2SiO_4 polymorphs (olivine, modified spinel and spinel) – thermodynamic properties from oxide melt solution calorimetry, phase relations, and models of lattice vibrations // American Mineralogist. 1984. Vol. 69, no. 5. P. 499–512.

Alexander V. D., Griffen D. T., Martin T. J. Crystal chemistry of some Fe- and Ti-poor dumortierites // American Mineralogist. 1986. Vol. 71. P. 786–794.

Applin K. R., Hicks B. D. Fibers of dumortierite in quartz // American Mineralogist. 1987. Vol. 72. P. 170–172.

Atuchin V. V., Subanakov A. K., Aleksandrovsky A. S., Bazarov B. G., Bazarova J. G., Dorzhieva S. G., Gavrilova T. A., Krylov A. S., Molokeev M. S., Oreshonkov A. S., Pugachev A. M., Tushinova Yu. L., Yelisseyev. Exploration of structural, thermal, vibrational and spectroscopic properties of new noncentrosymmetric double borate $Rb_3NdB_6O_{12}$ // Advanced Powder Technology. 2017. Vol. 28, no. 5. P. 1309–1315.

Baron M. A., Stalder R., Konzet, J., and Hauzenberger C. A. Formation conditions of quartz recorded by OH-point defectsexperimental and analytical approach // Phys. Chem. Miner. 2015. Vol. 42. P. 53–62. doi: 10.1007/s00269-014-0699-4, 2015

Cassedanne J. P., Roditi M. Crystallized and massive rose quartz deposits in Brazil // Journal of Gemmology. 1991. Vol. 22, no. 5. P. 273–286.

Cohen A. J., Makar L. N. Differing effects of ionizing radiation in massive and single crystal rose quartz // Neues Jahrbuch für Mineralogie-Monatshefte. 1984. Vol. 11. P. 513–521.

Dandekar S., Mariani E., Dandekar T. R., Khatirkar R. K., Pande K., Gardner J., Bagshaw H., Randive K., Peshwe D. Kyanite-muscovite-dumortierite vein mineralization mechanisms from advanced microstructural analysis using EBSD // American Mineralogist. 2025. Vol. 110, no. 7. P. 1034–1045. doi: 10.2138/am-2024-9380

Galliski M. A., Marquez-Zavalia M. F., Lira R., Cempirek J., Skoda R. Mineralogy and Origin of the Dumortierite-Bearing Pegmatites of Virorco, San Luis, Argentina // The Canadian Mineralogist. 2012. Vol. 50, no. 4. P. 873–894.

Garašić V., Lugović B., Krsnik M., Bilić Š., Meyer H.-P., Schuster R., Vrkljan M. First occurrence of dumortierite in Croatia: its chemical composition and appearance as an igneous mineral in leucogranite-hosted pegmatite // Geologia Croatica. 2024. Vol. 77, no. 1. P. 41–56. doi: 10.4154/gc.2024.01

Goreva J., Ma C., Rossman G. R. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: The source of rose coloration // American Mineralogist. 2001. Vol. 86. P. 466–472.

Götze J., Schrön W., Möckel R., Heide K. The role of fluids in the formation of agates // Geochemistry. 2012. Vol. 72. P. 283–286. doi: 10.1016/j.chemer.2012.07.002

Holden E. F. The cause of color in rose quartz // American Mineralogist 1924. Vol. 9, no. 75–88. P. 101–8.

Hu Z., Guo Y. The Ecological Impact of Mining Rose Quartz with Needle-like Inclusions // Ekoloji. 2018. Vol. 27, no. 106. P. 1533–1541

Kibar R., Garcia-Guinea J., Çetin A., Selvi S., Karal T., Can N. Luminescent, optical and color properties of natural rose quartz // Radiation Measurements. 2007. Vol. 42, no. 9. P. 1548–1553.

Li X., Rusk B., Wang R., Morishita Yu., Watanabe Ya., Chen Z. Rutile inclusions in quartz crystals record decreasing temperature and pressure during the exhumation of the Su-Lu UHP metamorphic belt in Donghai, East China // American Mineralogist. 2011. Vol. 96. P. 964–973. doi: 10.2138/am.2011.3574.

Li X., Yang Y., Liu B., Kuang J. Electronic structure and Raman spectroscopy study of dibarium magnesium orthoborate, $Ba_2Mg(BO_3)_2$ // Vibrational Spectroscopy. 2015. Vol. 80. P. 53–58.

Ma C., Goreva J. S., Rossman J. S. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: HRTEM and AEM investigations // American Mineralogist. 2002. Vol. 87, no. 2–3. P. 269–276.

Maschmeyer D., Lehmann G. A trapped-hole center causing rose coloration of natural quartz // Zeits. Kristall. 1983. Vol. 163. P. 181–196.

Müller A., Ihlen P.M., Snook B., Larsen R.B., Flem B., Bingen B., Williamson B.J. The chemistry of quartz in granitic pegmatites of southern Norway // Economic Geology. 2015. Vol. 110, no. 7. P. 1737–1757.

Müller A., Koch-Müller M. Hydrogen speciation and trace element contents of igneous, hydrothermal and metamorphic quartz from Norway // Mineralogical Magazine. 2009. Vol. 73, no. 4. P. 569–583. doi: 10.1180/minmag.2009.073.4.569

Renfro N., Sun Z., Koivula J. Dumortierite in Rock Crystal Quartz // Gems & Gemology. 2015. Vol. 51, no. 1. P. 100–102.

Rossman G.R. Colored varieties of the silica minerals // Reviews in Mineralogy. Vol. 29: Silica – Physical behavior, geochemistry and materials applications, Mineralogical Society of America / P. J. Heaney, C.T. Prewitt, G.V. Gibbs (eds.). Washington, 1994. P. 433–468.

Schmetzer K., Krzemnicki M. The orientation and symmetry of light spots and asterism in rose quartz spheres from Madagascar // The Journal of Gemmology. 2006. Vol. 30, no. 3. P. 183–191. doi: 10.15506/jog.2006.30.3.183

Smith G., Vance E.R., Hasan Z., Edgar A., Runciman W.A. A charge transfer mechanism for the colour of rose quartz // Physica Status Solidi (A). 1978. Vol. 46, no. 2. P. K135–K140.

Watson T.L., Beard R.E. The color of amethyst, rose, and blue varieties of quartz // Proceedings of the U.S. National Museum. 1917. Vol. 53. P. 553–63.

Wright P.M., Weil J.A., Buch T., and Anderson J.H. Titanium colour centers in rose quartz // Nature. 1963. Vol. 197. P. 246–248.

References

Akaogi M., Ross N.L., Mcmillan P., Navrotsky A. The Mg_2SiO_4 polymorphs (olivine, modified spinel and spinel) – thermodynamic properties from oxide melt solution calorimetry, phase relations, and models of lattice vibrations. *American Mineralogist.* 1984;69(5):499–512.

Alexander V.D., Griffen D.T., Martin T.J. Crystal chemistry of some Fe- and Ti-poor dumortierites. *American Mineralogist*. 1986;71:786–794.

Applin K.R., Hicks B.D. Fibers of dumortierite in quartz. *American Mineralogist*. 1987;72:170–172.

Atuchin V.V., Subanakov A.K., Aleksandrovsky A.S., Bazarov B.G., Bazarova J.G., Dorzhieva S.G., Gavrilova T.A., Krylov A. S., Molokeev M.S., Oreshonkov A.S., Pugachev A.M., Tushinova Yu. L., Yelisseyev A.P. Exploration of structural, thermal, vibrational and spectroscopic properties of new noncentrosymmetric double borate $Rb_3NdB_6O_{12}$. *Advanced Powder Technology*. 2017;28(5):1309–1315.

Balitsky V.S., Makhina I.B., Emel'chenko A.G., Maryin A.A., Shingli D., Fritch E., Koivula D. Experimental study of the conditions of formation of pink phosphorus-containing quartz crystals and the reasons for its rare occurrence in nature. *Geokhimiya = Geochemistry.* 1996;11:1074–1081. (In Russ.)

Baron M.A., Stalder R., Konzet J., Hauzenberger C.A. Formation conditions of quartz recorded by OH-point defects experimental and analytical approach. *Phys. Chem. Miner*. 2015;42:53–62. doi: 10.1007/s00269-014-0699-4

Cassedanne J.P., Roditi M. Crystallized and massive rose quartz deposits in Brazil. *Journal of Gemmology*. 1991;22(5):273–286.

Cohen A.J., Makar L.N. Differing effects of ionizing radiation in massive and single crystal rose quartz. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Monatshefte*. 1984;11:513–521.

Dandekar S., Mariani E., Dandekar T.R., Khatirkar R.K., Pande K., Gardner J., Bagshaw H., Randive K., Peshwe D. Kyanite-muscovite-dumortierite vein mineralization mechanisms from advanced microstructural analysis using EBSD. *American Mineralogist*. 2025;110(7):1034–1045. doi: 10.2138/am-2024-9380

Danilevskaya L.A., Skamnitskaya L.S., Shchiptsov V.V. Quartz raw materials of Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 226 p. (In Russ.)

Dokukina K.A., Konilov A.N., Van K.V., Mintz M.V. Dumortierite- and corundum-bearing quartz–feldspar–mica rocks of the Belomorian eclogite province: an example of melting of phengite + quartz. *Doklady akademii nauk = Doklady Earth Sciences.* 2017;477(3):337–341. (In Russ.)

Dolgov Yu.A. Formation of granite intrusions and formation of chamber pegmatites. In: Conditions of formation of piezooptic minerals in pegmatites / ed. by V.P. Butuzov. Transactions of the All-Union Research Institute for the Synthesis of Mineral Raw Materials (VNIISIMS). Moscow: Nedra; 1969. P. 3–22. (In Russ.)

Galliski M.A., Marquez-Zavalia M.F., Lira R., Cempirek J., Skoda R. Mineralogy and origin of the dumortierite-bearing pegmatites of Virorco, San Luis, Argentina. *The Canadian Mineralogist.* 2012;50(4):873–894.

Garašić V., Lugović B., Krsnik M., Bilić Š., Meyer H.-P., Schuster R., Vrkljan M. First occurrence of dumortierite in Croatia: its chemical composition and appearance as an igneous mineral in leucogranite-hosted pegmatite. *Geologia Croatica.* 2024;77(1):41–56. doi: 10.4154/gc.2024.01

Goreva J., Ma C., Rossman G.R. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: the source of rose coloration. *American Mineralogist.* 2001;86:466–472.

Götze J., Schrön W., Möckel R., Heide K. The role of fluids in the formation of agates. *Geochemistry.* 2012;72:283–286. doi: 10.1016/j.chemer.2012.07.002

Grodnitsky L.L. Granite pegmatites of the Baltic Shield. Leningrad: Nauka; 1982. 295 p. (In Russ.)

Holden E.F. The cause of color in rose quartz. *American Mineralogist*. 1924;9(75–88):101–8.

Hu Z., Guo Y. The ecological impact of mining rose quartz with needle-like inclusions. *Ekoloji.* 2018;27(106):1533–1541.

Kibar R., Garcia-Guinea J., Çetin A., Selvi S., Karal T., Can N. Luminescent, optical and color properties of natural rose quartz. *Radiation Measurements.* 2007;42(9):1548–1553.

Labuntsov A.N. Pegmatites of the USSR. Vol. 2. Pegmatites of North Karelia and their minerals. Moscow. Leningrad: The USSR Academy of Sciences Publ.; 1939. 260 p. (In Russ.)

Li X., Rusk B., Wang R., Morishita Yu., Watanabe Ya., Chen Z. Rutile inclusions in quartz crystals record

decreasing temperature and pressure during the exhumation of the Su-Lu UHP metamorphic belt in Donghai, East China. *American Mineralogist*. 2011;96:964–973. doi: 10.2138/am.2011.3574

Li X., Yang Y., Liu B., Kuang J. Electronic structure and Raman spectroscopy study of dibarium magnesium orthoborate, $Ba_2Mg(BO_3)_2$. *Vibrational Spectroscopy.* 2015;80:53–58.

Ma C., Goreva J.S., Rossman J.S. Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: HRTEM and AEM investigations. *American Mineralogist.* 2002;87 (2–3):269–276.

Maschmeyer D., Lehmann G. A trapped-hole center causing rose coloration of natural quartz. *Zeits. Kristall.* 1983;163:181–196.

Mikhailov V.P., Aminov V.N. (eds.). Mineral resource base of the Republic of Karelia. Book 2. Petrozavodsk: Karelia; 2006. P. 87–102. (In Russ.)

Müller A., Ihlen P.M., Snook B., Larsen R.B., Flem B., Bingen B., Williamson B.J. The chemistry of quartz in granitic pegmatites of southern Norway. *Economic Geology.* 2015;110(7):1737–1757.

Müller A., Koch-Müller M. Hydrogen speciation and trace element contents of igneous, hydrothermal and metamorphic quartz from Norway. *Mineralogical Magazine.* 2009;73(4):569–583. doi: 10.1180/minmag.2009.073.4.569

Renfro N., Sun Z., Koivula J. Dumortierite in rock crystal quartz. *Gems & Gemology.* 2015;51(1): 100–102.

Rossman G.R. Reviews in Mineralogy. Vol. 29: Silica – Physical behavior, geochemistry and materials applications. *Mineralogical Society of America.* Washington; 1994. P. 433–462.

Schmetzer K., Krzemnicki M. The orientation and symmetry of light spots and asterism in rose quartz spheres from Madagascar. *The Journal of Gemmology*. 2006;30(3):183–191. doi: 10.15506/jog.2006.30.3.183

Smith G., Vance E.R., Hasan Z., Edgar A., Runciman W.A. A charge transfer mechanism for the colour of rose quartz. *Physica Status Solidi (A).* 1978;46(2): K135–K140.

Svetova E.N., Bubnova T.P., Pikulev V.B., Loginova S.V. Technological features of quartz from muscovite pegmatite mining wastes of North Karelia (Russia). *Journal of Applied Spectroscopy.* 2025;92(1):45–52. doi: 10.1007/s10812-025-01876-3

Watson T.L., Beard R.E. The color of amethyst, rose, and blue varieties of quartz. *Proceed. of the U.S. National Museum.* 1917;53:553–63.

Wright P.M., Weil J.A., Buch T., Anderson J.H. Titanium colour centers in rose quartz. *Nature.* 1963;197:246–248.

Поступила в редакцию / received: 27.08.2026; принята к публикации / accepted: 01.10.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Светова Евгения Николаевна
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: ensvetova@krc.karelia.ru

Исаенко Сергей Иванович
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: s.i.isaenko@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Svetova, Evgeniya
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Isaenko, Sergey
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 121–126
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 121–126
DOI: 10.17076/geo2157

УДК 552.321.1:551.72(540)

PALEOPROTEROZOIC S-TYPE GRANITES FROM LESSER HIMALAYA, INDIA: COMPOSITION, ZIRCON GEOCHRONOLOGY, ND-SYSTEMATICS AND GEODYNAMIC SETTING

S. Mishra[1, 2], A. Slabunov[2]*, M. F. Cerca Ruiz[3], V. Singh[4], E. González-Partida[3]

[1] Research Center in Applied Geosciences, Autonomous University of Coahuila (26830 Nueva Rosita, Coahuila de Zaragoza, México)
*[2] Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *slabunov@krc.karelia.ru*
[3] Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus UNAM Juriquilla (CP 76230 Juriquilla, Querétaro, México)
[4] Department of Geology, Institute of Earth Science, Bundelkhand University (284128 Jhansi, India)

The Proterozoic granites and gneisses of the Himalayan orogen, particularly those exposed in the Lesser Himalaya, provide essential insights into the geodinamics of the northern Indian craton. Here, we investigate the Toneta granites of the Garhwal Himalaya using whole-rock geochemistry, zircon U–Th–Pb geochronology, and whole-rock Sm–Nd isotope systematics to constrain their petrogenesis, source characteristics, and tectonic significance. Zircon U–Th–Pb dating yields a crystallization age of 1845 ± 19 Ma, with inherited zircon cores at 3.52, 2.78, 2.62, and 2.10 Ga, indicating recycling of Paleoarchean to Paleoproterozoic crustal components. Sm–Nd isotopic data further support a significant contribution from ancient Archean crust. The granites are strongly peraluminous (A/CNK = 1.01–2.40) and characterized by high SiO_2, Al_2O_3, and K_2O contents, together with depletion in Ba, Sr, Nb, and Ti and enrichment in Rb, Th, U, and Pb, supporting their S-type affinity. Chondrite-normalized REE patterns show LREE enrichment, relative HREE depletion, and pronounced negative Eu anomalies, indicating significant feldspar involvement during partial melting and/or magmatic differentiation. The combined geochronological, geochemical, and isotopic characteristics suggest that the Toneta granites formed predominantly through partial melting of metasedimentary crust containing an Archean component. Their emplacement at ca. 1.85 Ga is interpreted to reflect crustal thickening and thermal reworking during a Paleoproterozoic convergent tectonic episode. These features are consistent with an accretionary–collisional tectonic setting associated with the assembly of the Columbia (Nuna) supercontinent at ca. 1.85 Ga. The Toneta granites thus provide important evidence for Paleoproterozoic crustal recycling and stabilization of the northern Indian continental crust.

Keywords: S-type granites; Paleoproterozoic; Garhwal Himalaya; Archean crustal recycling; Columbia Supercontinent; Continental collision; Crustal evolution

For citation: Mishra S., Slabunov A., Cerca Ruiz M. F., Singh V., González-Partida E. Paleoproterozoic S-type granites from lesser Himalaya, India: composition, zircon geochronology, ND-systematics and geodynamic setting. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 121–126. doi: 10.17076/geo2157

Funding. The present study is a contribution to the research carried out by the Institute of Geology at the Karelian Research Centre, RAS, Project FMEN-2023-0009. This work continues under a Memorandum of Understanding between Bundelkhand University, Jhansi, India and Karelian Research Centre, RAS, Petrozavodsk, Russia.

С. Мишра[1, 2], А. Слабунов[2]*, М. Ф. Серка Руиз[3], В. Сингх[4], Э. Гонзалез-Партида[3]. ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЕ S-ГРАНИТЫ МАЛЫХ ГИМАЛАЕВ (ИНДИЯ): СОСТАВ, ГЕОХРОНОЛОГИЯ ЦИРКОНА, ND-СИСТЕМАТИКА И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ

[1] *Исследовательский центр прикладных наук о Земле, Университет Коауилы (Нуэва-Росита, Коауила де Сарагоса, Мексика, 26830)*
[2] *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *slabunov@krc.karelia.ru*
[3] *Институт наук о Земле, Мексиканский национальный университет (Юрикилья, Керетаро, Мексика, CP 76230)*
[4] *Геологический факультет Бунделкхандского университета (Джанси, Индия, 284128*)

Протерозойские граниты и гнейсы Гималайского орогена, особенно широко представленные в пределах Малых Гималаев, являются важным источником информации о палеогеодинамике северной части Индийского кратона. В настоящей статье подводятся итоги исследования гранитов Тонета Гарвальских Гималаев с использованием геохимии пород, U–Th–Pb геохронологии циркона и изотопной системы Sm–Nd для определения их петрогенезиса, характеристик источника и тектонической обстановки формирования. U–Th–Pb датирование циркона определяет возраст кристаллизации 1845 ± 19 млн лет, тогда как унаследованные ядра циркона характеризуются возрастными популяциями 3,52; 2,78; 2,62 и 2,10 млрд лет, что свидетельствует о переработке палеоархейского–палеопротерозойского континентального материала. Данные Sm–Nd также подтверждают значительный вклад древней архейской коры в формирование гранитов. Граниты характеризуются резко перлюминиевым составом (A/CNK = 1,01–2,40), повышенными содержаниями SiO_2, Al_2O_3 и K_2O, обеднением Ba, Sr, Nb и Ti и обогащением Rb, Th, U и Pb, что подтверждает их S-типовую природу. Нормализованные по хондриту спектры редкоземельных элементов характеризуются обогащением легкими РЗЭ, относительным обеднением тяжелыми РЗЭ и выраженными отрицательными Eu-аномалиями, указывающими на существенную роль полевых шпатов в процессе частичного плавления и/или последующей магматической дифференциации. Совокупность геохронологических, геохимических и изотопных данных свидетельствует о том, что граниты Тонета сформировались преимущественно в результате частичного плавления метаосадочной коры, содержащей архейский компонент. Их внедрение около 1,85 млрд лет интерпретируется как результат утолщения коры и ее термической переработки в ходе палеопротерозойского конвергентного тектонического эпизода. Эти особенности согласуются с аккреционно-коллизионной тектонической обстановкой, связанной со сборкой суперконтинента Колумбия (Нуна) около 1,85 млрд лет назад. Таким образом, граниты Тонета предоставляют важные свидетельства палеопротерозойской переработки и стабилизации континентальной коры северной части Индии.

Ключевые слова: S-гранит; палеопротерозой; Гархвальские Гималаи; рециклинг архейской коры; Суперконтинент Колумбия; коллизия; эволюция земной коры

Для цитирования: Mishra S., Slabunov A., Cerca Ruiz M. F., Singh V., González-Partida E. Paleoproterozoic S-type granites from lesser Himalaya, India: composition, zircon geochronology, ND-systematics and geodynamic setting // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 121–126. doi: 10.17076/geo2157

Финансирование. Работа является вкладом в исследования ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009 и проводится в рамках Меморандума о взаимопонимании между Бунделкхандским университетом (Джанси, Индия) и КарНЦ РАН (Петрозаводск, Россия).

1. Introduction

Paleoproterozoic granitoids of the Lesser Himalayan Crystalline Sequence (LHCS) provide important evidence for the early evolution and reworking of the northern Indian continental crust (Fig. 1). Regional studies in Himachal Pradesh, Garhwal–Kumaun, and adjoining sectors have documented widespread granitoids associated with metasedimentary and gneissic rocks [Valdiya, 1980; Sharma, 1983, 1998]. Early Rb–Sr studies established ages around 1.84 Ga in Himachal Pradesh [Frank, 1977], while subsequent zircon geochronology demonstrated widespread ca. 1.80–1.87 Ga felsic magmatism in the Lesser Himalaya [Miller et al., 2000; Gupta and Kumar, 2023]. This database has been further expanded by recent studies that have recognized Paleoproterozoic

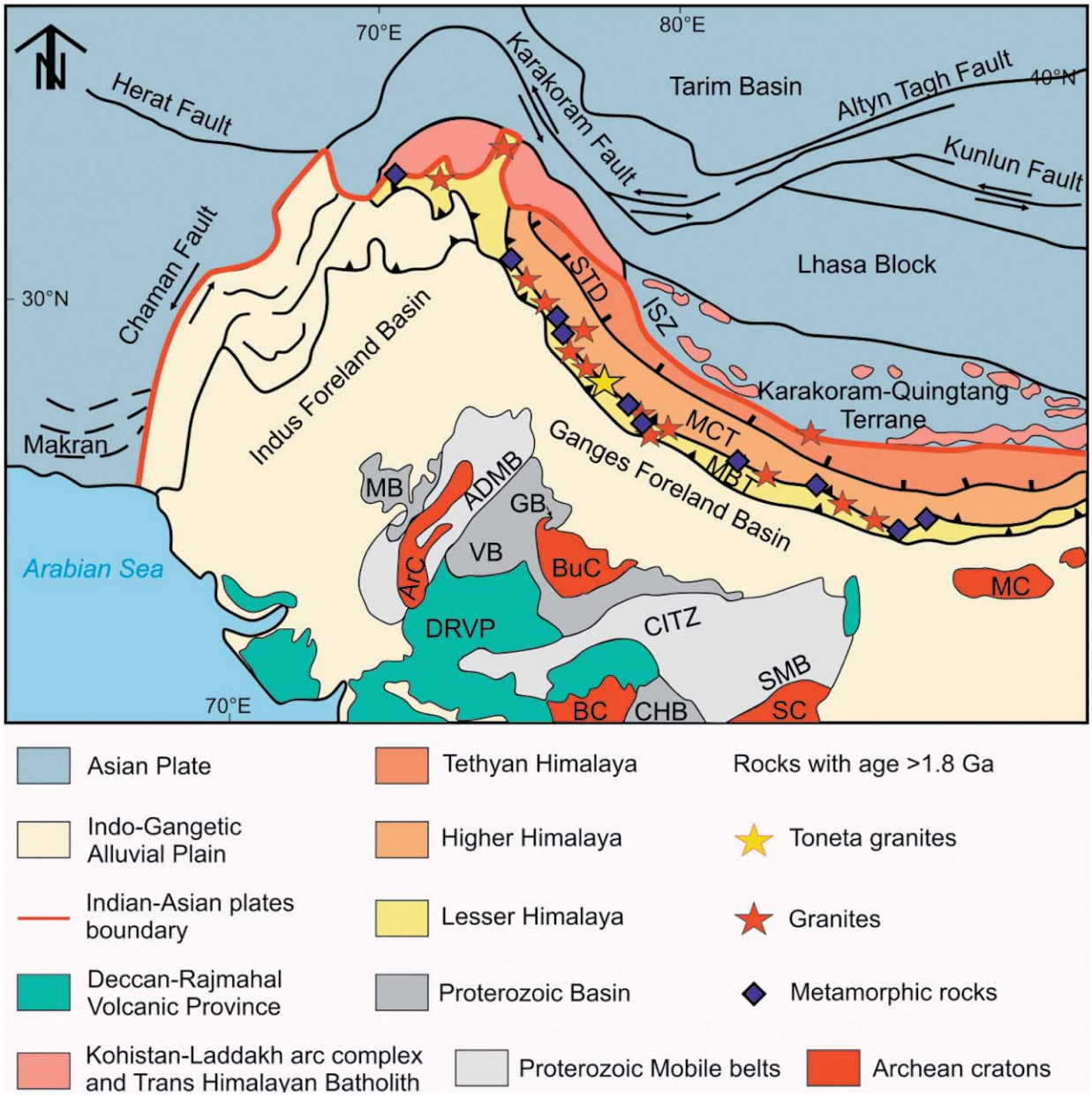


Fig. 1. Schematic map of structural divisions of the Himalaya and the adjacent part of the Indian Shield [Butler, 2019; Jain et al., 2020; Mishra et al., 2022 and references therein]. ADMB – Aravalli-Delhi Mobile Belt; ArC – Aravalli Craton; BC – Bastar Craton; BuC – Bundelkhand Craton; CHB – Chattisgarh Basin; CITZ – Central Indian Tectonic Zone; DRVP – Deccan-Rajmahal Volcanic Province; GB – Gwalior Basin; ISZ – Indus Suture Zone; MB – Marwar Basin; MB – Meghalaya Craton; MBT – Main Boundary Thrust; MCT – Main Central Thrust; SC – Singhbhum Craton; SMB – Singhbhum Mobile Belt; STD – South-Tibetan Detachment; VB – Vindhyan Basin

granitoids and orthogneisses throughout the Himalayan belt and highlighted both ancient crustal reworking and juvenile magmatic contributions [Yang et al., 2022; Imayama et al., 2023]. The tectonic significance of this magmatism is still debated. Geochemical and isotopic studies have interpreted Paleoproterozoic magmatism in the Lesser Himalaya as related to subduction, active continental margins, rifting, or crustal extension [Yang et al., 2022; Gupta and Kumar, 2023]. Recent work in the Arun sector also suggests that ca. 1.85–1.78 Ga magmatism may represent a regionally extensive crustal system, although a rift- or plume-related origin has been proposed for parts of this complex [Imayama et al., 2025].

The Toneta granite of the Garhwal Himalaya provides an important example of Paleoproterozoic S-type magmatism. Zircon U–Th–Pb dating yielded a crystallization age of 1845 ± 19 Ma, with inherited zircon populations at 3.52, 2.78, 2.62, and 2.10 Ga [Mishra et al., 2021]. The strongly peraluminous composition and Sm–Nd isotopic characteristics suggest a major contribution from the ancient crust as well [Mishra et al., 2022]. In this paper, we integrate these data to assess the source and petrogenesis of the Toneta granite and its implications for the Paleoproterozoic crustal evolution.

2. Geological Setting and Field Characteristics

The Lesser Himalaya is characterized by vast exposures of Precambrian crystalline and metasedimentary rocks recording a protracted pre-Himalayan crustal evolution. Paleoproterozoic granitoids occur as leucocratic, felsic, locally porphyritic, and variably foliated bodies associated with gneisses and metasedimentary rocks [Valdiya, 1980; Sharma, 1983, 1998]. The Toneta granite occurs within the crystalline domain of the Garhwal Himalaya (Fig. 1), where it forms resistant, generally massive to weakly foliated exposures. Close-up exposures show a leucocratic, medium- to coarse-grained granite with locally inequigranular or porphyritic textures.

The granite is mainly composed of quartz and feldspar with minor muscovite and biotite and accessory zircon, monazite, apatite and tourmaline [Mishra et al., 2021, 2022]. The zircon grains are oscillatory zoned and contain quartz, monazite and apatite inclusions, suggesting a magmatic origin [Mishra et al., 2021]. The mineral assemblage and strongly peraluminous composition are consistent with an S-type affinity.

The Toneta granite forms part of a broader ca. 1.8–1.9 Ga magmatic episode recognized throughout the Lesser Himalaya. In the outer Kumaun Himalaya, zircon U–Pb data indicate ca. 1.80–1.87 Ga felsic magmatism with crustal reworking, magma mixing and juvenile input [Gupta and Kumar, 2023].

3. Geochemical, Geochronological and Isotopic Characteristics

The Toneta granite is strongly peraluminous, with A/CNK values of 1.01–2.40, SiO_2 contents of approximately 73–76 wt.%, Al_2O_3 of 12–14 wt.%, and K_2O of 4.5–6.2 wt.% [Mishra et al., 2022]. Low CaO, MgO, TiO_2, and P_2O_5, together with enrichment in Rb, Th, U, and Pb and depletion in Ba, Sr, Nb, and Ti, characterize an evolved crust-derived magmatic system. Chondrite-normalized REE patterns show LREE enrichment relative to HREE, with $(La/Yb)_N = 1.61–15.08$ and pronounced negative Eu anomalies ($Eu/Eu^* = 0.12–0.31$). These characteristics indicate a heterogeneous ancient crustal source, rather than dominantly juvenile Paleoproterozoic crust. Negative εNd (t) values and T_{DM} model ages of ~2.5–2.7 Ga from the Sm-Nd data independently support considerable Archean crustal residence [Mishra et al., 2022]. Inherited zircon cores at 3.52, 2.78, 2.62 and 2.10 Ga indicate the magma interacted with much older crustal material. Zircon U-Th-Pb geochronology results in a crystallization age of 1845 ± 19 Ma [Mishra et al., 2021]. These characteristics imply important feldspar control during partial melting and/or magmatic differentiation.

New data from the Wangtu Gneissic Complex also indicate granite-gneiss crystallization at 1872.1 ± 2.5 and 1861 ± 13 Ma, confirming the regional significance of this age interval [Hifzurrahman et al., 2026]. In addition, the age of metamorphic processes in the schists hosting the granites was estimated using monazite. Metamorphism under upper amphibolite-facies conditions occurred between 1851 ± 20 and 1839 ± 22 Ma [Hifzurrahman et al., 2026] – that is, synchronously with the collisional granites.

4. Petrogenesis and Geodynamic Significance

The strongly peraluminous composition, S-type geochemical characteristics, and mineral assemblage indicate that the Toneta granite was generated predominantly from crustal material. Its low P_2O_5, high Rb, and depletion in Sr and Ba are compatible with melting of metasedimentary protoliths followed by feldspar-controlled evolution. The inherited zircon populations demonstrate that the source region contained Archean and Paleoproterozoic components, while the Nd model ages indicate long-lived Archean crustal residence.

We therefore interpret the Toneta granite as the product of partial melting of metasedimentary crust containing a substantial Archean component. Crustal thickening and thermal reworking provide plausible mechanisms for generating such melts during Paleoproterozoic tectonothermal activity. However, the available evidence does not uniquely distinguish a continental arc from other convergent or extensional settings. This caution is important because recent studies from the Lesser Himalaya have produced contrasting interpretations, including subduction-related [Yang et al., 2022], rift-related [Gupta and Kumar, 2023], and plume- or rift-related models [Imayama et al., 2025].

The 1845 ± 19 Ma age of the Toneta granite falls within a major interval of Paleoproterozoic magmatism broadly associated with Columbia–Nuna assembly. Recent studies from the Wangtu Gneissic Complex identify ca. 1.87–1.86 Ga magmatism and interpret the northern Indian margin in an active-margin framework, whereas other regional studies favour extension or rifting during this period [Gupta and Kumar, 2023; Hifzurrahman et al., 2026]. Thus, the Toneta granite is best interpreted as evidence for Paleoproterozoic crustal melting and recycling during a major tectonothermal episode, rather than as unequivocal evidence for one specific tectonic setting.

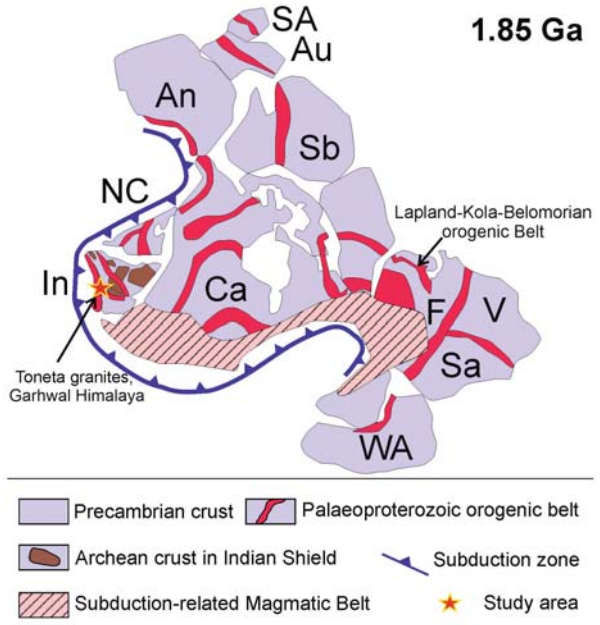


Fig. 2. Locations of the study area on the supercontinent Columbia (Nuna) model at ca. 1.85 Ga [Hou et al., 2008]. An – Antarctic Craton; Au – Australian Shield; Ca – Canadian Shield; F – Fennoscandia segment of the East European Craton (EEC); In – Indian Shield; NC – North China Craton; Sa – Sarmatia of the EEC; SA – South Africa Craton; Sb – Siberian Craton; V–Volgo-Uralia segment of the EEC; WA – West Africa Craton

The ca. 1.85 Ga age is also broadly comparable with Paleoproterozoic magmatism identified across the Himalayan crystalline domains (Fig. 2). Imayama et al. (2023) documented zircon U–Pb–Hf–O evidence from Garhwal basement rocks, while recent work from eastern Nepal identified ca. 1.85–1.81 Ga orthogneisses and suggested a broadly coherent Paleoproterozoic Himalayan crustal domain [Imayama et al., 2023, 2025]. The Toneta granite therefore contributes to the growing evidence for extensive Paleoproterozoic crustal reworking along the northern Indian continental domain of the Columbia (Nuna) Supercontinent (Fig. 2).

5. Conclusions

The Toneta granite represents a Paleoproterozoic, strongly peraluminous S-type granite with a crystallization age of 1845 ± 19 Ma. Inherited zircon populations at 3.52–2.10 Ga and Nd model ages of 2.5–2.7 Ga demonstrate substantial involvement of ancient Archean crust. Its geochemical characteristics indicate derivation predominantly from metasedimentary rocks, with significant feldspar control during magma evolution. We interpret Toneta magmatism as the result of Paleoproterozoic crustal melting and thermal reworking during a major tectonothermal episode. Its ca. 1.85 Ga age broadly coincides with Columbia (Nuna) assembly and contributes to evidence for extensive Paleoproterozoic crustal recycling and stabilization along the northern Indian continental domain.

References

Butler R. W. H. Tectonic evolution of the Himalayan syntaxes: the view from Nanga Parbat. *Geological Society, London, Special Publications*. 2019;483(1):215–254. doi: org/10.1144/SP483.5

Frank W. Geology and petrography of Kulu-south Lahul area. *Himalaya: Sciences de la Terre.* Paris: CNRS; 1977. P. 147–173.

Gupta S., Kumar S. Geochemistry, geochronology, and isotopic studies of Paleoproterozoic magmatic rocks from outer Kumaun Lesser Himalaya, India: implication on petrogenesis and crustal evolution of northern Indian Block. *Gondwana Research.* 2023;113:31–52. doi: org/10.1016/j.gr.2022.10.009

Hifzurrahman, Nasipuri P., Corfu F. Integrated mineral chemistry and monazite–zircon U–Pb geochronology of Wangtu metasediments and granite-gneisses, NW Himalaya, and their implications in Columbia assembly. *Discover Geoscience.* 2026;4:85. doi: org/10.1007/s44288-026-00460-2

Hou G., Santosh M., Qian X., Lister G. S., Li J. Tectonic constraints on 1.3–1.2 Ga final breakup of Columbia supercontinent from a giant radiating dyke swarm. *Gondwana Res*. 2008;14(3):561–566. doi: org/10.1016/j.gr.2008.03.005

Imayama T., Bose N., Yi K., Jeong Y.-J., Horie K., Takehara M., Kawabata R. Zircon U–Pb, Hf, and O isotopic constraints on the tectonic affinity of the basement of the Himalayan orogenic belt: insights from metasedimentary rocks, orthogneisses, and leucogranites in Garhwal, NW India. *Precambrian Res.* 2023;397:107183. doi: org/10.1016/j.precamres.2023.107183

Imayama T., Yi K., Aoki K. Revisiting the origin and significance of the Paleoproterozoic complex in the Himalaya: new insights from apatite geochemistry. *All Earth.* 2025;37:1. doi: org/10.1080/27669645.2025.2579381

Jain A. K., Banerjee D. M., Kale V. S. Tectonics of the Indian subcontinent. Cham: Springer Nature; 2020. 576 p. doi: org/10.1007/978-3-030-42845-7

Josh I. M., Das B. P., Patel S., Pastor-Galán D., Pant N. C., Singh A. K., Oinam G., Kumar A., Kumar A. A ~1.6 Ga accretionary event in the polymetamorphic Lesser Himalaya, India: insights into late-stage assembly of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*. 2026;435:108038. doi: org/10.1016/j.precamres.2026.108038

Miller C., Klötzli U., Frank W., Thöni M., Grasemann B. Proterozoic crustal evolution in the NW Himalaya (India) as recorded by circa 1.80 Ga mafic and 1.84 Ga granitic magmatism. *Precambrian Res.* 2000;103:191–206. doi: org/10.1016/S0301-9268(00)00091-7

Mishra S., Slabunov A. I., Svetov S. A., Kervinen A. V., Nesterova N. S. Zircons from collisional granites, Garhwal Himalaya, NW India: U–Th–Pb age, geochemistry and protolith constraints. *Minerals.* 2021;11:1071. doi: org/10.3390/min11101071

Mishra S., Slabunov A. I., Nainwal H. C., Singh V. K., Singh P. K., Nesterova N. S., Svetov S. A. Palaeoproterozoic S-type granites from Garhwal Himalaya, NW India: geochemistry, Sm–Nd isotope systematics and tectonic implications. *Geological Journal.* 2022;57(6):2443–2463. doi: 10.1002/gj.4421

Sharma K. K. Granitoid belts of the Himalayas. In Shams, F. A. (ed.), Granites of Himalaya, Karakoram and Hindukush. Peshawar University, Pakistan; 1983. P. 11–37.

Sharma K. K. Geological evolution and crustal growth of Bundelkhand craton and its relict in the surrounding regions, North Indian Shield. In Paliwal, B.S. (ed.), *The Indian Precambrian*, Jodhpur: Scientific Publishers; 1998. P. 33–43.

Valdiya K. S. The two intracrustal boundary thrusts of the Himalaya. *Tectonophysics.* 1980;66:323–348.

Yang P., Shi M., Tan F., Rajaure S., Tripathi G. N., He L., Li Z., Zhan W. Zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic compositions of Palaeoproterozoic meta-granitoids in the Lesser Himalaya, Nepal: tectonostratigraphic implications. *Geological Journal.* 2022;57:1–23. doi: org/10.1002/gj.4275

Поступила в редакцию / received: 14.10.2025; принята к публикации / accepted: 07.09.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Мишра Сумит
д-р наук, исследователь
e-mail: smpsgeo@gmail.com

Слабунов Александр Иванович
д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геологии и геодинамики докембрия
e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

Серка Руис Мария Фернанда
магистр, аспирант
e-mail: fernanda.cerca@geociencias.unam.mx

Сингх Винод Кумар
д-р наук, профессор, декан геологического факультета
e-mail: vinodksingh@bujhansi.ac.in

Гонзалез-Партида Эдуардо
д-р наук, профессор
e-mail: egp@geociencias.unam.mx

CONTRIBUTORS:

Mishra, Sumit
PhD, Researcher

Slabunov, Alexander
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory, Chief Researcher

Cerca Ruiz, María Fernanda
Masters, Doctorate Student

Singh, Vinod
PhD, Professor, Head of Department

González-Partida, Eduardo
PhD, Professor

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 127–133
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 127–133
DOI: 10.17076/geo2243

УДК 553.314.2:551.243.6:411.1

ДРЕВНИЕ ЦИРКОНЫ КАЙНОЗОЙСКИХ БАЗАЛЬТОВ ИСЛАНДИИ: СОСТАВ И ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА

В. Р. Ветрин[1, 2*], А. А. Кременецкий[1]

[1] *Институт минералогии, геохимии, кристаллохимии редких элементов (ул. Вересаева, 15, Москва, Россия, 121357), *vetrin.val@gmail.com*

[2] *Геологический институт Федерального научного центра «Кольский научный центр РАН» (ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Россия, 184209)*

В кайнозойских базальтах Исландии наряду с сингенетическими кристаллами впервые обнаружены древние ксеногенные зерна циркона, образующие возрастной ряд от плейстоцена до мезоархея, и около 70 % возрастов являются конкордантными. Сингенетические кристаллы циркона составляют 2 % от общего количества зерен, и распределение ксеногенных зерен (в %) следующее: мезозойские – 7, палеозойские – 24, неопротерозойские – 16, мезопротерозойские – 24, палеопротерозойские – 23, неоархейские – 3, мезоархейские – 1. Около 90 % изученных зерен имеют величину Th/U ≥ 0,3, характерную для магматических цирконов. В поле составов метаморфических цирконов (Th/U ≤ 0,1) находятся около 3 % кристаллов, и к метаморфизованным цирконам магматического генезиса (Th/U = 0,1–0,3) относятся 10 % зерен. Среди ксеногенных кристаллов циркона по возрастам и результатам Lu-Hf изотопной систематики выделены пять групп с интервалами в 100–200, 300–500, 900–1200, 1700–1900, 2000–2650 млн лет, образованных цирконами из пород, соответственно, Центрально-Атлантической магматической провинции (CAMP), каледонской орогении, Гренвилл-Свеконорвежского орогена, свекофеннских гранитов и производных древней сиалической коры – ТТГ-комплексов и эклогитов. По концентрациям РЗЭ и характеру их распределения фанерозойские и докембрийские ксеногенные цирконы близки, соответственно, составу цирконов из базальтов и габбро Северного Ледовитого океана (СЛО) и Срединно-Атлантического хребта (САХ) с возрастами 97–153 и 1500–1900 млн лет. По концентрациям высокозарядных элементов – Y, U, Yb, Hf точки составов фанерозойских и докембрийских ксеногенных цирконов располагаются в пределах поля континентальных производных. Наличие древних цирконов в кайнозойских базальтах Исландии обусловлено, вероятно, контаминацией базальтовых расплавов веществом блоков континентальной коры, находившихся в зоне спрединга, с сохранением в составе цирконов информации о возрасте и этапах преобразования литосферы в интервале около 3 млрд лет.

Ключевые слова: базальты; Исландия; цирконы; Lu-Hf изотопный состав; редкоэлементный состав; контаминация

Для цитирования: Ветрин В. Р., Кременецкий А. А. Древние цирконы кайнозойских базальтов исландии: состав и источники вещества // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 127–133. doi: 10.17076/geo2243

Финансирование. Работа выполнена в рамках тем: № 049-00002-24-00 (ФГБУ ИМГРЭ, Роснедра) и FMEZ-2022-0025 (ГИ КНЦ РАН).

V. R. Vetrin[1,2*], A. A. Kremenetskiy[1]. ANCIENT ZIRCONS FROM CENOZOIC BASALTS OF ICELAND: COMPOSITION AND SOURCES OF THE SUBSTANCE

*[1] Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, (15 Veresaeva St., 121357 Moscow, Russia), *vetrin.val@gmail.com*
[2] Geological Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14 Fersman St., 184209 Apatity, Russia)

In the Cenozoic basalts of Iceland, along with syngenetic crystals, older xenogenic zircon grains were discovered, forming an age range from the Pleistocene to the Mesoarchean, and about 70 % of the ages are concordant. Zircon syngenetic crystals account for 2 % of the total number of grains, and the percentage distribution of xenogenic grains is as follows: Mesozoic – 7, Paleozoic – 24, Neoproterozoic – 16, Mesoproterozoic – 24, Paleoproterozoic – 23, Neoarchean – 3, and Mesoarchean – 1. About 90 % of the studied grains have a Th/U ratio ≥ 0.3, characteristic of magmatic zircons. About 3 % of crystals fall in the field of metamorphic zircon compositions (Th/U ≤ 0.1), and 10 % of grains are metamorphosed zircons of magmatic genesis (Th/U = 0.1–0.3). Based on the ages and results of Lu-Hf isotopic systematics, xenogenic zircon crystals were clustered into five groups with intervals of 100–200, 300–500, 900–1200, 1700–1900, 2000–2650 Ma, formed, respectively, by zircons of the rocks of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP), the Caledonian orogeny, Grenville-Sveconorwegian orogen, Svecofennian granites, and derivatives of the ancient sialic crust – TTG complexes and eclogites. In their REE concentrations and distribution patterns, the Phanerozoic and Precambrian xenogenic zircons are similar, respectively, to zircons from basalts and gabbro of the Arctic Ocean (AO) and the Mid-Atlantic ridge (MAR), with ages of 97–153 and 1500–1900 Ma. Based on the concentrations of highly charged elements – Y, U, Yb, Hf, the composition points of the Phanerozoic and Precambrian xenogenic zircons are located within the field of continental derivatives. The presence of ancient zircons in the Cenozoic basalts of Iceland is probably due to the contamination of basaltic melts with matter from sections of the continental crust located in the spreading zone, with the zircons retaining information about the age and stages of lithospheric transformation in the interval of about 3 billion years.

Keywords: basalts; Iceland; zircons; Lu-Hf isotopic composition; rare-element composition; contamination

For citation: Vetrin V. R., Kremenetskiy A. A. Ancient zircons from Cenozoic basalts of Iceland: composition and sources of the substance. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026. No. 10. P. 127–133. doi: 10.17076/geo2243

Funding. The work was carried out within research themes № 049-00002-24-00 (IMGRE, Rosnedra) and FMEZ-2022-0025 (GI KSC RAS).

Породами докембрия сложена значительная часть кристаллических щитов на всех материках Земли, занимающих лишь около 30 % поверхности Земли. При геолого-геофизических работах последних десятилетий получены сведения о наличии докембрийских пород также в пределах акваторий Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов, и одним из источников такой информации являются цирконы, вынесенные четвертичными расплавами на поверхность Земли.

Исландия в современном эрозионном срезе на 85–90 % сложена базальтами и интрузивными породами основного состава (рис. 1), образованными при взаимодействии плюма с активно развивающимся Срединно-Атлантическим хребтом.

По данным сейсмических исследований остров обладает корой толщиной около 18–20 км, достигающей 45 км в его юго-восточной части, что могло быть обусловлено присутствием блоков континентальной коры в верхних частях разреза литосферы. Нахождение фрагментов древней коры, разрушенной и погребенной под базальтами в процессе прохождения под ней Исландского плюма, предполагается и по интенсивным положительным магнитным аномалиям по направлению от восточного края Гренландии через центральную часть Исландии и далее в юго-восточном направлении к Фарерским островам [Torsvik et al., 2015]. В то же время вещественные доказательства древнего возраста пород и минералов глубинных частей Исландии немногочисленны

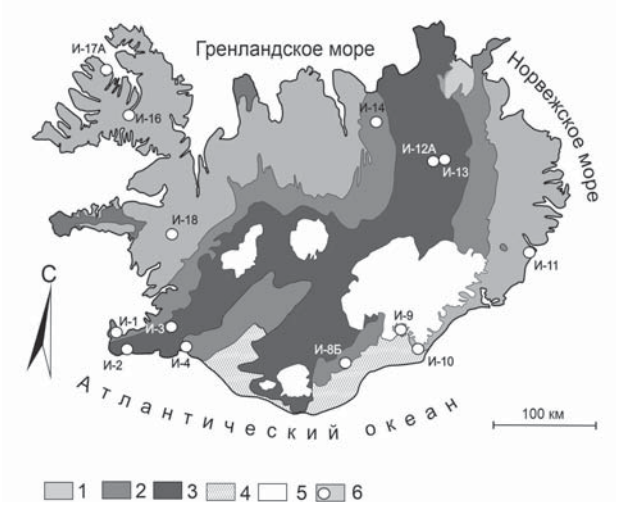


Рис. 1. Схема опробования базальтов Исландии [геология по: Thordarson, Larsen, 2007]. 1–3-комплексы, соответственно, платобазальтов (16–3,3 млн лет), «серых базальтов» (3,3–0,8 млн лет), рифтогенных базальтов (< 0,8 млн лет), 4 – голоценовые отложения и потоки лавы (< 10000 лет), 5 – ледниковые покровы, 6 – места отбора и номер пробы

Fig. 1. Schematic map of basalt sampling sites in Iceland, geology after [Thordarson, Larsen, 2007]. 1–3 complexes of platobasalts (16–3.3 Ma), "gray basalts" (3.3–0.8 Ma), riftogenic basalts (< 0.8 Ma), respectively, 4 – Holocene deposits and lava flows (< 10,000 years), 5 – glacial cover, 6 – sampling sites and sample numbers

и ограничены единичными U-Pb датировками цирконов юрского и триасового возрастов из игнимбритов северо-восточной части острова [Paquette et al., 2006]. Исходя из этого, нами было выполнено опробование всех главных типов базальтов и произведено U-Pb датирование цирконов из пород всех комплексов, изучен Lu-Hf изотопный состав цирконов и концентрации в них элементов примесей.

Дробление проб базальтов и выделение цирконов выполнено в ИМГРЭ с обеспечением всех необходимых мер для предохранения от контаминации пород посторонним материалом. На ионном микрозонде SHRIMP-II в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) в 309 зернах циркона установлен их U-Pb возраст по методике [Williams et al., 1998]. Элементы примеси определены методом ICPMS (Photon–Machines Analyte Excite laser ablation system) в Университете Маквари, Сидней, Австралия. Здесь же, в датированных кристаллах циркона установлен изотопный состав Hf методом лазерной абляции (New Wave LUV213) и масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме (Nu–Plasma MC–ICPMS). Методика исследований детально охарактеризована в [Griffin et al., 2000].

В результате определений U-Pb возраста было установлено нахождение во всех пробах базальтов разновозрастных зерен циркона, образующих ряд значений от плейстоцена до мезоархея (рис. 2), и около 70 % возрастов являются конкордантными.

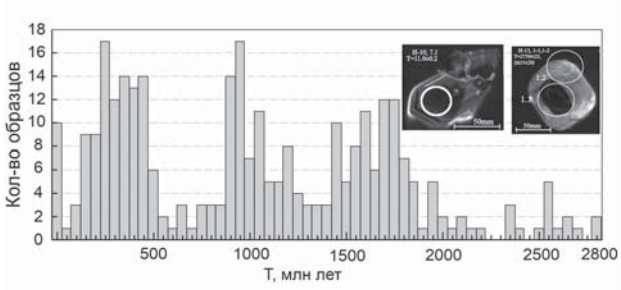


Рис. 2. Частота встречаемости и CL-снимки кристаллов циркона из базальтов Исландии. Окружностями показаны места и результаты определения возраста (млн лет)

Fig. 2. Frequency and CL images of zircon crystals from basalts of Iceland. The circles show locations and age results (Ma)

По особенностям строения зерен и времени образования среди них выделены два генетических типа кристаллов: сингенетические и существенно преобладающие ксеногенные. Миоцен-плиоценовые сингенетические кристаллы циркона составляют 2 % от общего количества зерен, и распределение ксеногенных зерен (в %) следующее: мезозойские – 7 (мел – 1, юра – 3, триас – 3), палеозойские – 24 (пермь, карбон, девон – по 5, силур – 2, ордовик – 4, кембрий – 3), неопротерозойские – 16, мезопротерозойские – 24, палеопротерозойские – 23, неоархейские – 3, мезоархейские – 1. Около 90 % изученных зерен имеют величину отношения Th/U ≥ 0,3, характерную для магматических цирконов. В поле составов метаморфических цирконов (Th/U = ≤ 0,01–0,1) находятся около 3 % кристаллов, и к метаморфизованным цирконам магматического генезиса (Th/U = 0,1–0,3), содержащих повышенное количество реликтовых участков магматического циркона, относятся 10 % зерен.

Результаты изучения Lu-Hf изотопной системы цирконов получены для 23 зерен. Сингенетические кристаллы циркона с возрастами 1–13 млн лет по сравнению с цирконами из базальтов срединно-океанических хребтов (СОХ) характеризуются пониженными значениями инициальных отношений $^{176}Hf/^{177}Hf$ и εHf (T), что определялось их кристаллизацией из более кремнекислых, обедненных Lu расплавов. Среди ксеногенных кристаллов циркона

выделены пять возрастных групп с интервалами в 100–200, 300–500, 900–1200, 1700–1900, 2000–2650 млн лет.

Величина отношения Th/U в кристаллах первой группы составляет 0,32–0,97, и все возрастные значения цирконов (93–212 млн лет) являются конкордантными. Вариации величины Hfi установлены в пределах от 0,28255 до 0,28286 при изменчивости значений εHf (T) от 6,7 до –6,3 и T (DM) от 0,7 до 1,4 млрд лет. Образование рассматриваемых цирконов могло происходить при формировании пород Центрально-Атлантической трапповой магматической провинции (CAMP) с возрастами 200–230 млн лет назад. Для 12 образцов толеитов Гайаны (Ю. Америка) и Гвинеи (Зап. Африка) провинции CAMP определения инициального εNd варьируют от 5,78 до –5,3 [Deckart et al., 2005], что при пересчете по формуле εHf = 1,36*εNd + 3 соответствует значениям εHf (T) от 10,9 до –4,2. Указанные значения εHf перекрываются с определениями этого параметра в значительной части цирконов Исландии. Образование базальтов CAMP установлено на восточной окраине Северной Америки – от Канады до Флориды – и предшествовало расколу Гондваны с формированием океанической коры в Центральной Атлантике [King, Anderson, 1995].

Вторую возрастную группу ксеногенных кристаллов образуют кристаллы циркона с конкордантными возрастами от 316 до 431 млн лет и величиной отношения Th/U в 0,34–0,76. Определение изотопного состава Hf показало присутствие в их составе материала континентальной коры (εHf (T) от –1,8 до –5,2). Близкий конкордантный U-Pb возраст в пределах 431–421 млн лет имеют метаморфогенные кристаллы из базальтов западной части Исландии, что позволяет сопоставлять цирконы рассматриваемой возрастной группы с производными каледонской орогении в северных частях Британских островов, Скандинавии, Шпицбергене, северо-восточной и восточной Гренландии. Для последней приводятся датировки процессов скандинавской фазы каледонского метаморфизма и магматической активизации в 440–380 млн лет [Corfu et al., 2014].

Ксеногенные цирконы третьей возрастной группы с возрастами 923–1237 млн лет по времени образования могут быть сопоставлены, вероятно, с производными Гренвилл-Свеконорвежского орогена, образующими Гренвилльский сектор вдоль юго-восточной окраины Канадского щита и Свеконорвежский на юго-западе Скандинавского п-ова. Образование орогена происходило в позднем мезопротерозое и неопротерозое в период от 1,19 до 0,96 млрд лет [Andersson et al., 2011], и сопровождалось формированием мафических и фельзических магматических комплексов с повышенными значениями величины отношения 176Hf/177Hf [Andersen et al., 2002]. В рассматриваемых цирконах начальное отношение 176Hf/177Hf составляет 0,282073–0,282271, и точки изотопных составов цирконов располагаются в пределах состава поздних свекофеннских гранитов с возрастами протолитов в 1,6–1,5 млрд лет, или занимают промежуточное положение между составами коры и деплетированной мантии (рис. 3). Возраст метаморфизма, определенный по центральной части одного из кристаллов, в пределах ошибки определения близок возрасту сохранившихся от замещения краевых частей исходного зерна (соответственно, 1320 ± 92 и 1237 ± 13 млн лет, и свидетельствует о сближенности времени магматизма и метаморфизма при образовании циркона.

Цирконы четвертой группы представлены кристаллами с неотчетливо проявленной зональностью и варьируют по возрасту в пределах 1819–1886 млн лет, εHf (T) от 2,5 до –4,9. Величина отношения Th/U определена в 0,38–1,09, и модельный возраст цирконов составляет 2,3–2,8 млрд лет. На диаграмме

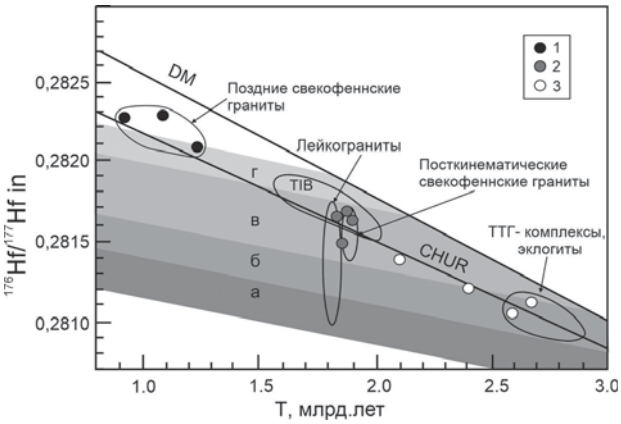


Рис. 3. Возрастная эволюция начального отношения Hf в докембрийских ксеногенных цирконах Исландии. 1–3 – цирконы, соответственно, 3–5 возрастных групп (см. текст), а–г – области развития коры, соответственно, мезоархейского, неоархейского, палеопротерозойского и мезопротерозойского возрастов Балтийского щита [по: Andersen et al., 2002; Heilimo et al., 2014]. ТІВ-область изотопных составов гранитоидов Трансскандинавского интрузивного комплекса

Fig. 3. Age evolution of the initial Hf ratio in the Precambrian xenogenic zircons of Iceland. 1–3 – zircons of 3–5 age groups, respectively, a–г – areas of development of the crust of the Mesoarchean, Neoarchean, Paleoproterozoic, and Mesoproterozoic ages, respectively, of the Baltic Shield after [Andersen et al., 2002; Heilimo et al., 2014]. TIB-the area of isotopic compositions of granitoids of the Trans-Scandinavian intrusive complex

в координатах T, млн лет – $^{176}Hf/^{177}Hf$ точки составов цирконов расположены в области эволюции палеопротерозойской коры юго-западной части Балтийского щита и находятся в полях изотопного состава цирконов свекофеннских гранитов с возрастами 1,6–2,0 млрд лет и гранитоидов трансскандинавского интрузивного пояса, формирование которых происходило в интервале 1,86–1,67 млрд лет [Andersen et al., 2002].

Пятую группу образуют четыре зерна циркона с Th/U отношением 0,26–1,15 и возрастами в 2089–2658 млн лет. Инициальное отношение $^{176}Hf/^{177}Hf$ в них составляет 0,281044–0,281373, величина εHf (T) от 1,23 до –3,1 и модельный возраст от 2,8 до 3,2 млрд лет. Указанные параметры в целом определяют кристаллизацию цирконов в породах древней сиалической коры, и две точки состава цирконов располагаются в поле эволюции изотопных составов ТТГ-комплексов Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 [Vetrin et al., 2016] и эклогитов центральной и северной частей Балтийского щита [Mints et al., 2010].

По результатам определения концентраций элементов примесей выделены два типа циркона – циркон-1 (Ce/Ce* > 10) и циркон-2 (Ce/Ce* < 10). Циркон-1 деплетирован по La с существенным увеличением концентраций тяжелых лантаноидов при уменьшении их ионных радиусов (Dy до 2000 раз, Lu до 20000 раз по сравнению с хондритом C1 (средние $(Lu/La)_N$ = 12400–16800)) с отчетливо проявленным Ce- максимумом и Eu-минимумом. Эти особенности состава характерны для магматических цирконов из континентальных пород. Зерна циркона-2 отвечают главным образом сингенетическому типу и имеют повышенные по отношению к циркону-1 концентрации легких РЗЭ (La_N = 2–180, Pr_N = 8–450, Nd_N = 10–800 от C1), чем определяется более пологое расположение его концентрационных кривых (средние $(Lu/La)_N$ = 225–542)). Образование циркона-2 предполагается как в процессе кристаллизации насыщенных флюидом расплавов кремнекислого и среднего составов, так и в результате гидротермальной переработки первично магматических цирконов. Ксеногенные цирконы по концентрациям РЗЭ и характеру распределения на нормированных к хондриту графиках близки составу цирконов из базальтов и габбро-долеритов Северного Ледовитого океана (СЛО) и САХ [Kremenetskiy et al., 2018], и по концентрациям высокозарядных элементов – Y, U, Yb, Hf отвечают составам континентальных цирконов [Grimes et al., 2007].

Исходя из приведенных данных, наличие древних цирконов в кайнозойских базальтах Исландии объясняется, вероятно, контаминацией миоцен-плиоценовых базальтовых расплавов веществом древней континентальной коры, разрушенной при прохождении под ней Исландского плюма, с сохранением в составе цирконов информации о возрасте и этапах образования и преобразования литосферы в интервале около 3 млрд лет. Сохранение первичных изотопных характеристик ксеногенных цирконов подтверждается преимущественно конкордантными значениями их U-Pb возрастов и наиболее вероятно при быстром подъеме мантийных расплавов с глубин нижней-средней коры до поверхности. Определение отношений Lu/Hf в источниках расплавов [Faure, 1986] для цирконов Исландии показало их увеличение с уменьшением возраста (рис. 4), что определялось, как представляется, уменьшением геотермического градиента и обусловленного этим увеличением глубинности образования исходных расплавов.

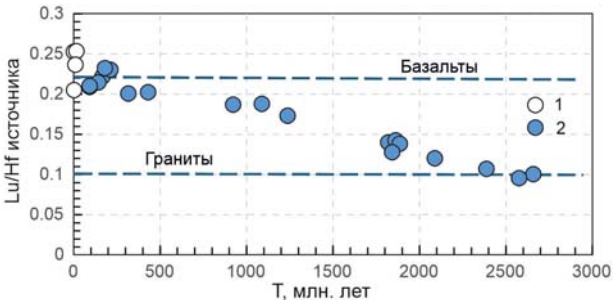


Рис. 4. Диаграмма эволюции отношения Lu/Hf в источниках расплавов цирконов Исландии. Пунктирными линиями показаны средние значения отношения Lu/Hf в гранитах и базальтах [Faure, 1986]. 1, 2 – цирконы, соответственно, сингенетического и ксеногенного типов

Fig. 4. Evolution diagram of Lu/Hf ratio in the initial melts of zircons of Iceland. The dotted lines show the average values of the Lu/Hf ratio in granites and basalts [Faure, 1986]. 1, 2 – zircons of syngenetic and xenogenic types, respectively

Установленная зависимость позволяет объяснить также эволюцию исходных расплавов от тоналит-трондъемитовых ассоциаций докембрия с низкими Lu/Hf до близких по изотопному составу к DM базальтов кайнозоя с высокими значениями этого отношения.

Авторы признательны Е. А. Белоусовой, Н. В. Родионову, М. А. Ветриной за проведение аналитических исследований и обсуждение полученных результатов.

Литература

Andersen T., Griffin W. L., Pearson N. J. Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield // Journal of Petrol. 2002. Vol. 43(9). P. 1725–1747.

Andersson U. B., Begg G. C., Griffin W. L., Högdahl K. Ancient and juvenile components in the continental crust and mantle: Hf isotopes in zircon from Svecofennian magmatic rocks and rapakivi granites in Sweden // Lithosphere. 2011. Vol. 3(6). P. 409–419.

Corfu F., Andersen T. B., Gasser D. The Scandinavian Caledonides: main features, conceptual advances and critical questions // Geological Society, London, Special Publications. 2014. Vol. 390. P. 9–43.

Deckart K., Crarc A. H., Aguilar C., Yergas R. Magmatic and hydrothermal chronology of the supergiant Rio Blanco porphyry copper deposit, central Chile: Implications of an interadet U-Pb and 40 Ar-39 Ar data set. // Economic Geology. 2005. Vol. 100. P. 905–934.

Faure G. Principles of isotope geology. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 1986. 589 p.

Heilimo E., Elburg M. A., Andersen T. Crustal growth and reworking during Lapland-Kola orogeny in northern Fennoscandia: U-Pb and Lu-Hf data from the Nattanen and Litsa-Aragub type granites // Lithos. 2014. Vol. 205. P. 112–126.

Griffin W. L., Pearson N. J., Belousova E., Jackson S. E., O'Reilly S. Y., van Achterberg E., Shee S. R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. Vol. 64. P. 133–147.

Grimes C. B., John B. E., Kelemen P. B., Mazdab F. K., Wooden J. L., Cheadle M. J., Hanghøj K., Schwartz J. J. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance // Geology. 2007. Vol. 35. P. 643–646.

King S. D., Anderson D. L. An alternative mechanism of flood basalt formation // Earth Planet. Sci. Lett. 1995. Vol. 136. P. 269–279.

Kremenetskiy A. A., Gromalova N. A., Skolotnev S. G., Shulatin O. G., Belousova E. A. Sources of magmatic rocks from the deep-sea floor of the Arctic Ocean and the Central Atlantic: evidence from data on the U-Pb age, Hf isotopes, and REE geochemistry of zircons // Doklady Earth Science. 2018. Vol. 481(1). P. 854–858.

Mints M. V., Belousova E. A., Konilov A. N., Natapov L. M., Shchipansky A. A., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Dokukina K. A., Kaulina T. V. Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia // Geology. 2010. Vol. 38(8). P. 739–742.

Paquette J., Sigmarrson O., Tiepolo M. Continental basement under Iceland revealed by old zircons // Eos Trans. AGU. 2006. AGUFM. 33. P. 642.

Thordarson T., Larsen G. Volcanism in Iceland in historical time: volcano types eruption styles and eruptive history // Journal of Geodynamics. 2007. Vol. 43. P. 118–152.

Torsvik T. H., Amundsen H. E. F., Tronnes R. G. et al. Continental crust beneath southeast Iceland. 2015. doi: 10.1073/pnas.1423099112

Vetrin V. R., Belousova E. A., Chupin V. P. Trace element composition and Lu-Hf isotope systematics of zircon from Plagiogneisses of the Kola Superdeep Well: contribution of a Paleoarchean crust in Mesoarchean metavolcanic rocks // Geochemistry Int. 2016. Vol. 54 (1). P. 93–112.

Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion-microprobe // Rev. Econ. Geol. 1998. Vol. 7. P. 1–35.

References

Andersen T., Griffin W. L., Pearson N. J. Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield. *Journal of Petrol.* 2002;43(9):1725–1747.

Andersson U. B., Begg G. C., Griffin W. L., Högdahl K. Ancient and juvenile components in the continental crust and mantle: Hf isotopes in zircon from Svecofennian magmatic rocks and rapakivi granites in Sweden. *Lithosphere.* 2011;3(6):409–419.

Corfu F., Andersen T. B., Gasser D. The Scandinavian Caledonides: main features, conceptual advances and critical questions. *Geological Society, London, Special Publications*. 2014;390:9–43. doi: 10.1144/SP390.25

Deckart K., Crarc A. H., Aguilar C., Yergas R. Magmatic and hydrothermal chronology of the supergiant Rio Blanco porphyry copper deposit, central Chile: Implications of an interadet U-Pb and 40 Ar-39 Ar data set. *Economic Geology.* 2005;100:905–934. doi: 10.1016/j.lithos.2004.09.023

Faure G. Principles of isotope geology. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 1986. 589 p.

Heilimo E., Elburg M. A., Andersen T. Crustal growth and reworking during Lapland-Kola orogeny in northern Fennoscandia: U-Pb and Lu-Hf data from the Nattanen and Litsa-Aragub type granites. *Lithos.* 2014;205:112–126.

Griffin W. L., Pearson N. J., Belousova E., Jackson S. E., O'Reilly S. Y., van Achterberg E., Shee S. R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM–MC–ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2000;64:133–147.

Grimes C. B., John B. E., Kelemen P. B., Mazdab F. K., Wooden J. L., Cheadle M. J., Hanghøj K., Schwartz J. J. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology.* 2007;35:643–646.

King S. D., Anderson D. L. An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995;136:269–279.

Kremenetskiy A. A., Gromalova N. A., Skolotnev S. G., Shulatin O. G., Belousova E. A. Sources of magmatic rocks from the deep-sea floor of the Arctic Ocean and the Central Atlantic: evidence from data on the U-Pb age, Hf isotopes, and REE geochemistry of zircons. *Doklady Earth Science.* 2018;481(1):854–858.

Mints M. V., Belousova E. A., Konilov A. N., Natapov L. M., Shchipansky A. A., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Dokukina K. A., Kaulina T. V. Mesoarchean subduction processes: 2.87 Ga eclogites from the Kola Peninsula, Russia. *Geology*. 2010;38(8):739–742.

Paquette J., Sigmarrson O., Tiepolo M. Continental basement under Iceland revealed by old zircons. *Eos Trans. AGU*. 2006; AGUFM.33:642.

Thordarson T., Larsen G. Volcanism in Iceland in historical time: volcano types eruption styles and eruptive history. *Journal of Geodynamics*. 2007;43:118–152.

Torsvik T. H., Amundsen H. E. F., Tronnes R. G. et al. Continental crust beneath southeast Iceland. 2015. doi: 10.1073/pnas.1423099112

Vetrin V. R., Belousova E. A., Chupin V. P. Trace element composition and Lu-Hf isotope systematics of zircon from Plagiogneisses of the Kola Superdeep Well: contribution of a Paleoarchean crust in Mesoarchean metavolcanic rocks. *Geochemistry Int.* 2016;54(1):93–112.

Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion-microprobe. *Rev. Econ. Geol*. 1998;7:1–35.

Поступила в редакцию / received: 26.10.2025; принята к публикации / accepted: 07.09.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ветрин Валерий Романович
канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: vetrin.val@gmail.com

Кременецкий Александр Александрович
д-р геол.-мин. наук, научный руководитель ИМГРЭ
e-mail: nauka@imgre.ru

CONTRIBUTORS:

Vetrin, Valeriy
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Kremenetskiy, Alexander
Dr. Sci. (Geol.-Miner.), IMGRE Head of Research

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 134–140
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 134–140
DOI: 10.17076/geo2245

УДК 550.347

СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА ПО НОВЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

А. Г. Гоев[1]*, К. А. Докукина[2]

[1] *Институт динамики геосфер им. акад. М. А. Садовского Российской академии наук (Ленинский пр., 38, корп. 1, Москва, Россия, 119334), *goev@idg.ras.ru*
[2] *Геологический институт Российской академии наук (Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, Россия, 119017)*

В работе представлены результаты исследования верхней мантии Кольского региона на основе анализа широкополосных сейсмологических данных. Использованы записи как постоянных сейсмических станций, установленных в регионе, так и четырех новых пунктов регистрации. По данным полученной таким образом площадной сети, состоящей из 14 станций, методом функций приемника были построены модели распределения скоростей поперечных волн до глубин около 300 км. Согласно построенным новым моделям, выявляется сложное гетерогенное строение литосферы исследуемого региона, где высокоскоростной слой поднимается к верхним слоям мантии и деформирует вышележащий слой пониженных скоростей MLD (mid-lithosphere discontinuity). По-видимому, неоднородное строение мантии представляет собой результат взаимодействия архейской литосферы и палеопротерозойского мантийного плюма. Кроме того, показано, что коро-мантийный переход в исследуемом регионе представлен как резкой границей Мохо, так и градиентным слоем.

Ключевые слова: Кольский регион; обменные волны; глубинное строение; верхняя мантия; Мохо; MLD

Для цитирования: Гоев А. Г., Докукина К. А. Строение верхней мантии Кольского региона по новым сейсмологическим данным // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 134–140. doi: 10.17076/geo2245

Финансирование. Работа выполнена согласно плану научных исследований ИДГ РАН (№ 125012200561-3) и ГИН РАН (FMMG-2023-0007).

A. G. Goev[1]*, K. A. Dokukina[2]. THE UPPER MANTLE STRUCTURE OF THE KOLA REGION FROM NEW SEISMOLOGICAL DATA

[1] *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences (Leninsky Prospect, 38, Building 1, 119334, Moscow, Russia), *goev@idg.ras.ru*
[2] *Geological Institute of the Russian Academy of Sciences (Pyzhevsky Lane, 7, Bld. 1, 119017, Moscow, Russia)*

This paper presents the results of a study of the upper mantle in the Kola region, based on the analysis of broadband seismological data. The dataset includes seismograms from

both permanent seismic stations installed in the region and four new temporary recording sites. Using the network of 14 stations, we obtained shear-wave velocity models to depths of about 300 km using the receiver function method. The new models reveal a heterogeneous structure of the lithosphere in the study area, where a high-velocity layer rises toward the upper layers of the mantle and deforms the overlying mid-lithosphere discontinuity (MLD), characterized by lower velocities. This heterogeneous mantle structure appears to be the result of an interaction between the Archean lithosphere and a Paleoproterozoic mantle plume. Furthermore, the study shows that the crust-mantle transition in the region is represented by both a sharp Moho boundary and a gradient layer.

Keywords: Kola region; receiver functions; deep structure; upper mantle; Moho; mid-lithosphere discontinuity (MLD)

For citation: Goev A. G., Dokukina K. A. The upper mantle structure of the Kola region from new seismological data. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 134–140. doi: 10.17076/geo2245

Funding. The work was funded within the state-ordered research theme of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics RAS (project no. 125012200561-3) and the Geological Institute RAS (project no. FMMG-2023-0007).

Несмотря на то, что Кольский регион (северо-восточная часть Фенноскандинавского щита Восточно-Европейского кратона) активно исследовался сейсмическими методами и является одним из наиболее изученных в РФ, имеющиеся к настоящему моменту данные опираются преимущественно на результаты сейсмопрофилирования и практически не включают современные исследования пассивной сейсмологии [Sharov, Lebedev, 2022]. Для всего Кольско-Карельского региона известны только две локальные работы, выполненные на основе метода функций приемника [Dricker et al., 1996; Meshcheryakova et al., 2022]. Такая ситуация сложилась во многом из-за отсутствия в регионе развитой широкополосной площадной сейсмической сети.

Начиная с 2020 года, в регионе проводится эксперимент по созданию площадной регистрирующей системы за счет установки четырех новых сейсмостанций в промежутке между уже имеющимися в регионе станциями Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН на востоке и станциями международных агентств на западе (рис. 1). Обработка данных полученной таким образом сети позволяет охарактеризовать кинематические параметры литосферы этого важнейшего региона на современном уровне с применением актуальных пассивных методов, таких как метод функций приемника.

Кольско-Карельский палеоконтинент представляет собой мезо-неоархейский сегмент Восточно-Европейского кратона, который впоследствии был тектонически раздроблен и частично перекрыт палеопротерозойскими осадочно-вулканическими комплексами [Patchett et al., 1987; Bogdanova et al., 2005, 2008; Mints et al., 2015] и входит в состав Лапландско-Среднерусско-Южно-Балтийского орогена. Архейская кора изучаемой территории была подвергнута мощному воздействию в палеопротерозое с формированием Печенга-Имандра-Варзугского вулканогенно-осадочного пояса (палеорифта) и выдвижением покровов Лапландско-Кольского глубинного надвига на поздних стадиях развития орогена. Формирование линейных палеопротерозойских вулканогенно-осадочных поясов интерпретируется исследователями по-разному: (1) в рамках моделей эволюции субдукционно-коллизионного типа (см., например, [Berthelsen, Marker, 1986]) или (2) моделей внутриконтинентальной эволюции, связанной с импульсами мантийно-плюмовой активности и формированием рифтов [Melezhik et al., 2012; Mints et al., 2015]. Большинство исследователей палеопротерозойской истории Кольско-Карельского региона сходятся в том, что, начиная с раннего палеопротерозоя ~ 2,5 млрд лет и вплоть до 1,92 млрд лет, эта территория, а также смежные территории Карелии, Финляндии и Норвегии испытывали длительное прогибание и рифтогенез под воздействием поднятия мантийного суперплюма [Bogdanova et al., 2005; Sharkov, 2010; Mints et al., 2015]. Мощное и длительное влияние палеопротерозойского суперплюма под архейским континентом дает возможность обнаруживать его следы геологическими методами в коре и геофизическими методами в верхней мантии.

Одним из эффективных способов восстановления кинематических характеристик литосферы является метод функций приемника [Винник, 2019]. Он предполагает анализ обменных волн, возникающих на сейсмических границах в земной коре и верхней мантии

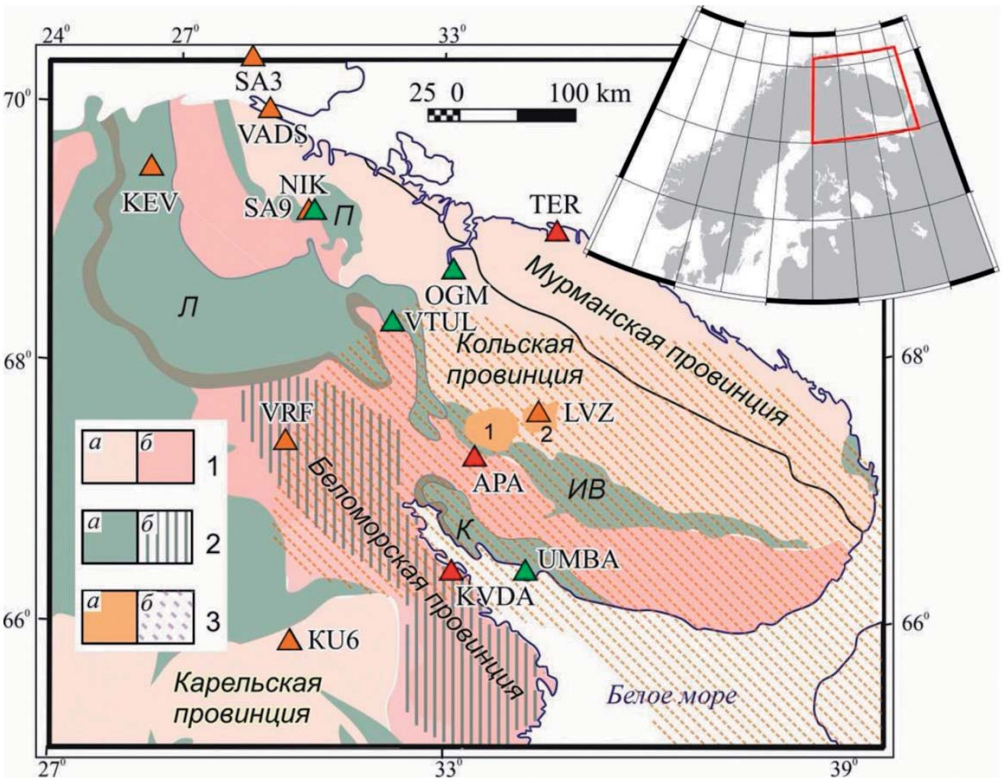


Рис. 1. Упрощенная тектоническая схема северной части Фенноскандинавского щита с указанием основных архейско-палеопротерозойских доменов (с использованием материалов [Mints et al., 2015; Балаганский, 2026]):

1. Архейские комплексы: а) без влияния палеопротерозойской тектоно-термальной переработки, б) переработанные в палеопротерозое. 2. Палеопротерозойские комплексы: а) вулканогенно-осадочные и гранулито-гнейсовые области; б) ареал развития малых ультрамафит-мафитовых интрузий; 3. Кольская палеозойская щелочная провинция: а) крупные массивы (1 – Хибины, 2 – Ловозерский), б) – небольшие интрузивные тела, дайки и кимберлитовые трубки (по: [Арзамасцев и др., 2001]). Буквенные обозначения: осадочно-вулканогенные пояса: П – Печенга, ИВ – Имандра-Варзуга; гранулито-гнейсовые пояса: Л – Лапландский, К – Колвицкий. Оранжевыми треугольниками показаны сейсмические станции международных служб; красными – Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН; зелеными – станции, установленные в рамках эксперимента по изучению Кольского региона

Fig. 1. Simplified schematic tectonic map of the northern part of the Fennoscandian Shield showing the main Archean–Paleoproterozoic domains (based on materials from [Mints et al., 2015; Balagansky, 2026]):

1. Archean complexes: a) unaffected by the Paleoproterozoic tectono-thermal events, б) changed during the Paleoproterozoic. 2. Paleoproterozoic complexes: a) volcanogenic-sedimentary and granulite-gneiss domains; б) area of occurrence of small ultramafic-mafic intrusions; 3. Kola Paleozoic alkaline province: a) large massifs (1 – Khibiny, 2 – Lovozero), б) small intrusive bodies, dikes, and kimberlite pipes (after [Arzamastsev et al., 2001]). Letter designations: sedimentary-volcanogenic belts: П – Pechenga, ИВ – Imandra-Varzuga; granulite-gneiss belts: Л – Lapland, К – Kolvitsky. The orange triangles indicate seismic stations of international services; red triangles – stations of the Kola Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS); green triangles – stations installed as part of the experiment for the Kola region study

в непосредственной близости от станции при прохождении через них P- и S волн от сильных (M > 5,5) землетрясений на телесейсмических расстояниях (35°–100°) по данным каждой из сейсмических станций. Восстановление глубинного строения проводится на основе совместной инверсии PRF (суммарной сейсмограммы обменных Ps волн) и SRF (обменные Sp волны) с применением алгоритма Левенберга-Марквардта для решения обратной задачи [Press et al., 2007]. Среда представляется 14 слоями, свободными параметрами в которых являются Vs, Vp/Vs и мощность каждого слоя. Подробно примененная методика инверсии описана в [Алешин, 2021]. Получаемый таким образом скоростной разрез характеризуется высокой чувствительностью к значениям глубин сейсмических границ и локализацией результатов в окрестности мест установки станций.

В результате применения метода функций приемника для каждой из станций широкополосной сейсмической сети были получены скоростные модели земной коры и верхней мантии до глубин около 300 км. По данным пяти сейсмостанций (KEV, VTUL, KVDA, UMBA, KU6), установленных в западной и северо-западной частях изученного региона, коро-мантийный переход имеет градиентное строение, представленное постепенным увеличением скоростей Vs (в интервале глубин 33–60 км). На остальных станциях граница Мохо резкая и фиксируется на глубинах от 35 до 44 км.

Сложное строение коро-мантийного перехода в северо-западной части региона ранее было выявлено также и по данным активных сейсмических экспериментов POLAR, HUKKA и FIRE-4 [Janik et al., 2009]. Совместный анализ отраженных и преломленных волн, а также данных вертикального отражения показал расхождение оценок глубин границы Мохо. Полученные значения варьируются от 40–24 до 47–50 км по разным группам данных. Таким образом, невязка значений составляет 5–8 км в отдельных частях профилей. Авторы связывают это расхождение с наличием нескольких сейсмических и петрофизических границ в нижней коре и верхней мантии. В центральной части профиля POLAR верхняя из этих границ интерпретируется как кровля крупного эклогитизированного тела, которое может быть сохранившимся корнем Лапландско-Кольского орогена, тогда как петрофизическая граница кора–мантия может располагаться существенно глубже. Эти выводы находятся в хорошем согласии с нашими оценками.

По полученным нами данным, мантия также имеет гетерогенное строение. Одни станции (APA, LVZ, NIK, VRF) фиксируют слой пониженных скоростей MLD (mid-lithosphere discontinuity [Thybo, Perchuc, 1997]) в диапазонах глубин 70–140 км. Другие станции (KEV, KU6, OGM, TER, VADS) демонстрируют его полное отсутствие или, как станция UMBA, понижение скорости на неожиданно больших глубинах ~210 км. Несколько станций (KVDA, SA3, VTUL) продемонстрировали две области понижения скоростей на глубинах 90–160 и 170–250 км.

Выявленные нами особенности строения верхней мантии северо-восточной части Фенноскандинавского щита находятся в хорошем согласии с ранее известными данными. Так, отрицательная граница, которая маркирует кровлю MLD, была ранее обнаружена на глубине около 100 км по данным сверхдлинных профилей глубинного сейсмического зондирования как в западной части региона (по профилю «Fennolora» [Thybo, Perchuc, 1997]), так и на Кольском п-ове (по профилю «Кварц» [Morozova et al., 1999]). Кроме того, слой пониженных скоростей на глубинах около 100–150 км был выявлен в Северной Финляндии по данным сейсмической томографии [Silvennoinen et al., 2016]. Обнаружение этого слоя тремя различными методами по разным типам сейсмических волн свидетельствует о надежности полученного результата. Кроме того, это свидетельствует в пользу вещественной природы выявленного слоя MLD, а не азимутальной и/или радиальной анизотропией, вызванной изменением ориентации больших объемов оливина.

Для визуализации полученных нами оценок структуры литосферы был выбран условный интервал скоростей Vs в диапазоне 4,60–4,65 км/с (такие скорости отвечают приблизительно средним значениям по полученным моделям) и построены эмпирические профили через отдельные станции (рис. 2). На профилях и картах хорошо видно, как относительно низкоскоростные и высокоскоростные слои чередуются и перемешиваются друг с другом. Высокоскоростной слой в районе станций VTUL и VRF поднимается практически на уровень границы Мохо, нарушая непрерывность слоя MLD. На уровне ~ 175 км высокоскоростной слой испытывает расширение и занимает практически все пространство изучаемой территории, тогда как ниже на глубинах ~ 200 км опять появляются фрагменты относительно низкоскоростного слоя. Согласно полученным новым моделям, выявляется структура, где высокоскоростной слой поднимается к верхним слоям мантии и разрывает, деформирует и «притапливает» вышележащий низкоскоростной слой. Такая структура похожа на эволюционные модели взаимодействия литосферы кратона и плюмового процесса, представленные в работах [Shi et al., 2021; Lavecchia et al., 2025].

Выявленное сложное гетерогенное строение литосферы, вероятно, является следами взаимодействия архейской литосферы и мантийного палеопротерозойского плюма. Палеопротерозойский возраст и состав нижней коры и верхней мантии фиксируются нижнекоровыми и мантийными ксенолитами палеопротерозойского возраста в девонских трубках и дайках по берегам и островам Кандалакшского залива Белого моря [Vetrin et al., 2006]. В тех же дайках и трубках изучены ксенолиты метасоматизированной мантии (шпинелевые лерцолиты и верлиты), характеризующие фертильные составы мантии [Beard et al., 2007]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в современной

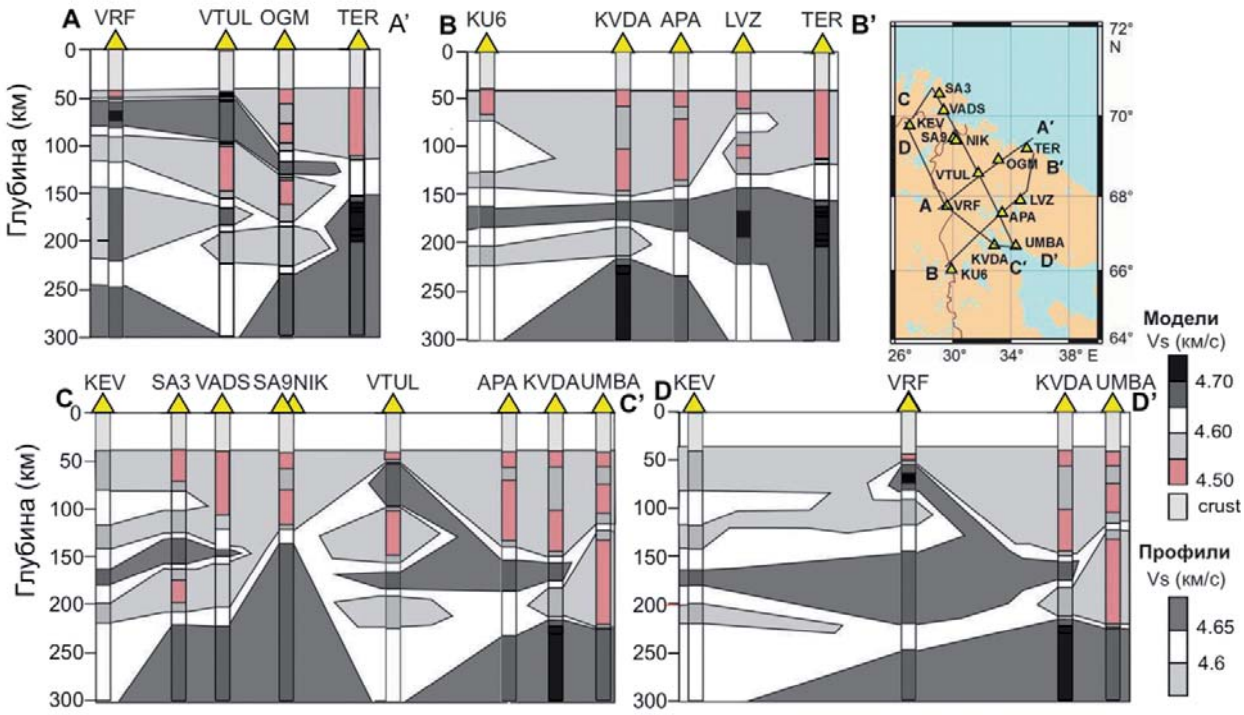


Рис. 2. Одномерные скоростные графические модели, полученные методом функций приемника для каждой станции, и двумерные эмпирические профили. На карте показано положение сейсмических станций (треугольники) и линии профилей

Fig. 2. One-dimensional velocity models obtained using the receiver function method for each station, and two-dimensional empirical profiles. The map shows the locations of the seismic stations (triangles) and the profile lines

структуре верхней мантии древних кратонов могут сохраняться следы тектонических процессов ранних этапов их формирования и эти особенности могут быть выявлены геофизическими методами. Развитие такого рода исследований на других кратонах, вероятно, позволит выявить новые детали докембрийской эволюции Земли.

Литература

Алешин И. М. Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496, № 1. С. 63–66.

Арзамасцев А. А., Беа Ф., Глазнев В. Н., Арзамасцева Л. В., Монтеро П. Кольская щелочная провинция в палеозое: оценка состава первичных мантийных расплавов и условий магмогенерации // Российский журнал наук о Земле. 2001. Т. 3, № 1. С. 1–32.

Балаганский В. В. Ранний докембрий Кольского региона (северо-восток Фенноскандинавского щита) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 45–72. doi: 10.17076/geo2258

Винник Л. П. Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27. doi: 10.31857/S0002333720191162–27

Beard A. D., Downes H., Mason P. R. D., Vetrin V. R. Depletion and enrichment processes in the lithospheric mantle beneath the Kola Peninsula (Russia): evidence from spinel lherzolite and wehrlite xenoliths // Lithos. 2007. Vol. 94, no. 1–4. P. 1–24. doi: 10.1016/j.lithos.2006.02.002.

Berthelsen A., Marker M. Tectonics of the Kola collision suture and adjacent Archean and Early Proterozoic terrains in the northeastern region of the Baltic Shield. Part 1 // Tectonophysics. 1986. Vol. 126. P. 31–55.

Bogdanova S. V., Bingen B., Gorbatschev R., Kheraskova T. N., Kozlov V. I., Puchkov V. N., Volozh Yu. A. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precambrian Research. 2008. Vol. 160. P. 23–45. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.024

Bogdanova S. V., Gorbatschev R., Garetsky R. G. Europe/East European Craton // Encyclopedia of Geology. Vol. 2 / Eds. R. C. Selley, L. R. M. Cocks, I. R. Plimer. Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 34–49.

Dricker I. G., Roecker S. W., Kosarev G. L., Vinnik L. P. Shear-wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the Kola Peninsula // Geophysical Research Letters. 1996. Vol. 23, no. 23. P. 3389–3392.

Janik T., Kozlovskaya E., Heikkinen P., Yliniemi J., Silvennoinen H. Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian Shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. B06308. doi: 10.1029/2008JB005689

Lavecchia A., Kovács I., Koptev A., Cloetingh S. Plume-lithosphere interaction and the role of the mid-lithospheric discontinuity in craton delamination // Geophysical Research Letters. 2025. Vol. 52. Article e2025GL116938. doi: 10.1029/2025GL116938

Meshcheryakova A.A., Slabunov A.I., Vaganova N.V., Rychanchik M.D. Architecture of the subcontinental lithospheric mantle of the Archean segment of the Fennoscandian Shield: analysis of seismic data // Tectonophysics. 2022. Vol. 841. Article 229541. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229541

Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.N., Philippova I.B., Zlobin V.L., Babayants P.S., Belousova E.A., Blokh Y.I., Bogina M.M., Bush W.A., Dokukin P.A., Kaulina T.V., Natapov L.M., Piip V.B., Stupak V.M., Suleimanov A.K., Trusov A.A., Van K.V., Zamozhniaya N.G. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2015. 433 p. (Geological Society of America Special Paper; Vol. 510). doi: 10.1130/2015.2510

Morozova E.A., Morozov I.B., Smithson S.B., Solodilov L.N. Heterogeneity of the uppermost mantle beneath Russian Eurasia from the ultralong-range profile "Quartz" // Journal of Geophysical Research. 1999. Vol. 104, no. B9. P. 20329–20348.

Patchett P.J., Todt W., Gorbatschev R. Origin of continental crust of 1.9–1.7 Ga age: Nd isotopes in the Svecofennian orogenic terrains of Sweden // Precambrian Research. 1987. Vol. 35. P. 145–160. doi: 10.1016/0301-9268(87)90050-7

Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical recipes: the art of scientific computing. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007.

Reading the archive of Earth's oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project / Eds. V.A. Melezhik, A.R. Prave, A.E. Fallick, A. Lepland, L.R. Kump, H. Strauss. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 490 p.

Sharkov E.V. Middle-Proterozoic anorthosite-rapakivi granite complexes: An example of within-plate magmatism in abnormally thick crust: Evidence from the East European Craton // Precambrian Research. 2010. Vol. 183. P. 689–700. doi: 10.1016/j.precamres.2010.08.008

Sharov N.V., Lebedev A.A. Heterogeneous lithospheric structure of the Fennoscandian Shield: seismic data // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. Vol. 13, no. 1. Article 0569. doi: 10.5800/GT-2022-13-1-0569

Shi Y.-N., Li Z.-H., Chen L., Morgan J.P. Connection between a subcontinental plume and the mid-lithospheric discontinuity leads to fast and intense craton lithospheric thinning // Tectonics. 2021. Vol. 40. Article e2021TC006711. doi: 10.1029/2021TC006711

Silvennoinen H., Kozlovskaya E., Kissling E. POLENET/LAPNET teleseismic P wave travel time tomography model of the upper mantle beneath northern Fennoscandia // Solid Earth. 2016. Vol. 7, no. 2. P. 425–439. doi: 10.5194/se-7-425-2016

Thybo H., Perchuć E. The seismic 8° discontinuity and partial melting in continental mantle // Science. 1997. Vol. 275. P. 1626–1629. doi: 10.1126/science.275.5306.1626

Vetrin V.R. Composition and structure of the lower crust of the Belomorian Mobile Belt, Baltic Shield // Petrology. 2006. Vol. 14, no. 4. P. 390–412. doi: 10.1134/S0869591106040047

References

Aleshin I.M. Solving the seismic inverse problem using an ensemble of models: a case study of inversion of receiver functions. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk = Doklady Earth Sciences.* 2021;496(1):60–62. (In Russ.). doi: 10.1134/S1028334X21010049

Arzamastsev A.A., Bea F., Glaznev V.N., Arzamastseva L.V., Montero P. Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions. *Rossiiskii zhurnal nauk o Zemle = Russian Journal of Earth Sciences.* 2001;3(1):1–32. (In Russ.). doi: 10.2205/2001ES000054

Balagansky V.V. Early Precambrian in the Kola region (northeastern Fennoscandian Shield). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026;2:45–72. (In Russ.). doi: 10.17076/geo2258

Beard A.D., Downes H., Mason P.R.D., Vetrin V.R. Depletion and enrichment processes in the lithospheric mantle beneath the Kola Peninsula (Russia): evidence from spinel lherzolite and wehrlite xenoliths. *Lithos*. 2007;94(1–4):1–24. doi: 10.1016/j.lithos.2006.02.002

Berthelsen A., Marker M. Tectonics of the Kola collision suture and adjacent Archean and Early Proterozoic terrains in the northeastern region of the Baltic Shield. Part 1. *Tectonophysics.* 1986;126:31–55.

Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatschev R., Kheraskova T.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Yu. A. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*. 2008;160:23–45. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.024

Bogdanova S.V., Gorbatschev R., Garetsky R.G. Europe/East European Craton. Encyclopedia of Geology. Vol. 2. Amsterdam: Elsevier; 2005. P. 34–49.

Dricker I.G., Roecker S.W., Kosarev G.L., Vinnik L.P. Shear-wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the Kola Peninsula. *Geophysical Research Letters*. 1996;23(23):3389–3392.

Janik T., Kozlovskaya E., Heikkinen P., Yliniemi J., Silvennoinen H. Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian Shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect. *J. Geophys. Res.* 2009;114:B06308. doi:10.1029/2008JB005689

Lavecchia A., Kovács I., Koptev A., Cloetingh S. Plume-lithosphere interaction and the role of the mid-lithospheric discontinuity in craton delamination. *Geophysical Research Letters.* 2025;52:e2025GL116938. doi: 10.1029/2025GL116938

Melezhik V.A., Prave A.R., Fallick A.E., Lepland A., Kump L.R., Strauss H. (eds.). Reading the archive of Earth's oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as context for the Fennoscandian Arctic

Russia – Drilling Early Earth Project. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; 2012. 490 p.

Meshcheryakova A. A., Slabunov A. I., Vaganova N. V., Rychanchik M. D. Architecture of the subcontinental lithospheric mantle of the Archean segment of the Fennoscandian Shield: analysis of seismic data. *Tectonophysics*. 2022;841:229541. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229541

Mints M. V., Dokukina K. A., Konilov A. N., Philippova I. B., Zlobin V. L., Babayants P. S., Belousova E. A., Blokh Y. I., Bogina M. M., Bush W. A., Dokukin P. A., Kaulina T. V., Natapov L. M., Piip V. B., Stupak V. M., Suleimanov A. K., Trusov A. A., Van K. V., Zamozhniaya N. G. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2015. 433 p. (Geological Society of America Special Paper; Vol. 510). doi: 10.1130/2015.2510

Morozova E. A., Morozov I. B., Smithson S. B., Solodilov L. N. Heterogeneity of the uppermost mantle beneath Russian Eurasia from the ultralong-range profile "Quartz". *Journal of Geophysical Research*. 1999;104 (B9):20329–20348.

Patchett P. J., Todt W., Gorbatschev R. Origin of continental crust of 1.9–1.7 Ga age: Nd isotopes in the Svecofennian orogenic terrains of Sweden. *Precambrian Research*. 1987;35:145–160. doi: 10.1016/0301-9268(87)90050-7

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes: the art of scientific computing. 3rd ed. New York: Cambridge University Press; 2007.

Sharkov E. V. Middle-Proterozoic anorthosite-rapakivi granite complexes: An example of within-plate magmatism in abnormally thick crust: Evidence from the East European Craton. *Precambrian Research*. 2010;183:689–700. doi: 10.1016/j.precamres.2010.08.008

Sharov N. V., Lebedev A. A. Heterogeneous lithospheric structure of the Fennoscandian Shield: seismic data. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022;13 (1):0569. doi: 10.5800/GT-2022-13-1-0569

Shi Y.-N., Li Z.-H., Chen L., Morgan J. P. Connection between a subcontinental plume and the mid-lithospheric discontinuity leads to fast and intense craton lithospheric thinning. *Tectonics.* 2021;40: e2021TC006711. doi: 10.1029/2021TC006711

Silvennoinen H., Kozlovskaya E., Kissling E. POLENET/LAPNET teleseismic P wave travel time tomography model of the upper mantle beneath northern Fennoscandia. *Solid Earth*. 2016;7(2):425–439. doi: 10.5194/se-7-425-2016

Thybo H., Perchuć E. The seismic 8° discontinuity and partial melting in continental mantle. *Science.* 1997;275:1626–1629. doi: 10.1126/science.275.5306.1626

Vetrin V. R. Composition and structure of the lower crust of the Belomorian Mobile Belt, Baltic Shield. *Petrology.* 2006;14(4):390–412. doi: 10.1134/S0869591106040047

Vinnik L. P. Receiver function seismology. *Fizika Zemli = Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019;55(1):12–21. doi: 10.1134/S1069351319010130

Поступила в редакцию / received: 28.10.2025; принята к публикации / accepted: 09.09.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Гоев Андрей Георгиевич
канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: goev@idg.ras.ru

Докукина Ксения Александровна
канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: ksdokukina@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Goev, Andrey
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher

Dokukina, Ksenia
Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 141–149
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 141–149
DOI: 10.17076/geo2155

УДК 552.312+552.5

ПОЛИСТАДИЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАФИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ И ШУНГИТОВЫХ ПОРОД В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОМ ОНЕЖСКОМ БАССЕЙНЕ

А. В. Степанова, В. В. Устинова*, С. Ю. Чаженгина

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)
**vikaystinova@yandex.ru*

Изучение минерального состава силлов долеритов в Онежском палеобассейне, а также характера распределения аморфного углеродистого вещества внутри интрузий позволило выявить несколько ключевых особенностей процессов контактового взаимодействия расплавов основного состава с вмещающими углеродсодержащими осадочными породами заонежской свиты людиковия. Внедрение расплавов основного состава сопровождалось флюидизацией осадочных пород с образованием газо- и нефтенасыщенных флюидов и ассимиляцией расплавами углеродистого вещества, о чем свидетельствуют пеперит-структуры в кровельных частях силлов, образование столбчатой отдельности в шунгитовых породах, вмещающих силлы, формирование углеродсодержащих миндалин в зонах закалки и накопление углеродистого вещества в интерстициях в долеритах центральных частей тел. Силлы долеритов оказывают двойственное влияние на миграцию газо- и нефтенасыщенных флюидов, выступая в качестве триггера нефтеобразования, а также барьеров или путей миграции нефтей.

Полученные данные предполагают, что внедрение силлов умеренно-магнезиальных долеритов раннего этапа (тип Лебещина), характеризующихся малыми глубинами становления и контактами пеперит-типа могло являться одним из ключевых факторов нефтегазообразования в Онежском палеобассейне. Характер контактового взаимодействия силлов Fe-Ti долеритов, формирование которых происходило в интервале возрастов 2,00–1,96 млрд лет, с вмещающими углеродсодержащими породами позволяет предполагать внедрение расплавов основного состава в разной степени консолидированные осадочные комплексы, нефтеносные горизонты в которых еще не были литифицированы. Для относительно более ранних силлов Fe-Ti долеритов (тип Шуньга) фиксируется обогащение остаточных расплавов флюидом и осаждение УВ в интерстициях и включениях в минералах. Для второй группы силлов Fe-Ti долеритов (тип Максово) характерно формирование столбчатой отдельности в зоне экзоконтакта во вмещающих шунгитовых породах, наличие углеродистого вещества в миндалинах и основной массе пород зоны закалки.

Ключевые слова: силлы долеритов; углеродсодержащие осадочные породы; палеопротерозой; Онежский бассейн

Для цитирования: Степанова А.В., Устинова В.В., Чаженгина С.Ю. Полистадийное взаимодействие мафических расплавов и шунгитовых пород в палеопротерозойском Онежском бассейне // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 141–149. doi: 10.17076/geo2155

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ КарНЦ РАН FMEN-2023-0009.

A. V. Stepanova, V. V. Ustinova*, S. Y. Chazhengina. POLYSTADIAL INTERACTION OF MAFIC MELTS AND SHUNGITE ROCKS IN THE PALEOPROTEROZOIC ONEGA BASIN

*Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *vikaystinova@yandex.ru*

A study of the mineral composition of dolerite sills in the Onega Basin, along with the distribution patterns of amorphous carbonaceous matter within these intrusions, has revealed several key features of interactions at the interface between mafic melts and carbon-bearing host sedimentary rocks of the Ludicovian Zaonega Formation. The emplacement of mafic melts was accompanied by fluidization of sedimentary rocks, causing the generation of gas- and oil-saturated fluids, and assimilation of the carbonaceous matter by the melts. This is evidenced by peperites in the roof zones of the sills, the development of columnar jointing in the host shungite rocks, formation of carbon-bearing amygdales within quenched margins, and the accumulation of carbonaceous matter in the interstices of dolerites in the central parts of the bodies. Dolerite sills exert a dual effect on the migration of gas- and oil-saturated fluids, acting as a trigger for petroleum generation and as barriers or pathways for hydrocarbon migration. The data suggest that the emplacement of early-stage, medium-Mg dolerite sills (Lebeshchina type), characterized by shallow depths of crystallyzation and peperite-type contacts, could be considered as one of the key factors driving oil and gas generation in the Onega Basin. The nature of the contact-zone interaction between the Fe-Ti dolerite sills formed within the 2.00–1.96 Ga age interval and the host carbon-bearing rocks suggest that mafic melts could be emplaced into sedimentary sequences at varying stages of consolidation, where the oil-bearing horizons had not yet undergone lithification. The older Fe-Ti dolerite sills (Shunga type) experienced fluid enrichment of residual melts, accompanied by the precipitation of carbonaceous matter within interstices and as mineral inclusions. In contrast, the second group of Fe-Ti dolerite sills (Maksovo type) is characterized by the formation of columnar jointing within the exogenous contact zone of the host shungite rocks, as well as the presence of carbonaceous matter within amygdales and the groundmass of the quenched margin rocks.

Keywords: dolerite sills; carbon-bearing sedimentary rocks; Paleoproterozoic; Onega Basin

For citation: Stepanova A.V., Ustinova V.V., Chazhengina S.Y. Polystadial interaction of mafic melts and shungite rocks in the Paleoproterozoic Onega Basin . *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 10. P. 141–149. doi: 10.17076/geo2155

Funding. This work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation [FMEN-2023-0009].

Многочисленные исследования современных нефтегазоносных систем [Schofield et al., 2015; Mangione et al., 2023; Palma et al., 2024] показали, что мафические интрузии могут оказывать двойственное влияние на углеродсодержащие осадочные породы. С одной стороны, они могут способствовать созреванию нефтематеринских пород, генерации углеводородов и формированию путей их миграции, как, например, в осадочном бассейне Неукен (Аргентина) [Rabbel et al., 2023; Palma et al., 2024]. С другой стороны, внедрение интрузий может привести к снижению пористости и проницаемости осадочных пород и, соответственно, к снижению нефтегазоносного потенциала бассейна, как например, в осадочном бассейне

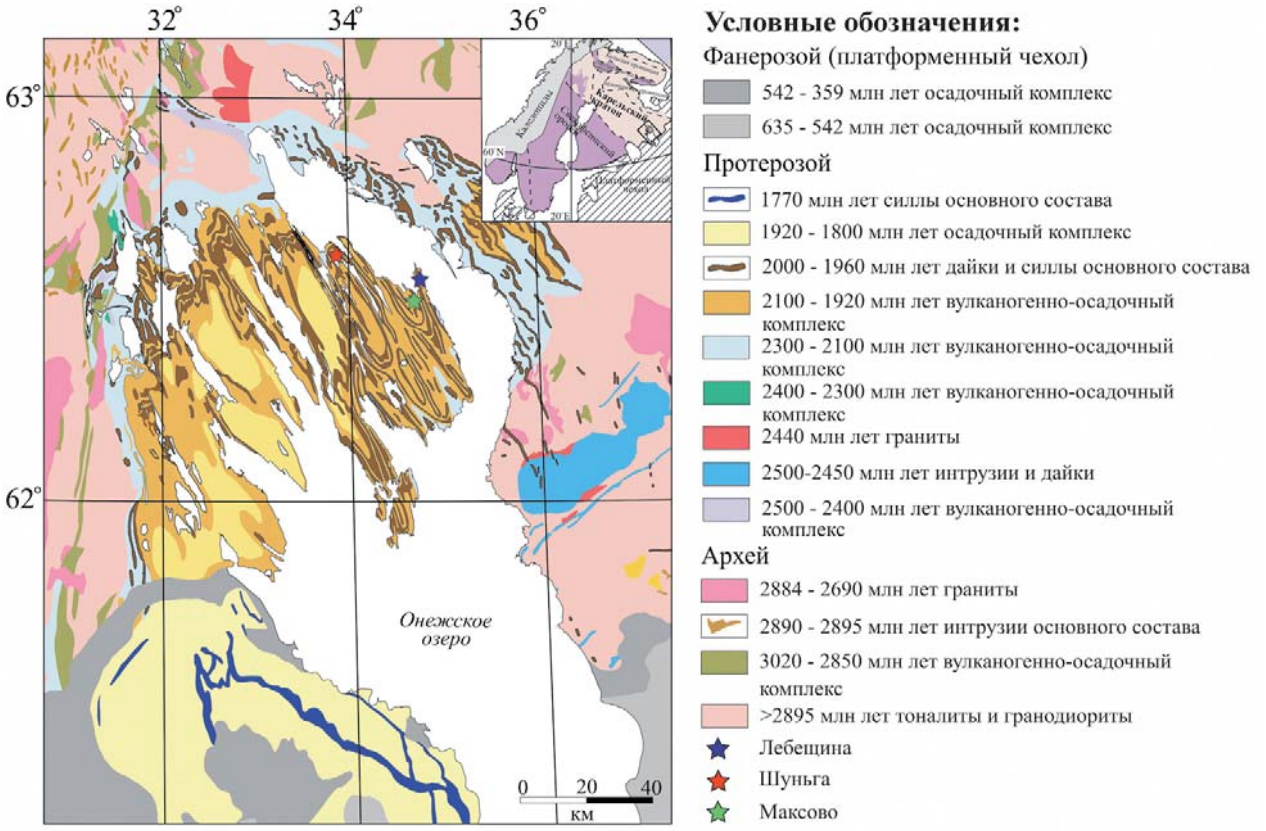


Рис. 1. Схема геологического строения Онежского бассейна [по: Куликов и др., 2017, с изменениями] и положение ключевых участков

Fig. 1. Schematic geological map of the Onega Basin [modified after Kulikov et al., 2017]

Фарерских и Шетландских островов [Schofield et al., 2015; Mangione et al., 2023]. Помимо этого, богатые углеродистым веществом осадочные породы также могут оказывать влияние на магматические расплавы. Ассимиляция магматическим расплавом органических соединений может привести к увеличению количества газовой фазы и изменению химического состава самой магмы [Iacono-Marziano et al., 2017].

Исследования воздействия интрузий на древние нефтегазоносные системы немногочисленны, что связано с тем, что, в отличие от современных осадочных бассейнов, докембрийские нефтегазоносные системы, как правило, претерпели значительные изменения, вследствие более поздних наложенных процессов, из-за чего первичные взаимоотношения между осадочными и магматическими породами оказались нарушенными. Среди докембрийских осадочных бассейнов, содержащих значительный объем высокоуглеродистых пород, одним из наиболее известных является палеопротерозойский Онежский бассейн (рис. 1), расположенный в восточной части Фенноскандинавского щита [Онежская..., 2011]. Углеродсодержащие осадочные породы Онежского бассейна, известные как шунгитовые, хорошо изучены [Филиппов, 2002; Melezhik et al., 2013], имеют возраст ~ 2,05 млрд лет [Hannah et al., 2008] и рассматриваются в составе заонежской свиты людиковия, породы которой представлены углеродсодержащими песчаниками, алевролитами и доломитами с содержанием углерода от 10 до 70 % [Онежская..., 2011]. Углерод в шунгитовых породах (ШП) представлен аморфным углеродистым веществом (УВ) и имеет биогенное происхождение [Melezhik et al., 2009]. Осадочные породы заонежской свиты Онежского бассейна, в том числе углеродсодержащие, вмещают субсогласные тела силлов Fe-Ti долеритов, которые свидетельствуют о широком проявлении основного магматизма на рубеже 2,0–1,96 млрд лет назад [Stepanova et al., 2023; Устинова и др., 2026]. Силлы умеренно-магнезиальных долеритов не датированы. Данная работа посвящена анализу контактового взаимодействия расплавов основного состава, формировавших силлы долеритов, с углеродсодержащими осадочными породами

и основана на результатах изучения особенностей строения и состава силлов долеритов, а также морфологии и распределения углеродистого вещества в контактовых зонах.

В ходе исследования были изучены силлы на Заонежском п-ове – на месторождениях Максово и Шуньга, а также на участке Лебещина. По химическому составу среди пород силлов выделяется два типа – умеренно-магнезиальные и высокожелезистые высокотитанистые долериты. Породы силлов относятся к толеитовой серии нормального ряда щелочности, но отличаются по ряду геохимических характеристик. Первый тип характеризуется умеренным содержанием MgO, TiO_2, Cr и Ni [Устинова, Степанова, 2025], второй отличается повышенными концентрациями Fe, Ti, обогащением Rb, Ba и легкими РЗЭ [Chazhengina et al., 2026]. Долериты силлов метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации, что типично для Онежской структуры [Спиридонов и др., 2017], и практически утратили первичные магматические минералы, однако, сохранили первичные структуры и не имеют признаков тектонической переработки.

На контакте силлов и углеродсодержащих осадочных пород Онежского бассейна установлены специфические структуры, а именно, пеперит-структуры, столбчатая отдельность в ШП и заполнение трещин остывания в долеритах УВ, свидетельствующие о внедрении расплава в нелитифицированные осадочные породы. Термическое воздействие расплавов на неконсолидированные осадки вызывает интенсивную флюидизацию, обусловленную как термической дегидратацией, так и термическим разложением органического вещества с образованием газообразных и жидких углеводородов. Признаки интенсивной флюидизации в виде глобулярных структур, пустот и прожилков, заполненных миграционным углеродистым веществом и вторичными минералами, установлены и в ШП, и в долеритах в контактовых зонах, включая и породы со столбчатой отдельностью.

Пепериты – контакты базитов и углеродсодержащих пород, характеризующиеся признаками механического смешения двух контрастных сред по типу минглинга и обусловленные внедрением расплавов основного состава в неконсолидированные водосодержащие осадки [Skilling et al., 2002], впервые установлены на участке Лебещина в верхнем контакте силла долеритов и шунгитовых пород [Бискэ и др., 2004; Полещук, 2007]. На участке Лебещина пепериты представляют собой ШП с фрагментами долеритов разного размера, от 10 до 60 см, и разной формы, от неправильной до почти сферической (рис. 2, а). Фрагменты пород силла в пеперит-структурах представлены тонкозернистыми закаленными долеритами порфировидной структуры. Вкрапленники плагиоклаза размером от 1 до 3 см замещены альбитом и «кородированы» сплошными массами хлорита, а основная масса интерсертальной структуры сложена многочисленными лейстами альбита, тонкочешуйчатыми агрегатами хлорита, ксеноморфными зернами титанита. В закаленных долеритах УВ не установлено, но заполняет трещины между фрагментами долеритов, варьирующие по мощности от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Долериты центральных частей тела не содержат углеродистого вещества. Шунгитовые породы часто трещиноватые, с трещинами, заполненными кварцем и миграционным УВ, а также содержат неправильной и округлой формы обособления, сложенные закаленными тонкозернистыми базитами – «капли» застывшего расплава (рис. 2, б, в). Форма и распределение фрагментов долеритов в пеперитах свидетельствует о том, что в процессе внедрения магмы взаимодействовали с водонасыщенными осадками, в результате чего в зоне контакта происходила флюидизация осадков, вязкопластическая фрагментация расплава с последующим формированием трещин остывания и заполнением их ремобилизованным углеродистым веществом. Анализ текстурных и микроструктурных характеристик долеритов в зоне развития пеперитов показывает, что кристаллизация расплавов происходила в поле стабильности плагиоклаза на малых глубинах. Наличие в породах центральных частей тел пойкилоофитовых структур свидетельствует в пользу быстрой смены ликвидусных фаз и кристаллизации клинопироксена, что могло быть обусловлено повышением активности воды в системе. Альбитизация пород зон закалки и резкий рост содержаний Na_2O в породах зоны закалки и фрагментах базитов в пеперитах также свидетельствует в пользу внедрения расплавов в обводненные осадки. По составу долериты с контактами пеперит-типа относятся к умеренно-магнезиальному типу и формировались в Онежской структуре на этапе растяжения [Устинова, Степанова, 2025].

Пепериты установлены также на контакте ШП с силлом Fe-Ti долеритов на месторождении Максово, но масштаб их проявления значительно меньше, чем на участке Лебещина, а метасоматические изменения носят другой характер с повышением содержаний K_2O в долеритах [Chazhengina et al., 2024].

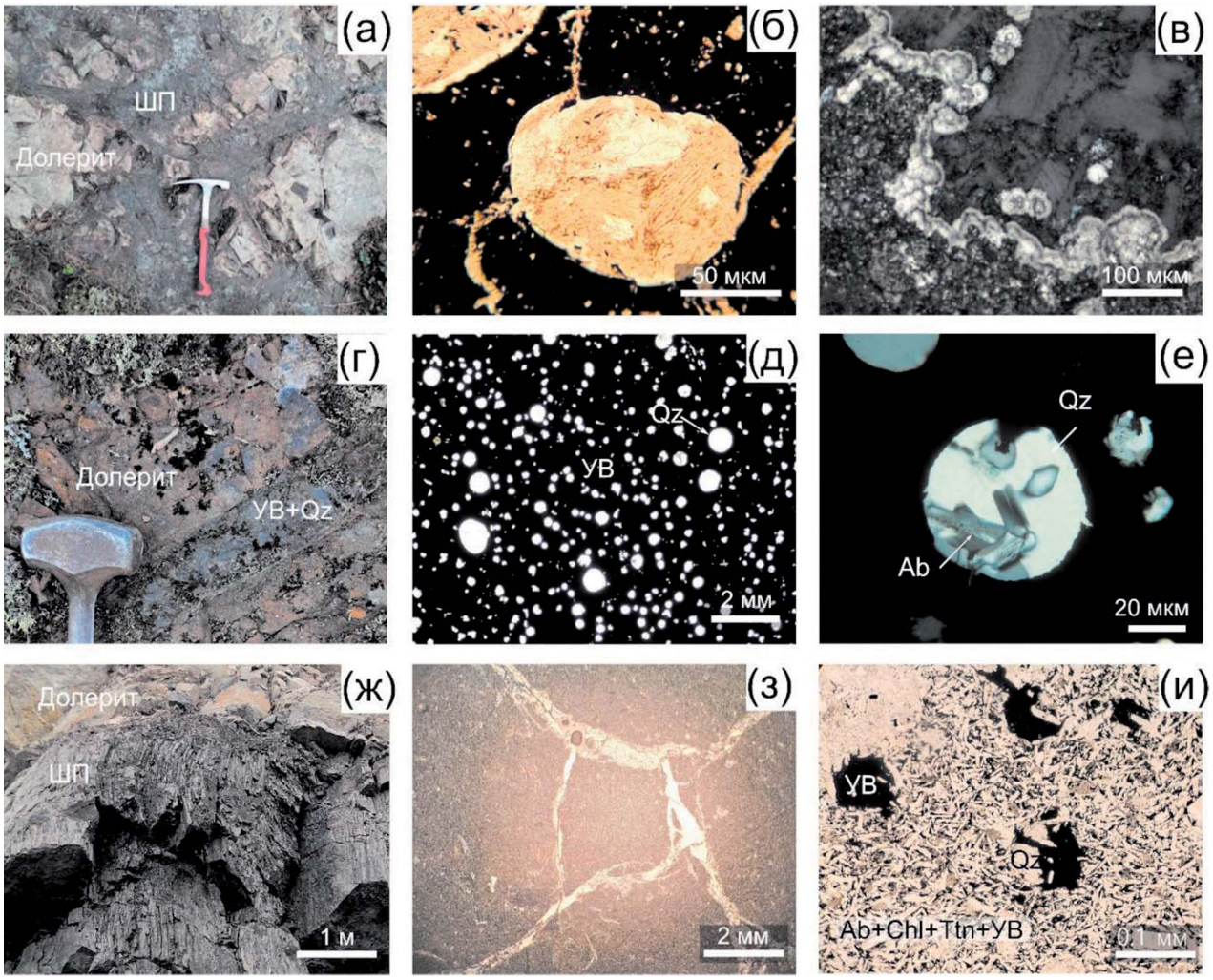


Рис. 2. Характер контактового взаимодействия силлов долеритов и шунгитовых пород в породах Онежской структуры. Пепериты, участок Лебещина: (а) – фотография обнажения; (б) – «капля» застывшего расплава в шунгитовой породе; (в) – фрагмент долерита в шунгитовой породе с миграционным УВ на контакте. Трещины остывания в долеритах: (г) – фотография обнажения; (д) и (е) – глобулярные структуры, участок Лебещина; Столбчатая отдельность, месторождение Максово: (ж) фотография обнажения; фотографии шлифов шунгитовой породы (з) и долеритов (и) из зоны контакта; (в, д, з, и – изображения в проходящем свете; б, е – в отраженном). Аббревиатура: Ab – альбит; Qz – кварц; ШП – шунгитовая порода; УВ – углеродистое вещество

Fig. 2. The contact interaction of dolerites with host sedimentary rocks in the Onega structure. Peperites, Lebeshchina area: (а) – field photograph; (б) – “droplet” of solidified melt in shungite rock; (в) – dolerite fragment in shungite rock with migrated carbonaceous matter at the contact. Cooling fractures in dolerites: (г) – field photograph; (д) and (е) – globular structures, Lebeshchina area; Columnar jointing, Maksovo deposit: (ж) field photograph; microphotographs of thin sections of shungite rock (з) and dolerites (и) from the contact zone; (в, д, з, и – transmitted-light images; б, е – reflected-light images). Abbreviations: Ab – albite; Qz – quartz; ШП – shungite rock; УВ – carbonaceous matter

Другой тип контактового взаимодействия, установленный в Онежской структуре, фиксируется по трещинам остывания в приконтактовой зоне силлов долеритов, заполненных миграционным УВ и кварцем (рис. 2, г, д, е). Контакты такого типа установлены в силлах Fe-Ti долеритов на участках Лебещина и Шуньга [Chazhengina et al., 2026]. Долериты вблизи жильных тел высокоуглеродистых пород не содержат УВ, однако, в жилах наблюдаются угловатые фрагменты долеритов, в которых УВ установлено в интерстициях в ассоциации с хлоритом и в виде включений в альбите и кварце. В р-не месторождения Шуньга трещины остывания мощностью 3–5 см, заполненные кварцем и углеродистым веществом, были установлены в кровле Загорского силла. Они имеют структуру, аналогичную

жилам с кварцевыми глобулами в углеродистой основной массе жил, секущих Fe-Ti долериты в р-не Лебещины, но глобулы имеют меньший размер. Трещины остывания, заполненные углеродистым веществом, представляют собой пути миграции газо- и нефтенасыщенного флюида, образовавшегося в результате теплового воздействия силла на углеродсодержащие осадки. Длительное остывание флюида в трещинах, вероятно, приводит к фазовому разделению с образованием двух несмесимых флюидов: обогащенного кремнеземом и обогащенного углеродистым веществом, о чем свидетельствуют четкие границы глобул и их коалесценция. Последующее остывание двух несмешивающихся жидкостей приводит к образованию кварцевых глобул, рассеянных в углеродистом веществе. Ассимиляция расплавами, формировавшими силлы Fe-Ti долеритов, углеродистого вещества из вмещающих осадочных комплексов может обеспечить поступление газо- и нефтенасыщенного флюида в магматическую камеру и, при условии умеренных глубин становления, его растворение в расплаве. Кристаллизация расплава и остывание системы приводят к накоплению флюида в остаточных расплавах и осаждению углерода в интерстициях, как это показано в работе для Загорского силла в р-не месторождения Шуньга [Chazhengina et al., 2026].

Столбчатая отдельность, характерным признаком которой является угол между трещинами, близкий к 120°, установлена в ШП на контакте с силлом Fe-Ti долеритов в карьере Максово [Chazhengina et al., 2024]. Силл мощностью около 15 м имеет форму блюдца и залегает субгоризонтально в крупном линзовидном теле ШП Максовской залежи. В центре силла долериты варьируют от мелко- до среднезернистых и сохраняют офитовую структуру, но первичный клинопироксен замещен хлоритом и биотитом, а плагиоклаз полностью альбитизирован. Столбчатая отдельность, перпендикулярная контакту, имеет ореол распространения 1–10 м, длина столбиков, в зависимости от типа контакта, варьирует от 0,5 до 7 м (рис. 2, ж). Непосредственно на контакте наблюдаются пепериты или массивные шунгитовые породы с линзами и прожилками, заполненными кварцем и миграционным УВ, а также обогащенные пиритом. По мере удаления от контакта установлены ШП со столбчатой отдельностью, в которых столбики представлены массивными ШП, состоящими из кварца, реже серицита, рассеянных в углеродистой основной массе. Трещины между столбиками имеют резкие границы и заполнены кварцем и миграционным углеродом (рис. 2, з). ШП со столбчатой отдельностью переходят в шунгитовую брекчию, характерную для месторождения Максово и состоящую из фрагментов ШП, сцементированных кварцем и миграционным углеродом. Механизм образования столбчатой отдельности в ШП связан с интенсивной флюидизацией осадочных пород. Миграция и циркуляция газо- и нефтенасыщенного флюида приводит к уменьшению объема и сжатию шунгитовых пород с образованием столбчатой отдельности. Столбчатая отдельность в ШП на контакте с силлами долеритов отмечается также и на участке Лебещина, но состав долеритов в зоне развития столбчатых структур не рассматривался [Бискэ и др., 2004; Полещук, 2007].

В долеритах признаки флюидного обогащения наблюдаются на контакте с ШП. В кровле силла в карьере Максово в зоне эндоконтакта долериты имеют миндалекаменную структуру и содержат миндалины, заполненные миграционным УВ (рис. 2, и). УВ установлено также в основной массе долеритов зоны закалки. По мере продвижения к центру тела содержание УВ в долеритах падает до его полного исчезновения в 1,5–2 м от контакта [Chazhengina et al., 2024].

Разные типы контактового взаимодействия силлов долеритов и шунгитовых пород, изученные на участке Лебещина, месторождениях Максово и Шуньга, показали, что внедрение расплавов основного состава происходило в неконсолидированные осадочные породы и приводило к образованию газо- и нефтенасыщенного флюида (рис. 3). Эти результаты согласуются с мнением ряда исследователей [Melezhik et al., 2009] о том, что в палеопротерозое в пределах Онежского палеобассейна существовало гигантское нефтяное поле, одной из причин формирования которого могло быть повышение температур осадочных комплексов вследствие подъема мантийных расплавов. Исходя из характера контактового взаимодействия, таким триггером нефтеобразования мог быть эпизод формирования силлов умеренномагнезиальных долеритов, тогда как формировавшиеся позднее силлы Fe-Ti долеритов несут признаки взаимодействия с уже зрелыми нефтяными системами.

Таким образом, анализ соотношений силлов долеритов и шунгитовых пород Онежской структуры позволяет выделить три дискретных типа контактового взаимодействия. Морфологические различия между ними могут быть обусловлены становлением интрузий на разных гипсометрических уровнях и их внедрением

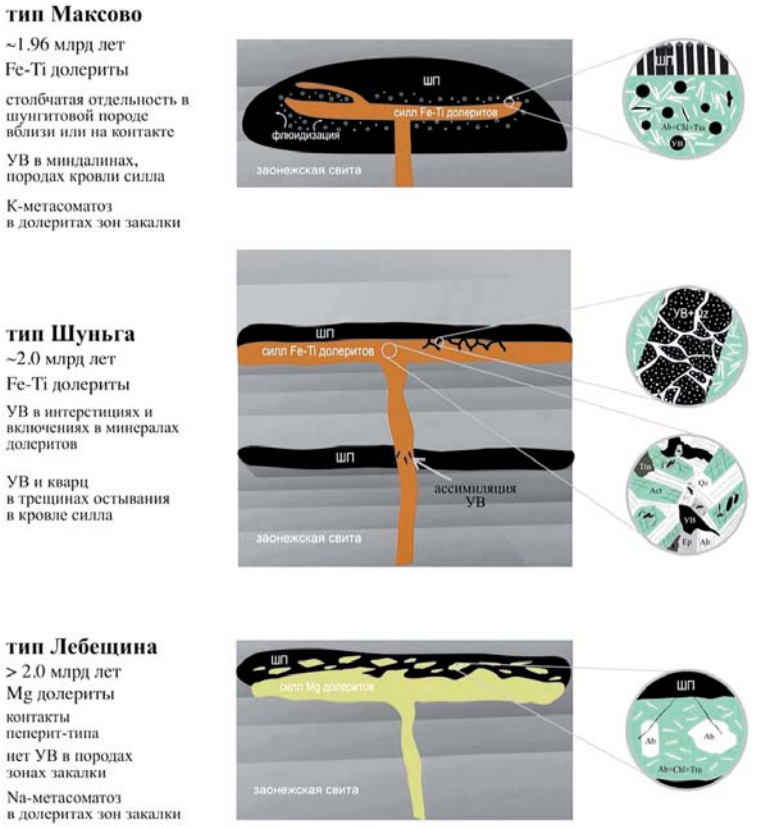


Рис. 3. Схематические модели разных типов контактового взаимодействия силлов долеритов с шунгитовыми породами в Онежском бассейне. Аббревиатура: Ab – альбит; Act – актинолит; Chl – хлорит; Ep – эпидот; Qz – кварц; Ttn – титанит; ШП – шунгитовая порода; УВ – углеродистое вещество

Fig. 3. Schematic models of the various types of contact interaction between sills of dolerites and shunigite rocks in the Onega Basin. Abbreviations: Ab – albite; Act – actinolite; Ep – epidote; Qz – quartz; Ttn – titanite; ШП – shungite rock; УВ – carbonaceous matter

в осадочные комплексы разной степени консолидации. Вариации состава и возраста долеритов свидетельствуют в пользу многоэтапного термического преобразования вмещающих осадочных толщ и полистадийном характере флюидно-магматического взаимодействия мафических расплавов и осадочных комплексов в палеобассейне.

Литература

Бискэ Н. С., Ромашкин А. Е., Рычанчик Д. В. Протерозойские пеперит-структуры участка Лебещина // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2004. № 7. С. 193–200.

Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А. Геологическая карта юго-восточной Фенноскандии масштаба 1:750000: новые подходы к составлению // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 3–41.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Полещук А. В. Палеопротерозойские брекчиевидные породы (пепериты) северо-онежской мульды Балтийского щита // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геол. 2007. Т. 82, № 6. С. 27–46.

Спиридонов Э. М., Путинцева Е. В., Лавров О. Б., Ладыгин В. М. Кронштедтит, пумпеллит, пренит, леннинленапеит в метаагатах и метабазальтах трапповой формации раннего протерозоя Северного Прионежья // Ломоносовские чтения: Тезисы докл. конф. (Москва, 18–27 апр. 2017 г.). М., 2017. URL: https://conf.msu.ru/file/event/4305/eid4305_attach_b0acc3e7de2cd859225469534617a6272d70ce50.pdf

Устинова В. В., Степанова А. В. Состав, корреляции и условия формирования умеренно-магнезиальных толеитов в Заонежском магматическом комплексе Онежской структуры // Тектоника и геодинамика Земной коры и мантии: фундаментальные

проблемы-2025. Материалы LVI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2025. С. 596–600.

Устинова В. В., Степанова А. В., Суханова М. А., Сальникова Е. Б., Ерофеева К. Г., Ран А. В., Бессмертный К. Н., Максимов О. А., Силаева О. М., Федоров А. А. Граниты А-типа 1,96 млрд лет в составе Онежской крупной магматической провинции, Карельский кратон // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2026. Т. 527, № 2. С. 315–327.

Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 146 с.

Chazhengina S. Y., Ustinova V. V., Stepanova A. V. Columnar jointing in Paleoproterozoic carbon-bearing rocks (Onega Basin, NW Russia): implications for carbon migration in sedimentary rocks // International Geology Review. 2024. Vol. 67(8). P. 1014–1031. doi: 10.1080/00206814.2024.2420185

Chazhengina S. Y., Ustinova V. V., Stepanova A. V. Interaction of Mafic Magma and Carbon Bearing Sediments: Evidence from the Paleoproterozoic Onega Basin and Implications for Carbon Migration // Petrology. 2026. Vol. 34(4). P. 468–485.

Hannah J. L., Stein H. J., Zimmerman A., Yang G., Melezhik V. A., Filippov M. M., Turgeon S. C., Creaser R. A. Re–Os geochronology of a 2.05 Ga fossil oil field near Shunga, Karelia, NW Russia // Proceedings of the 33rd International Geological Congress / Eds.: Koc S., Kavrazli O., Kocak I. Oslo, 2008. P. 6–14.

Iacono-Marziano G., Ferraina C., Gaillard F., Di Carlo I., Arndt N. T. Assimilation of sulfate and carbonaceous rocks: Experimental study, thermodynamic modeling and application to the Noril'sk-Talnakh region (Russia) // Ore Geology Reviews 90. 2017. P. 399–413. doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.04.027

Mangione A., Schofield N., Holford S., Grove C., Ellis C., Forster C., Schenk O., Gardiner D., Hedley B., Broadley L., Underhill J. R. Petroleum generation and migration through the Faroe–Shetland Basin – the role of igneous intrusions // Petroleum Geoscience. 2023. Vol. 30(2). doi: 10.1144/petgeo2022-084

Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Lepland A., Rychanchik D. V., Deines Y. E., Medvedev P. V., Romashkin A. E., Strauss H. Petroleum surface oil seeps from a paleoproterozoic petrified giant oilfield // Terra Nova. 2009. Vol. 21(2). P. 119–126. doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00864.x

Melezhik V. A., Medvedev P. V., Svetov S. A. The Onega basin // Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context forthe Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project / V. Melezhik, A. R. Prave, A. E. Fallick, L. R. Kump, H. Strauss, A. Lepland, E. J. Hanski (eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. P. 387–490. doi: 10.1007/978-3-642-29682-6_9

Palma J. O., Rabbel O., Spacapan J. B., Ruiz R., Galland O. The Cara Cura intrusive complex, Neuquén Basin, Argentina: A field analogue of a whole igneous petroleum system // Geological Society Special Publication. 2024. Vol. 547. P. 261–290.

Rabbel O., Hasenclever J., Galerne C. Y., Galland O., Mair K., Palma O. Impact of permeability evolution in igneous sills on hydrothermal flow and hydrocarbon transport in volcanic sedimentary basins // Solid Earth. 2023. Vol. 14. P. 625–646.

Schofield N., Holford S., Millett J., Brown D., Jolley D., Passey S. R., Muirhead D., Grove C., Magee C., Murray J., Hole M. Regional Magma Plumbing and emplacement mechanisms of the Faroe-Shetland Sill Complex: Implications for magma transport and petroleum systems within sedimentary basins // Basin Research. 2015. Vol. 29. P. 41–63.

Skilling I. P., White J. D. L., McPhie J. Peperite: a review of magma-sediment mingling // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2002. Vol. 114, no. 1–2. P. 1–17.

Stepanova A. V., Salnikova E. B., Samsonov A. V., Sukhanova M. A., Ustinova V. V., Larionova Yu. O., Prave T., Kirsimäe K., Lepland A. 2.00 Ga mafic sills in the Onega basin, Fennoscandian Shield: implications Pechenga-Onega LIP and age restrictions for Paleoproterozoic Shunga event // International Dyke Conference (IDC 8)-Large Igneous Provinces (LIPs 8)-Rodinia 2023. P. 138–139.

References

Biske N. S., Romashkin A. E., Rychanchik D. V. Proterozoic peperite structures of the Lebeshchina area. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and Mineral Resources of Karelia*. 2004;7:193–200. (In Russ.)

Kulikov V. S., Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikova V. V., Polin A. K., Golubev A. I., Gorkovets V. Ya., Ivashchenko V. I., Gogolev M. A. Geological map of Southeastern Fennoscandia (scale 1:750,000): a new approach to map compilation. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2017;2:3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444

Chazhengina S. Y., Ustinova V. V., Stepanova A. V. Columnar jointing in Paleoproterozoic carbon-bearing rocks (Onega Basin, NW Russia): implications for carbon migration in sedimentary rocks. *International Geol. Review*. 2024;67(8):1014–1031. doi: 10.1080/00206814.2024.2420185

Chazhengina S. Y., Ustinova V. V., Stepanova A. V. Interaction of mafic magma and carbon bearing sediments: evidence from the Paleoproterozoic Onega Basin and implications for carbon migration. *Petrology.* 2026;34(4):468–485.

Filippov M. M. Shungite rocks in Onega Basin. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2002. 146 p. (In Russ.)

Glushanin L. V., Sharov N. V., Shchiptsov V. V. (eds.). Paleoproterozoic Onega Structure: geology, tectonics, structure, and metallogeny. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 431 p. (In Russ.)

Hannah J. L., Stein H. J., Zimmerman A., Yang G., Melezhik V. A., Filippov M. M., Turgeon S. C., Creaser R. A. Re–Os geochronology of a 2.05 Ga fossil oil field near Shunga, Karelia, NW Russia. *Proceedings of the 33rd International Geological Congress.* Oslo; 2008. P. 6–14.

Iacono-Marziano G., Ferraina C., Gaillard F., Di Carlo I., Arndt N. T. Assimilation of sulfate and carbonaceous rocks: experimental study, thermodynamic modeling and application to the Noril'sk-Talnakh region (Russia). *Ore Geology Reviews*. 2017;90:399–413. doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.04.027

Mangione A., Schofield N., Holford S., Grove C., Ellis C., Forster C., Schenk O., Gardiner D., Hedley B., Broadley L., Underhill J.R. Petroleum generation and migration through the Faroe–Shetland Basin – the role of igneous intrusions. *Petroleum Geoscience*. 2023;30 (2). doi: 10.1144/petgeo2022–084

Melezhik V.A., Fallick A.E., Filippov M.M., Lepland A., Rychanchik D.V., Deine Y.E., Medvedev P.V., Romashkin A.E., Strauss H. Petroleum surface oil seeps from a Paleoproterozoic petrified giant oilfield. *Terra Nova*. 2009;21(2):119–126. doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00864.x

Melezhik V.A., Medvedev P.V., Svetov S.A. The Onega Basin. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context forthe Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013. P. 387–490. doi: 10.1007/978-3-642-29682-6_9

Palma J.O., Rabbel O., Spacapan J.B., Ruiz R., Gallan O. The Cara Cura intrusive complex, Neuquén Basin, Argentina: a field analogue of a whole igneous petroleum system. *Geol. Society Special Publication*. 2024;547:261–290.

Poleshchuk A.V. Paleoproterozoic brecciated rocks (peperites) of the North Onega trough, Baltic Shield. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Geol. seriya = Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geol. Series*. 2007;82(6):27–46. (In Russ.)

Rabbel O., Hasenclever J., Galerne C.Y., Galland O., Mair K., Palma O. Impact of permeability evolution in igneous sills on hydrothermal flow and hydrocarbon transport in volcanic sedimentary basins. *Solid Earth*. 2023;14:625–646.

Schofield N., Holford S., Millett J., Brown D., Jolley D., Passey S.R., Muirhead D., Grove C., Magee C., Murray J., Hole M. Regional Magma Plumbing and emplacement mechanisms of the Faroe-Shetland Sill Complex: Implications for magma transport and petroleum systems within sedimentary basins. *Basin Research*. 2015;29:41–63.

Skilling I.P., White J.D.L., McPhie J. Peperite: a review of magma–sediment mingling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2002;114(1–2):1–17.

Spiridonov E.M., Putintseva E.V., Lavrov O.B., Ladygin V.M. Cronstedtite, pumpellite, prehnite, lenninlenapeite in meta-agates and meta-basalts of the trap formation of the Early Proterozoic of the Northern Prionezhye. *Lomonosovskie chteniya: Tezisy dokl. konf. (Moskva, 18–27 apr. 2017 g.) = Lomonosov readings: Proceed. (Moscow, April 18–27, 2017).* Moscow; 2017. (In Russ.) URL: https://conf.msu.ru/file/event/4305/eid4305_attach_b0acc3e7de2cd859225469534617a6272d70ce50.pdf (accessed: 01.07.2025).

Stepanova A.V., Salnikova E.B., Samsonov A.V., Sukhanova M.A., Ustinova V.V., Larionova Yu.O., Prave T., Kirsimäe K., Lepland A. 2.00 Ga mafic sills in the Onega basin, Fennoscandian Shield: implications Pechenga-Onega LIP and age restrictions for Paleoproterozoic Shunga event. *Proceed. of the Int. Dyke Conf. (IDC 8)-Large Igneous Provinces (LIPs 8)-Rodinia.* 2023. P. 138–139.

Ustinova V.V., Stepanova A.V. Composition, correlations, and formation conditions of magnesian tholeiites in the Zaonega magmatic complex of the Onega structure. *Tektonika i geodinamika Zemnoi kory i mantii: fundamental'nye problemy-2025. Materialy LVI Tektonicheskogo soveshchaniya = Tectonics and geodynamics of the Earth's crust and mantle: fundamental problems – 2025. Proceed. of the 56th tectonic conf*. Moscow: GEOS; 2025. P. 569–600. (In Russ.)

Ustinova V.V., Stepanova A.V., Sukhanova M.A., Salnikova E.B., Erofeeva K.G., Samsonov A.V., Bessmertnyi K.N., Maksimov O.A., Silaeva O.M., Fedorov A.A. A-type granites 1.96 Ga within the Onega large igneous province, Karelian Craton. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk = Doklady Earth Sciences*. 2026;527(2):1–8.

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 05.10.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Степанова Александра Владимировна

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия, заместитель директора по НИР

e-mail: sa07sa@mail.ru

Устинова Виктория Владимировна

младший научный сотрудник
лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: vikaystinova@yandex.ru

Чаженгина Светлана Юрьевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории литологии и геохимии

e-mail: chazhengina@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Stepanova, Aleksandra

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Deputy Director

Ustinova, Viktoriia

Junior Researcher

Chazhengina, Svetlana

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 150–167
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 150–167
DOI: 10.17076/geo2448

УДК 55 (061.62) (470.22)

ИНСТИТУТУ ГЕОЛОГИИ КАРЕЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН – 65 ЛЕТ. ВЕХИ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

В. В. Щипцов*, С. А. Светов, А. В. Первунина

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

В статье приведены сведения об истории Института геологии Карельского научного центра Российской академии наук – от его истоков в 1946 году, когда был создан сектор геологии в составе Карело-Финской научной базы АН СССР, до современного состояния. Освещены ключевые этапы становления института, включая организационные преобразования, смену научных приоритетов и расширение международного сотрудничества. В отдельной главе акцент сделан на наиболее значимые события периода 1961–2021 гг., а в самостоятельный раздел выделены страницы новейшей истории – с 2022 года по настоящее время, когда институт активно развивает научно-просветительское направление. В краткой форме, со ссылками на опубликованные труды, представлены основные результаты фундаментальных и прикладных исследований, выполненных за 65-летний период, – от изучения докембрийских комплексов до разработки комплексных технологий переработки минерального сырья. Отдельное внимание уделено многолетнему сотрудничеству с Петрозаводским государственным университетом, которое обеспечивало институт квалифицированными кадрами и сохраняет свое значение в подготовке молодых специалистов. Поскольку деятельность института неразрывно связана с вкладом каждого из его сотрудников, значительная часть публикации посвящена научному персоналу – как ветеранам, стоявшим у истоков, так и нынешнему поколению исследователей, продолжающих традиции карельской геологической школы. Это подтверждает главную мысль: историю института создают люди, и сегодня она продолжается на новом витке столетия.

Ключевые слова: Институт геологии; Карельский научный центр; Российская академия наук; история; геология докембрия; Карелия; минеральные ресурсы; научное просвещение; научное сотрудничество

Для цитирования: Щипцов В. В., Светов С. А., Первунина А. В. Институту геологии Карельского научного центра РАН – 65 лет. Вехи становления и развития // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 150–167. doi: 10.17076/geo2448

V. V. Shchiptsov*, S. A. Svetov, A. V. Pervunina. INSTITUTE OF GEOLOGY, KARELIAN RESEARCH CENTRE RAS – 65 YEARS OF PROGRESS AND KEY MILESTONES

Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia)
**vv.shchiptsov@gmail.com*

The paper presents the history of the Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, starting from its inception in 1946, when the Geology Section was established within the Karelian-Finnish Research Facility of the USSR Academy of Sciences, to the present day. Key milestones in the Institute's evolution are highlighted, including structural reorganizations, shifts in research priorities, and the expansion of international cooperation. A chapter is dedicated to the most significant events of the period 1961–2021, and a separate section covers the recent history, from 2022 onwards, during which the Institute has been actively advancing its scientific outreach and public engagement activities. The major outcomes of basic and applied research conducted over the 65-year period are presented in a nutshell, with reference to published works – from studies of Precambrian complexes to the development of integrated technologies for mineral raw material processing. Special attention is given to the long-standing collaboration with the Petrozavodsk State University, which has provided the Institute with qualified personnel and continues to play a vital role in training young specialists. Since the Institute's activities are inseparable from the contributions of its employees, a substantial part of the publication is devoted to the researcher community – from the founding veterans to the current generation of researchers who carry forward the traditions of the Karelian geological school. This underscores the central message: the history of the Institute is made by its people, and today that history continues to unfold on a new turn of the century.

Keywords: Institute of Geology; Karelian Research Centre; Russian Academy of Sciences; history; Precambrian geology; Karelia; mineral resources; science communication; academic cooperation

For citation: Shchiptsov V. V., Svetov S. A., Pervunina A. V. Institute of Geology, Karelian Research Centre RAS – 65 years of progress and key milestones. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2026. No. 10. P. 150–167. doi: 10.17076/geo2448

Введение

В этом году Институт геологии отмечает свой 65-летний юбилей. Но летопись учреждения началась раньше – в 1946 году, с открытия Карело-Финской научной базы АН СССР. В предлагаемом очерке мы прослеживаем историю становления института – долгий путь, который вершили люди: те, кто трудится в его стенах сегодня, и те, кто закладывал фундамент геологической науки Карелии в прошлом веке. У нас есть возможность назвать имена пионеров-исследователей. Для тех, кто захочет глубже погрузиться в историю института, приведенный перечень использованной литературы позволит обратиться к оригинальным материалам разных лет, среди которых опубликованные в период 2008–2017 гг. основные результаты научных исследований Института геологии КарНЦ РАН, а также ряд изданий серии «Ученые Института геологии Карельского научного центра РАН» о П. А. Борисове, К. О. Кратце, Г. С. Бискэ, А. П. Светове, В. И. Робонене, С. И. Рыбакове, А. Д. Лукашове, А. С. Пекки, Р. А. Хазове и др.

Основание института

В год окончания Великой Отечественной войны Совет Народных Комиссаров СССР принял решение об организации Карело-Финской научно-исследовательской базы Академии наук СССР. Уже в 1946 году в структуре этой базы был создан сектор геологии, который возглавил профессор Петроградского сельскохозяйственного института (ныне – Санкт-Петербургский государственный аграрный университет) Петр Алексеевич Борисов. В 1949 году база была переименована в Карело-Финский филиал АН СССР (КФ АН СССР), а в 1956 году – в Карельский филиал АН СССР [Щипцов, Голованова, 2006].

Вскоре П. А. Борисов с коллегами подготовил проект, который был одобрен и принят

Президиумом АН СССР. В документе, в частности, говорилось: «В целях усиления и расширения научно-исследовательских работ по геологии и технологическому использованию минеральных богатств КАССР организовать в январе 1961 года Институт геологии». В мае 1961 года вышел приказ, предписывавший во исполнение постановления Президиума АН СССР и приказа по КФ АН СССР создать Институт геологии на базе существовавших в филиале отдела петрографии и минералогии и отдела региональной геологии (с их подразделениями). Таким образом, 18 мая 1961 года стало официальной датой основания Института геологии Карельского филиала АН СССР [Щипцов, Голованова, 2006] (рис. 1, 2).



Рис. 1. Здание, в котором первоначально размещался Институт геологии до 1969 года на ул. Урицкого (ныне – здание ФИЦ КарНЦ РАН, проспект Александра Невского)

Fig. 1. The original premises of the Institute of Geology on Uritsky Street, occupied until 1969 (now the building of the FRC Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Alexander Nevsky Avenue)



Рис. 2. Корпус Института геологии в 2008 году на ул. Пушкинской

Fig. 2. The building of the Institute of Geology in 2008 on Pushkinskaya Street



Рис. 3. Петр Алексеевич Борисов
Fig. 3. Pyotr Alekseevich Borisov



Рис. 4. Кауко Оттович Кратц
Fig. 4. Kauko Ottovich Kratz

К 1961 году сложилась организационная структура института. В нее вошли отдел региональной геологии под руководством кандидата геолого-минералогических наук В. А. Соколова, отдел минералогии и петрографии, который возглавил кандидат наук К. О. Кратц, отдел четвертичной геологии и геоморфологии во главе с доктором наук Г. С. Бискэ, а также отдел минерального сырья с группой экономики и лабораторией минерального сырья, заведующим которого стал доктор геолого-минералогических наук П. А. Борисов. Кроме того, в составе института работали химико-аналитическая лаборатория, объединявшая группы химического, спектрального, рентгеноскопического, шлихового анализов и механического разделения минералов (заведующая – В. А. Ахвонен), и геологический музей, которым заведовал В. Н. Юдин. Общая численность штата института составляла 51 человек, в том числе 25 научных сотрудников и 26 специалистов научно-технического профиля [Щипцов, Голованова, 2006].

В 1962 году по личной просьбе профессор Петр Алексеевич Борисов освобождается от должности директора института, оставаясь в возрасте 84 лет заведующим отделом минерального сырья (рис. 3). В середине того же года директором института назначили молодого талантливого ученого – кандидата геолого-минералогических наук Кауко Оттовича Кратца (рис. 4), который вскоре успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Геология карелид Карелии». В последующие годы директорами института (или исполняющими обязанности) были: Владимир Алексеевич Соколов (в 1966–1977 и 1981–1985 гг.), Михаил Михайлович Стенарь (исполнял обязанности в 1977–1981 гг.), Сергей Иванович Рыбаков (1986–2000), Ким Иванович Хейсканен (и. о. директора в 2000–2001 гг.), Владимир Владимирович Щипцов (2002–2016) и Сергей Анатольевич Светов, который возглавляет институт с 2017 года по настоящее время [Ученые..., 2012].

С 1 января 1964 года по 30 июня 1967 года Институт геологии находился в системе Министерства геологии СССР, после чего был возвращен в ведение АН СССР и вновь включен в состав Карельского филиала АН СССР. В 1991 году филиал реорганизовали в Карельский научный центр РАН. С 2017 года и по сей день Институт геологии функционирует как обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИГ КарНЦ РАН) [Институт геологии, 2011].

Геологическая наука и образование в Карелии – единый путь развития

Интеграция фундаментальной науки и высшего образования издавна служит надежной основой для подготовки квалифицированных кадров и развития региональной исследовательской среды. Для геологической науки, где полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и теоретические обобщения неразрывно переплетены, особенно важна связь между академическими институтами и университетскими кафедрами. Именно такая синергия позволяет формировать новые поколения исследователей, оперативно внедрять в учебный процесс научные результаты, формируя у студентов навыки решения реальных задач.

В Карелии эта традиция имеет глубокие корни, и история Института геологии КарНЦ РАН служит ярким тому подтверждением.

Геология в Петрозаводском государственном университете

С первых лет существования Института геологии Петрозаводский государственный университет стал для него главной кузницей научных и производственных кадров. Открытый 1 сентября 1940 года как Карело-Финский государственный университет, он был создан на базе педагогического института и сразу включил в свою структуру геолого-гидрогеографический факультет, а с 1944 года – самостоятельный геологический факультет (впоследствии геологоразведочный). Это было не случайно: в те же годы в Карелии разворачивалось систематическое геологическое изучение недр, создавалась научная база АН СССР, и потребность в квалифицированных геологах-исследователях ощущалась острейшим образом. Таким образом, университет и академическая наука с самого начала шли рука об руку, решая общую задачу – обеспечение региона специалистами, способными вести как фундаментальные, так и прикладные работы.

Именно выпускники геологоразведочного факультета ПетрГУ стали тем кадровым стержнем, на котором держался молодой Институт геологии. В послевоенные годы из университетских аудиторий вышли геологи, определившие лицо карельской науки: Н.Ф. Демидов, В.Я. Мейльбаум (выпуск 1948-го), В.И. Робонен, Б.А. Юдин (1949-й), В.А. Костин, А.С. Пекки, В.А. Соколов, Н.Д. Сыромятина, В.Н. Юдин (1950-й), В.М. Чернов (1952-й), Г.М. Кириленко, А.И. Тухас, И.М. Экман (1954-й). В 1955 году к ним присоединились: Н.Т. Кищенко, В.И. Коросов, Н.А. Костина, М.М. Лавров, В.Д. Слюсарев, А.В. Солнышков, М.М. Стенарь, В.С. Степанов, Р.А. Хазов; в 1956-м – Ю.И. Сацук; в 1957-м – В.А. Ильин, Р.Б. Бутин; в 1958-м – В.И. Горлов, А.И. Крохин, Т.К. Кулмала, Ю.И. Лазарев, Н.В. Мельянцев, М.Г. Попов, А.В. Рылеев, А.С. Семенов; в 1959-м – А.С. Гришин, А.Ф. Бондарь, Л.С. Голованова, М.А. Елисеев, А.Д. Лукашов, В.В. Макарихин, В.Г. Пудовкин, М.Б. Раевская, А.И. Светова, А.П. Светов; в 1960-м – Е.Ф. Белоусов, В.Я. Горьковец, А.К. Полин, К.И. Хейсканен [Геологическое образование..., 2008]. Многие из этих ученых впоследствии возглавили отделы, лаборатории и даже сам институт, что наглядно демонстрирует прямую преемственность университетской скамьи и академической науки.

Однако в 1961 году – в тот самый год, когда институт обрел официальный статус, – прием на геологоразведочный факультет ПетрГУ был неожиданно приостановлен. Это решение, продиктованное, вероятно, общесоюзными тенденциями, нанесло чувствительный удар по кадровым перспективам института. В последующие полтора десятилетия пополнение научных коллективов шло за счет выпускников Московского, Ленинградского и Воронежского университетов, Ленинградского горного института и других профильных вузов страны. Хотя эти специалисты привносили свежие идеи и столичный научный опыт, отсутствие собственной «кузницы» в регионе затрудняло планомерное воспитание научной смены, адаптированной к местной геологической специфике.

Ситуация обострилась в 1990 году, когда отмена государственного распределения выпускников практически перекрыла поток молодых геологов на Север. Институт геологии оказался перед угрозой кадрового голода, который мог подорвать его научные исследования. Именно тогда ученые Института геологии выступили с инициативой возродить геологическую подготовку в ПетрГУ, создать новый системный образовательный тренд, интегрирующий образование и фундаментальные исследования.

Осенью 1997 года, благодаря настойчивости и организаторскому таланту сотрудников ИГ КарНЦ РАН, первая группа студентов приступила к занятиям на вновь созданной кафедре геофизики ПетрГУ. Это событие стало поворотным: институт не только вернул себе источник пополнения кадрами, но и получил возможность непосредственно влиять на учебные планы, приобщать студентов к реальным научным проектам с первых курсов. Правовую основу сотрудничества заложили

Договор о совместной деятельности и «Положение о научно-образовательном геолого-геофизическом центре», утвержденные ректором ПетрГУ В. Н. Васильевым и директором ИГ КарНЦ РАН В. В. Щипцовым [Геологическое образование..., 2008]. Закономерным итогом многолетнего сотрудничества было создание на базе этой кафедры горно-геологического факультета (ГГФ) в 2009 году. Основной штат кафедры геологии и геофизики составили сотрудники Института геологии: В. В. Щипцов (заведующий), А. И. Слабунов, Н. В. Шаров, В. Я. Горьковец, Л. В. Кулешевич, П. В. Медведев, Н. И. Кондрашова, Н. Н. Рожкова, В. В. Травин, А. В. Первунина (старший преподаватель), П. А. Рязанцев, С. Я. Соколов, Д. В. Рычанчик, М. Ю. Нилов и А. В. Климовский; внештатно к учебному процессу привлекались С. В. Егорова, А. А. Иванов, В. И. Иващенко, В. И. Кевлич, Н. В. Крутских, В. С. Куликов, В. В. Макарихин, О. В. Максимов, О. В. Мясникова, Н. С. Нестерова, А. Г. Никифоров, С. С. Рожков, А. И. Савицкий, С. А. Светов, О. С. Сибелев, А. С. Скворцова, А. В. Степанова, В. А. Шеков и Т. С. Шелехова. В ученый совет факультета вошли ведущие профессора института – В. В. Щипцов, В. Я. Горьковец, Н. В. Шаров и А. В. Первунина [Геологическое образование..., 2008]. Таким образом, институт фактически стал соавтором университетской образовательной программы, что позволило синхронизировать учебные курсы с актуальными направлениями научных исследований.

На базе Института геологии для студентов ГГФ регулярно проводились спецкурсы и практические семинары с участием крупнейших специалистов страны и иностранных ученых. Среди приглашенных лекторов были член-корреспондент РАН Л. И. Красный (ВСЕГЕИ), доктора наук Ю. К. Щукин (Институт динамики литосферы РАН), Б. И. Пирогов (РГГРУ), Е. Г. Ожогина (ВИМС), М. Г. Леонов (ГИН РАН), а также иностранные ученые – профессор Г. Штраус (Вестфальский университет, Германия), профессор В. А. Мележик (Университет г. Бергена, Геологическая служба Норвегии) и профессор П. С. Хёлтта (Университет Хельсинки). Такие контакты не только обогащали студентов, но и укрепляли международные связи самого института, превращая учебные мероприятия в площадки научного диалога.

Неизменной традицией стали ознакомительные экскурсии, проводимые для студентов в ведущие геологические музеи, вузы и научные центры Москвы, Санкт-Петербурга и Апатитов – МГУ, РГГРУ, СПбГУ, Горный университет, ИХТРЭМС, ВСЕГЕИ, ВИМС и другие. Эти поездки служили для студентов окном в большую науку, а для института – возможностью демонстрировать уровень своих партнерских связей.

В 2017 году, в русле общероссийских реформ высшего образования, горно-геологический факультет был упразднен, а подготовка геологов перешла в Институт лесных, горных и строительных наук ПетрГУ, где была создана кафедра наук о Земле и геотехнологий. Несмотря на структурные изменения, суть сотрудничества не изменилась. И сегодня на кафедре реализуется программа бакалавриата по направлению 05.03.01 «Геология», сочетающая классические дисциплины с современными образовательными технологиями. Сотрудники Института геологии КарНЦ РАН остаются активными участниками этого процесса: руководят аспирантами, читают авторские курсы, ведут полевые и лабораторные практики, курируют выпускные квалификационные работы и входят в состав государственных аттестационных комиссий.

Так университет и институт, пройдя через периоды взлетов и кризисов, сохранили живую связь, которая питает карельскую геологическую науку свежими кадрами и позволяет молодым исследователям с первых шагов погружаться в атмосферу большой академической науки. Причем эта связь – не просто административная формальность, а органичное продолжение той традиции, что была заложена в 1940-е годы, когда первые выпускники университета пришли в стены еще только формировавшегося института и создали его надежный научный фундамент.

От региональных исследований к мировому признанию: события 1961–2021 гг.

Шестидесятипятилетняя история Института геологии КарНЦ РАН насыщена событиями, которые отражали как внутренние закономерности развития академической науки в Карелии, так и глобальные тренды в геологических исследованиях. Хронология этих событий позволяет проследить, как институт постепенно превращался из региональной научной организации в признанного участника международного научного сообщества, как менялись его исследовательские приоритеты и как он адаптировался к трансформациям в системе организации науки в стране.

1970-е годы: становление международного признания и стратегических направлений исследований. Уже в начале 1970-х гг. институт заявил о себе как о центре компетенций по изучению геологии докембрия. В июне 1971 года в Петрозаводске состоялась международная

конференция по тектонике докембрия восточной части Балтийского щита, сопровождавшаяся геологической экскурсией по Карелии. В мероприятии приняли участие специалисты из США, Канады, Бразилии, Франции, Великобритании, Испании, Норвегии, Финляндии, Швеции и Болгарии [Щипцов и др., 2016]. Этот форум стал первой крупной международной инициативой института и обозначил его авторитет и амбиции в области докембрия.

Принципиальное значение для долгосрочной стратегии развития института имело Постановление Совмина СССР от 4 января 1972 года, которое определило необходимость комплексного исследования углеродсодержащих полезных ископаемых Карелии – шунгитов, прогнозные запасы которых оценивались в сотни миллионов тонн. По инициативе и при организаторской поддержке Ю. К. Калинина к этой работе были привлечены многие научные и производственные организации страны, причем Институт геологии был определен головной организацией по изучению шунгитов [Хохлов, Новикова, 2016]. Это решение не только закрепило за институтом важную прикладную тему, но и стимулировало развитие минералогических, геохимических и технологических исследований, сохраняющих актуальность и сегодня.

В 1974 году Петрозаводск стал площадкой для выездного заседания Отделения геологии, геохимии и геофизики АН СССР, в котором участвовали видные ученые – академики В. И. Смирнов, Д. С. Коржинский, А. П. Яншин, М. А. Садовский, Ф. В. Чухров и другие. Заседания чередовались с полевыми экскурсиями, что позволило участникам воочию оценить геологическое разнообразие Карелии. Академик В. И. Смирнов особо выделил приоритетные для института вулканологические исследования, которые позволили не только определить направления течения древних лав, но и, в конечном счете, привели к открытию древнейших вулканических аппаратов. Именно с этими работами связано возникновение новой научной ветви – палеовулканологии докембрия, в становлении которой карельская школа сыграла ведущую роль [Щипцов и др., 2016].

1980-е годы: укрепление международного авторитета. Следующее десятилетие ознаменовалось участием института в крупнейшем геологическом форуме – XXVII Международном геологическом конгрессе, прошедшем в Москве в августе 1984 года. Группа сотрудников института (В. А. Соколов, В. С. Куликов, М. М. Стенарь, Ю. И. Лазарев, А. С. Пекки, С. И. Рыбаков, А. П. Светов, Л. П. Свириденко, Р. А. Хазов, К. И. Хейсканен) выступила с докладами, которые были опубликованы в трудах конгресса. Важным вкладом стала подготовка и проведение двух геологических экскурсий по Карелии для участников конгресса; к этим экскурсиям был издан путеводитель «Геологическая экскурсия по Карелии. Geological fieldtrips in Karelia», вошедший в сводный путеводитель по Северо-Западу РСФСР [Щипцов и др., 2016]. Это событие укрепило репутацию института как надежного партнера в международных научных проектах и открыло двери для дальнейшего сотрудничества.

1990-е годы: прорыв в международное сотрудничество и новые вызовы. Переломным моментом стал 1990 год, когда в США и Канаде прошел совместный семинар и полевые экскурсии «Joint seminar-field trip on Precambrian geology, Southern Canadian shield and Eastern Baltic shield» (21 августа – 2 сентября 1990 года). Это был настоящий прорыв в отношениях между американскими, канадскими и карельскими геологами. Делегация Института геологии – В. С. Куликов, М. М. Стенарь, А. И. Голубев, Л. В. Кулешевич, П. В. Медведев, А. П. Светов, А. И. Слабунов, Г. Н. Соколов, Р. А. Хазов, К. И. Хейсканен, В. В. Щипцов (рис. 5) выступила с докладами на семинаре в г. Дулуте. Координаторами проекта были профессор Миннесотского университета Ричард Оякангас и главный геолог Геологической службы Онтарио (Канада) Кен Кард. Мероприятие было организовано при поддержке Национального научного фонда США, Геологической службы Канады, Университета Миннесоты, Геологического факультета Миннесотского университета (Дулут), Геологической службы Онтарио и АН СССР. По итогам семинара в США был издан сборник докладов на английском языке, что стало важным вкладом в сравнительное изучение докембрийских структур двух континентов [Щипцов и др., 2016]. Это событие символизировало выход института на качественно новый уровень международного взаимодействия, основанный на равноправном обмене знаниями.

В 1995 году институт организовал Международную конференцию «Малый горный бизнес на Северо-Западе России» при финансовой поддержке проекта BISTRO-TACIS; материалы конференции были опубликованы на русском и английском языках. Участие специалистов из Болгарии, Германии, Великобритании и Франции придало мероприятию европейский масштаб. На средства фонда EURO-ASIA при институте был создан Межрегиональный Северо-Западный центр развития малого



Рис. 5. Российская делегация сотрудников ИГ с участниками международного семинара в г. Дулуте (США)

Fig. 5. Delegation of Russian researchers from the Institute of Geology with the participants of the international seminar, Duluth, USA

горного бизнеса, объединивший многие горные предприятия региона. Центр подготовил и издал сборник переводов статей о малом горном производстве, включивший материалы специалистов Мирового банка и различных горных компаний. Эта деятельность имела не только научное, но и практическое значение: в России впервые заговорили о нормативно-правовых основах развития малых горных предприятий, был инициирован проект Федерального Закона «О малом горном предприятии», который получил первоначальную поддержку Государственной Думы. Таким образом, институт выступил не только как исследовательская, но и как экспертная площадка, влияющая на экономическую политику в сфере недропользования.

2000–2010-е гг.: достижения и новый этап партнерства.

В 2011 году, в связи с 50-летием основания, институт был награжден Почетной грамотой РАН за большой вклад в развитие фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле и внедрение результатов в практику – это стало официальным признанием его многолетних заслуг. В 2015 году по результатам ежегодного рейтинга научных учреждений WRIR-2015 институт занял почетное место в разделе «Науки о Земле», а директор В. В. Щипцов был удостоен золотой медали и диплома WRIR. Этот успех отражал высокий уровень публикационной активности и цитируемости сотрудников.

В последующие годы был подписан Меморандум о взаимопонимании между Бунделкхандским университетом (Джанси, Индия) и ИГ КарНЦ РАН, положивший начало сотрудничеству двух стран в области геологии (рис. 6). Институт стал частью научного содружества БРИКС, что открыло перспективы совместных проектов с учеными из стран с быстроразвивающейся экономикой.

В 2017 году финансовую поддержку получил проект «Петрология и геология архейских зеленокаменных комплексов Бунделкхандского (Индийский щит) и Карельского (Фенноскандинавский щит) кратонов как основа для геодинамических реконструкций ранней Земли» (руководитель – С. А. Светов, грант РФФИ-ИНД № 17-55-45005). Это сотрудничество



Рис. 6. Подписание Меморандума о сотрудничестве. С российской стороны: ИГ КарНЦ РАН, директор С. А. Светов, с индийской стороны: Бунделкхандский университет, вице-канцлер Дж. В. Вайшампаян

Fig. 6. Signing of the Memorandum of Cooperation between the Institute of Geology KarRC RAS (Director S. A. Svetov, Russia) and Bundelkhand University (Vice-Chancellor J. V. Vaishampayan, India)

не только обогатило сравнительную петрологию, но и укрепило позиции института в международных научных сетях.

В мае 2018 года институт перешел под юрисдикцию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, что было частью общесистемной реформы управления академической наукой. Утверждено новое положение об Институте геологии как обособленном подразделении Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН», что закрепило его современный статус.

Научный престиж института получил яркое подтверждение в 2018 году, когда его сотрудники стали соавторами статьи, опубликованной в журнале Science (рис. 7) – это свидетельство того, что карельские геологи работают на переднем крае мировой науки.

В 2019 году стартовало новое направление международного сотрудничества: был подписан договор о сотрудничестве со Школой наук о Земле и космосе Пекинского университета (ответственный – А. И. Слабунов), что открыло доступ к китайским исследовательским программам и обмену студентами.

Таким образом, хроника событий полувекового периода показывает эволюцию Института геологии от регионального отраслевого подразделения до полноценного участника глобального научного ландшафта. Каждое десятилетие приносило новые вызовы и открытия, но неизменным оставалось стремление сотрудников института сочетать фундаментальные исследования с практическими задачами и активным международным диалогом.



Рис. 7. Статья в Science 2020 года. От ИГ – соавторы П. В. Медведев, А. Е. Ромашкин, Д. В. Рычанчик

Fig. 7. A 2020 article in Science. Co-authors from the Institute of Geology: P. V. Medvedev, A. E. Romashkin, and D. V. Rychanchik

2020–2026-е гг.: новый вектор – от научных исследований к просвещению и популяризации знаний.

Последние годы стали для Института геологии временем осознанного поворота к широкой аудитории. Наряду с фундаментальными исследованиями все более значимое место в деятельности института занимает научно-просветительская работа, направленная на популяризацию геологических знаний, развитие туристического потенциала региона и привлечение молодежи в науку. Этот вектор не случайно получил системное развитие – он опирался на многолетний научный задел и уникальное геологическое наследие Карелии, которое нуждалось не только в изучении, но и в доступной интерпретации для самых разных категорий населения.

Важным рубежом стало присуждение Институту геологии двух премий подряд в номинации «Свет науки» Республиканского конкурса «Книга года Республики Карелия». В 2020 году победителем была признана коллективная монография «Ладожская протерозойская структура: геология, глубинное строение и минерагения» под редакцией Н. В. Шарова. А в 2021 году лауреатом в той же номинации стала монография «Геологическое наследие Карелии. Путеводитель историко-геологических экскурсий по городу Петрозаводску и Центральной Карелии», изданный под редакцией Л. В. Кулешевич и С. А. Светова. Этот путеводитель получил не только высокую оценку профессионального сообщества, но и был отмечен специальным дипломом Управления по туризму Республики Карелия за вклад в продвижение туристического потенциала региона. Успех издания вдохновил коллектив на дальнейшие шаги: вскоре вышли две адаптированные для детей версии путеводителя, в которых в игровой, ярко иллюстрированной форме описывались геологические маршруты. Этот просветительский проект был удостоен диплома победителя в номинации «Классная книга года» в 2022 году.

Молодежные проекты и системная работа с аудиторией. В мае 2022 года стартовал марафон просветительских мероприятий, заложивший основу новой научно-просветительской концепции, разрабатываемой в институте под руководством С. А. Светова. В том же году при грантовой поддержке Федерального агентства по делам молодежи (Росмолодежь) был запущен проект «ГеоКарелия» (руководитель – О. А. Максимов, рис. 8), нацеленный на повышение туристической привлекательности региона и развитие молодежного туризма. В рамках проекта сотрудники института провели около 30 открытых уроков для 600 школьников Петрозаводска и Республики Карелия, что стало важным шагом в профориентационной работе.

Масштабные публичные мероприятия. Институт геологии выступил инициатором и соорганизатором уникального для региона события – «Дня палеовулкана» в Гирвасе. Два года подряд программа этого мероприятия, собиравшая более 1500 участников, включала научно-популярные лекции, полевые экскурсии и занимательные викторины. С 2023 года институт является соорганизатором ежегодного интерактивного фестиваля науки Science Party в детском технопарке «Кванториум „Сампо“» в Петрозаводске. В этом же году



Рис. 8. О. А. Максимов, руководитель проекта «ГеоКарелия», поддержанного грантом Федерального агентства по делам молодежи (Росмолодежь)

Fig. 8. O. A. Maksimov, head of the “GeoKarelia” project supported by a grant from the Federal Agency for Youth Affairs (Rosmolodezh)



Рис. 9. В. В. Щипцов в научной библиотеке ПетрГУ выступает с научно-популярной лекцией «Возрождение арктических территорий Республики Карелия»

Fig. 9. V. V. Shchiptsov delivering a popular science lecture titled “Revival of the Arctic Territories of the Republic of Karelia” at the Scientific Library of Petrozavodsk State University

в Петрозаводском государственном университете стали традиционными публичные лекции сотрудников института, посвященные популяризации геологических знаний. Так, В. В. Щипцов выступил в научной библиотеке ПетрГУ с лекцией «Возрождение арктических территорий Республики Карелия», вызвавшей живой интерес у студенческой аудитории (рис. 9).

Новые горизонты. В 2023 году на заседании Ученого совета КарНЦ РАН была утверждена новая концепция развития Музея геологии докембрия, ее главными направлениями стали: демонстрация актуальных представлений о строении Земли и региона, показ природных богатств Карелии и отражение роли ученых ИГ КарНЦ РАН в исследованиях. Музей геологии призван стать не просто экспозиционной площадкой, но и центром притяжения для туристов, школьников и всех, интересующихся геологией.

Расширение партнерств и новые проекты. В 2024–2025 гг. состоялся ряд конференций, посвященных уникальным геологическим объектам Карелии, их изучению и популяризации. Среди них – конференция «Геологическое и горно-индустриальное наследие Карелии в образовании, музейном деле и туризме», организованная Карельским ресурсным центром общественных организаций совместно с ИГ КарНЦ РАН в рамках проекта «Карелия промышленная: новые измерения» (грант Президента РФ). Также был проведен научно-практический семинар «Геологические исследования на особо охраняемых природных территориях», где подводились итоги сотрудничества с администрациями национальных парков Республики Карелия и намечались планы дальнейших исследований на особо охраняемых природных территориях.

В 2024–2025 гг. сотрудниками института был реализован проект «Семь камней Карелии, которые должен знать каждый» и «Карелия – история в камне». Программа включала научно-просветительские мероприятия для различных категорий населения: были организованы выставки с информационными стендами и экспозицией образцов горных пород – гранита, мрамора, шунгита, шокшинского кварцита, габбро-долерита, железистого кварцита и соломенской брекчии. Мероприятия дополнялись научно-популярными лекциями, тематическими экскурсиями и мастер-классами. Большой вклад в эту работу внесли сотрудники института: С. А. Светов, Н. С. Нестерова, С. В. Егорова, О. А. Максимов, А. В. Лютиков, А. В. Степанова, В. В. Устинова, А. В. Бакаева, А. В. Кервинен, А. А. Ковальчук, Т. Ю. Товпенец, А. А. Фатеева и А. В. Первунина. Также в 2025 году ИГ КарНЦ РАН стал участником проекта «Каменная летопись Карелии: популяризация геологического и горно-индустриального наследия», реализованного при поддержке Фонда грантов Главы Республики Карелия. Цель проекта – сохранение, популяризация и использование геологического и горно-индустриального наследия Карелии в образовании и туризме. В течение года сотрудники института вели активную научно-просветительскую и профориентационную работу (рис. 10), что укрепило позиции института как ключевого эксперта в области геологического просвещения в регионе.



Рис. 10. С. А. Светов в Национальной библиотеке Республики Карелия на открытии выставки проекта «Каменная летопись Карелии: популяризация геологического и горно-индустриального наследия»

Fig. 10. S. A. Svetov at the opening of the exhibition for the project “The Stone Chronicle of Karelia: Promoting the Geological and Mining Heritage” at the National Library of the Republic of Karelia

Взгляд в будущее: создание «Научно-просветительского центра». Закономерным итогом многолетней просветительской деятельности стало обсуждение на заседании Ученого совета ИГ КарНЦ РАН в 2026 году концепции создания Научно-просветительского центра института, которую представила Н. С. Нестерова. В основу концепции был положен накопленный за всю историю института опыт популяризации научных знаний. Идея получила поддержку Ученого совета, и было принято решение об организации рабочей группы по разработке и внедрению этого проекта. Создание такого центра станет важным шагом в институциональном оформлении просветительского направления, которое сегодня уже является не просто дополнением к научной работе, а полноценной и стратегически значимой частью деятельности Института геологии.

Основные результаты фундаментальных и прикладных исследований

За шесть с половиной десятилетий Институт геологии КарНЦ РАН превратился в один из ведущих академических центров по изучению геологического строения и эволюции юго-восточной части Фенноскандинавского щита. Масштаб выполненных здесь исследований сопоставим с геологическим богатством самого региона: от архейских кристаллических комплексов до четвертичных отложений, от фундаментальных проблем ранней истории Земли до прикладных задач поиска и оценки минерального сырья. Научные результаты института не только пополнили фундаментальные представления о докембрийской геологии, но и легли в основу стратегических документов по развитию минерально-сырьевой базы Северо-Запада России.

На протяжении десятилетий институт вел систематические исследования в рамках государственных заданий, планов НИР, программ Президиума РАН (и ранее – АН СССР), а также тематических заданий Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных наук (ОГГГН), и Отделения наук о Земле (ОНЗ) РАН. Помимо фундаментальных тем, важное место в работе института занимали международные научные проекты и договоры с организациями России, в том числе так называемые хозяйственные договоры, ориентированные на решение конкретных задач недропользования. Такое сочетание базовой науки и прикладных разработок позволяло институту сохранять устойчивость даже в периоды институциональных реформ и экономических перемен.

География исследований института охватывала не только территорию Карелии, но и сопредельные районы Мурманской, Архангельской, Ленинградской областей, а также, в рамках международных проектов, территории Финляндии, Норвегии, Швеции, Эстонии, Канады, США, Индии, Китая и Беларуси. В фокусе внимания находились ключевые объекты: раннедокембрийские зеленокаменные пояса, гранулитовые комплексы, протерозойские осадочные и вулканогенные толщи, вулканические комплексы, тектоника, шунгитоносные и рудоносные структуры и системы. Исследования по стратиграфии, тектонике, петрологии, геохимии, изотопной геологии и минерагении позволили создать непротиворечивую модель геологической истории региона, а также обосновать прогнозы на новые виды полезных ископаемых.

Важной составляющей деятельности института стало регулярное подведение итогов исследовательской работы. Начиная с 2008 года и вплоть до 2017 года, коллектив института последовательно публиковал ежегодные обзоры «Основные результаты научных исследований Института геологии», в которых отражались наиболее значимые достижения по каждому из направлений. Эти издания, выходившие под эгидой КарНЦ РАН, служили своего рода научным отчетом перед академическим сообществом и позволяли проследить динамику развития институтских школ [Основные результаты научных исследований ИГ за 2008–2012 гг., 2013; за 2013 г., 2014; за 2014 г., 2015; за 2015 г., 2016; за 2016 г., 2017; за 2017 г., 2018]. В них концентрированно представлены результаты полевых, лабораторных и теоретических работ, многие из которых имели не только региональное, но и общемировое значение.

Кроме того, история института нашла отражение в десятках обобщающих изданий – юбилейных сборниках, биографических очерках, исторических обзорах и библиографических указателях. Среди них – фундаментальные работы, охватывающие полувековой путь института [Карельский филиал..., 1970; Геология Карелии..., 2011; Институт геологии, 2011], серия очерков об ученых, составляющих славу карельской геологии [Ученые Карельского научного центра..., 2012], а также специальные издания, освещающие отдельные страницы истории, – от первых директоров до стратегических направлений исследований [Щипцов, Голованова, 2006; Дорога..., 2014; Щипцов и др., 2016; Хохлов, Новикова, 2016; 60 лет Институту..., 2021; Рахманова, 2026]. В совокупности эти публикации создают многомерный портрет института как «живого организма», развивающегося во времени, меняющего приоритеты, но неизменно сохраняющего верность главной цели – познанию геологических тайн Карелии и их практическому использованию на благо региона и страны.

Таким образом, фундаментальные и прикладные результаты Института геологии – это не просто перечень открытий и отчетов, а целостная система знаний, которая продолжает пополняться и сегодня. Заложенные десятилетиями назад научные школы, методические подходы и исследовательские традиции обеспечивают преемственность поколений и позволяют институту оставаться в авангарде геологической науки Северо-Запада России.

Кадровый состав научных сотрудников Института геологии в прошлом и настоящем

Главное достояние любого научного института – его сотрудники. За шесть с половиной десятилетий в Институте геологии КарНЦ РАН сложился уникальный коллектив, в котором переплелись судьбы нескольких поколений исследователей – от фронтовиков-основателей до современных ученых, продолжающих традиции карельской геологической школы. Многие из них оставили яркий след не только в науке, но и в организации исследований, подготовке кадров и популяризации геологических знаний. К 65-летию Карельского научного центра РАН был издан биографический словарь «Ученые Карельского научного центра Российской академии наук», в который включены сведения об ученых Института геологии [Ученые…, 2012]. Это издание содержит лишь краткие, но наиболее важные вехи их жизненного и научного пути. Ниже в выборочном алфавитном порядке приводится перечень имен некоторых научных сотрудников, упоминаемых в этом издании: Алексеев Борис Яковлевич, геолог, химик, канд. геол.-мин. наук, зав. лаб. геол. и разведки слюды, ветеран ВОВ [Ученые…, 2012]; Бискэ (Малыгина) Галина Сергеевна, геоморфолог, докт. геогр. наук, зав. отделом (лаборатории) четвертичной геологии и геоморфологии, засл. деятель науки КАССР, награждена орденом «Знак Почета» [Щипцов, Голованова, 2006; Бискэ…, 2007; Ученые…, 2012; Шелехова, 2021]; Богачев Алексей Иванович, геолог, петрограф, канд. геол.-мин. наук, зав. лаборатории металлогении, засл. деятель науки КАССР, ветеран ВОВ, награжден орденами и медалями [Ученые…, 2012; Щипцов, 2021]; Борисов Петр Алексеевич, геолог, петрограф, проф., докт. геол.-мин. наук, зав. отделом минерального сырья, директор института, награжден дважды Орденом Трудового Красного Знамени, засл. деятель науки КАССР [Соколов, 1972; Ученые…, 2012; Борисов…, 2013; Ковалевский, Щипцов, 2021]; Володичев Олег Иванович, геолог, петролог, докт. геол.-мин. наук, гл. научн. сотр., засл. деятель науки Республики Карелия [Володичев…, 2008, Ученые…, 2012]; Галдобина Людмила Павловна, геолог, петрограф, канд. геол.-мин. наук, ст. научн. сотр. [Ученые…, 2012; Галдобина…, 2017]; Горьковец Валентин Яковлевич, геолог, докт. геол.-мин. наук, ст. научн. сотр., зам. директора по научной работе, зав. лаборатории, засл. деятель науки Республики Карелия [Ученые…, 2012]; Гродницкий Лев Львович, геолог, петрограф, геохимик, докт. геол.-мин. наук, вед. научн. сотр., засл. деятель науки Республики Карелия, диплом первооткрывателя месторождения [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012]; Данилевская Людмила Александровна, геолог, канд. геол.-мин. наук, ст. научн. сотр., лауреат Фонда содействия отечественной науке по программе «Выдающиеся ученые» [Ученые…, 2012]; Демидов Николай Федорович, геолог, канд. геол.-мин. наук, ст. научн. сотр., ученый секретарь, ветеран ВОВ [Ученые…, 2012]; Калинин Юрий Клавдиевич, инженер-технолог, докт. техн. наук, зав. отделом, засл. деятель науки Республики Карелия, засл. работник народного хозяйства Республики Карелия, награжден орденом Трудового Красного Знамени, диплом первооткрывателя месторождения [Ученые…, 2012; Ковалевский, Щипцов, 2021]; Ковалевский Владимир Викторович, физик, докт. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, засл. деятель науки Республики Карелия [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012]; Кожевников Владимир Николаевич, геолог, докт. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, засл. деятель науки Республики Карелия [Ученые…, 2012; Кожевников…, 2016]; Кочнев-Первухов Владимир Ильич, геолог, канд. геол.-мин. наук, ст. научн. сотр., лауреат двух премий Правительства России [Ученые…, 2012]; Кратц Кауко Оттович, геолог, докт. геол.-мин. наук, чл.-корр. АН СССР, директор института, награжден премией им. А. П. Карпинского, лауреат Госпремии СССР, кавалер двух орденов Трудового Красного Знамени, на здании института установлена мемориальная доска «К. О. Кратц» [Кратц…, 2004; Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Слабунов, Первунина, 2021]; Куликов Вячеслав Степанович, геолог, докт. геол.-мин. наук, чл.-корр. РАЕН, зав. лаборатории, засл. деятель науки РФ и засл. деятель науки Республики Карелия, награжден орденом Почета и медалью «За доблестный труд» [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Куликова и др., 2021]; Лак Гарри Цалелович, геоморфолог, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотр., награжден орденом и медалями. Участник ВОВ [Лак, 2000; Горюнова, Лак, 2010; Ученые…, 2012]; Лукашов Анатолий Дмитриевич, геолог, канд. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» II степени [Лукашов…, 2010; Ученые…, 2012]; Нефедов Егор Васильевич, геолог, мл. научн. сотр., ветеран ВОВ [Ученые…, 2012]; Пекки Александр Степанович, геолог, канд. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, засл. работник народного хозяйства Республики Карелия, награжден золотой и бронзовой медалями ВДНХ СССР, диплом первооткрывателя месторождения [Пекки…, 2009; Ученые…,

2012]; Первунина Аэлита Валериевна, геолог, канд. геол.-мин. наук, ученый секретарь института по настоящее время, ст. научн. сотр. [Ученые…, 2012; Аэлита Валериевна Первунина…, 2019]; Робонен Вильям Иванович, геолог, канд. геол.-мин. наук, заведующий лаборатории, засл. деятель науки КАССР, награжден орденом Трудового Красного Знамени, нагрудными знаками «Отличник разведки недр» и «Почетный разведчик недр» [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Робонен…, 2015]; Рожкова Наталья Николаевна, физик, докт. хим. наук, зав. лаборатории, лауреат премии комсомола Карелии в области науки, награждена серебряной медалью ВДНХ СССР, засл. деятель науки Республики Карелия [Ученые…, 2012]; Рыбаков Сергей Иванович, геолог, докт. геол.-мин. наук, директор, засл. деятель науки РФ и засл. деятель науки Республики Карелия, памятная медаль М. В. Ломоносова [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Рыбаков…, 2024]; Рылеев Александр Васильевич, геолог, канд. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, награжден орденом «Знак Почета», серебряной и тремя бронзовыми медалями ВДНХ СССР [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012]; Светов Анатолий Павлович, геолог, докт. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, председатель Европейской палеовулканологической комиссии, засл. деятель науки Республики Карелия [Светов…, 2006; Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012]; Светов Сергей Анатольевич, геолог, геохимик, докт. геол.-мин. наук, директор, гл. научн. сотр., засл. деятель науки Республики Карелия [Ученые…, 2012; Сергей Анатольевич Светов…, 2019]; Свириденко Лината Петровна, геолог, петролог, геохимик, докт. геол.-мин. наук, вед. научн. сотр., засл. деятель науки Республики Карелия, награждена медалью «За трудовую доблесть» [Свириденко…, 2008; Ученые…, 2012]; Слабунов Александр Иванович, геолог, петролог, докт. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, главный научн. сотр., эксперт Министерства образования и науки РФ, эксперт РАН, Почетная грамота Президента РФ, Почетный работник науки и высоких технологий РФ [Ученые…, 2012; Слабунов…, 2023]; Соколов Владимир Алексеевич, геолог, докт. геол.-мин. наук, почетный доктор философии ун-та г. Оулу (Финляндия), засл. деятель науки КАССР, депутат ВС КАССР, на здании ИГ установлена мемориальная доска [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Медведев, 2021; Щипцов, 2024]; Соколов Григорий Николаевич, бессменный переводчик [Соколов, 2026]; Стенарь Михаил Михайлович, геолог, петролог, канд. геол.-мин. наук, зам. директора по науке, ст. научн. сотр., награжден орденом «Знак Почета» [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012]; Степанова Александра Владимировна, геолог, канд. геол.-мин. наук, зам. директора по научной работе, вед. научн. сотр., лауреат Фонда содействия отечественной науке по программе «Выдающиеся ученые» [Ученые…, 2012]; Филиппов Михаил Михайлович, геофизик, докт. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, засл. деятель науки Республики Карелия [Ученые…, 2012]; Хазов Руф Андреевич, геолог, канд. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, ст. научн. сотр, засл. геолог Республики Карелия, Meister der Arbeit – Мастер труда ГДР [Хазов, 2010; Ученые…, 2012]; Хейсканен Ким Иванович, геолог, докт. геол.-мин. наук, и. о. директора, зав. лаборатории, засл. деятель науки Республики Карелия [Ученые…, 2012; Щипцов, 2023]; Чаженгина Светлана Юрьевна, геохимик, канд. геол.-мин. наук, ст. научн. сотр., лауреат Фонда содействия отечественной науке по программе «Выдающиеся ученые» [Ученые…, 2012]; Шаров Николай Владимирович, геофизик, докт. геол.-мин. наук, зав. лаборатории, засл. деятель науки РФ, академик РАЕН, лауреат премии им. Субботина нац. академии наук Украины, награжден медалью «За трудовое отличие» [Шаров, 2002; Ученые…, 2012; Шаров, 2012; Открытие и разведка…, 2014]; Шеков Виталий Александрович, горный инженер, канд. техн. наук, зам. директора по научной работе, зав. лаборатории, вед. научн. сотр., чл. высшего совета Ассоциации горнопромышленников Карелии, эксперт России по недропользованию [Ученые…, 2012]; Щипцов Владимир Владимирович, геолог, докт. геол.-мин. наук, директор института, гл. научн. сотр., засл. деятель науки РФ, засл. деятель науки Республики Карелия, золотой нагрудный знак «Ученый 2010 года», награжден медалью «За заслуги перед Республикой Карелия», председатель комиссии по технологической минералогии РМО, член бюро научного совета РАН по физико-химическим методам обогащения [Щипцов, Голованова, 2006; Ученые…, 2012; Юдин Борис Александрович, геолог, канд. геол.-мин. наук, ст. научн. сотр., ветеран ВОВ, награжден орденами и медалями [Ученые…, 2012]; Юдин Виктор Николаевич, геолог, геохимик, научный сотр., зав. геологическим музеем, ветеран ВОВ [Ученые…, 2012].

Приведенный перечень, разумеется, не охватывает всех, кто в разные годы внес свой вклад в развитие института. Многие остались за рамками этого списка, но их работа – в публикациях, отчетах, картах и в тех научных направлениях, которые продолжают жить

и сегодня. Важно, что этот список наглядно демонстрирует преемственность поколений: от ветеранов Великой Отечественной войны, стоявших у истоков, до признанных лидеров современной геологической науки. Именно этот кадровый потенциал, сочетающий глубокие традиции и молодую энергию, позволяет Институту геологии КарНЦ РАН успешно решать как фундаментальные, так и прикладные задачи, оставаясь одним из ведущих академических центров Северо-Запада России.

Заключение

Сегодня Институт геологии КарНЦ РАН вступает в новый период своей истории, сохраняя верность фундаментальным традициям и одновременно отвечая на вызовы времени. Его деятельность сконцентрирована на трех ключевых научных направлениях, каждое из которых имеет как академическое, так и практическое измерение.

Первое направление – это глобальные корреляции докембрия, минерагения и оценка минерально-сырьевого потенциала Республики Карелия. Здесь институт выступает «хранителем знаний» о ранней истории Земли, и одновременно – экспертом, определяющим стратегию освоения недр региона. Второе – комплексные технологии переработки и использования шунгитов, промышленных минералов и горных пород, включая исследования наноструктур и нанотехнологий. Этот блок соединяет классическую минералогию с передовыми инженерными решениями, открывая новые возможности для региональной экономики. Третье – геотектоника докембрия, неотектоника, сейсмичность и геоэкология Северо-Запада России – направление, обращенное не только в прошлое, но и в будущее: оно связано с безопасностью территорий, прогнозированием природных процессов и устойчивым развитием региона.

Однако научные задачи – лишь часть общего движения. В условиях смены эпох и технологических укладов институт видит свою миссию в том, чтобы не просто наращивать объем знаний, но и формировать новое поколение исследователей – мобильных, междисциплинарных, готовых соединять академические подходы с практическим применением фундаментальных результатов. Меняется структура института, обновляются лаборатории, трансформируются научные программы – но неизменным остается главное: стремление коллектива быть на переднем крае геологической науки. История карельской геологии продолжается – не как музейная хроника, а как живой процесс, в котором каждый новый день вносит свою строку в ее летопись.

Литература

60 лет Институту геологии КарНЦ РАН // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 2. С. 78–99.

Александр Иванович Слабунов (к 65-летию со дня рождения) / Ред. колл. серии «Геология докембрия» // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 2. С. 91–95.

Аэлита Валериевна Первунина (к 50-летию со дня рождения) / Ред. колл. серии «Геология докембрия» // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 10. С. 99–102.

Бискэ Галина Сергеевна. К 90-летию со дня рождения / Сост. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 56 с.

Борисов Петр Алексеевич. Посвящается 135-летию со дня рождения П. А. Борисова / Отв. за выпуск В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 66 с.

Володичев Олег Иванович / Отв. сост. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 43 с.

Галдобина Людмила Павловна. К 90-летию со дня рождения / Сост. Л. С. Скамницкая, В. В. Щипцов, Т. П. Бубнова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 41 с.

Геология Карелии от архея до наших дней // Материалы докладов Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Института геологии КарНЦ РАН. Петрозаводск, 24–26 мая 2011 года. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 220 с.

Геологическое образование в Петрозаводском государственном университете / Сост.: Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 104 с.

Горюнова Н. Н., Лак Г. Ц. Геологическая судьба Надежды и Гарри (биографический очерк) / Отв. за выпуск В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 53 с.

Дорога горных промыслов / Отв. ред. В. А. Шеков. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 362 с.

Институт геологии. Петрозаводск: Издательский дом «ПИН», 2011. 15 с.

Карельский филиал Академии наук СССР (к 25-летию со дня основания) / Отв. ред. Н. И. Пьявченко. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1970. 224 с.

Ковалевский В. В., Щипцов В. В. Шунгиты: от научного поиска к промышленному внедрению / Отв. ред. А. Ф. Титов // Карельский научный центр РАН: история в лицах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 119–131.

Кожевников Владимир Николаевич / Отв. за выпуск. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 82 с.

Кратц Кауко Оттович. К 90-летию со дня рождения / Сост. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 48 с.

Куликова В. В., Куликов В. С., Бычкова Я. В., Кузнецова Е. В. Не потеряться во времени (история, воспоминания, ожидания). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 161 с.

Лак Г. Ц. Во власти своей судьбы: повесть о жизни. Петрозаводск: Карелия, 2000. 240 с.

Лукашов Анатолий Дмитриевич / Отв. за выпуск В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 51 с.

Медведев П. В. Удивительный карельский самородок / Отв. ред. А. Ф. Титов // Карельский научный центр РАН: история в лицах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 333–345.

Основные результаты научных исследований Института геологии КарНЦ РАН 2009–2012 по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2008–2012 гг. VII. Науки о Земле / Сост.: В. В. Щипцов, С. А. Светов, А. В. Первунина. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 102 с.

Основные результаты научных исследований Института геологии КарНЦ РАН в 2013 году по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. VIII. Науки о Земле / Сост.: В. В. Щипцов, С. А. Светов, А. В. Первунина. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 32 с.

Основные результаты научных исследований Института геологии КарНЦ РАН 2014 г. по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. VIII. Науки о Земле / Сост.: В. В. Щипцов, С. А. Светов, А. В. Первунина. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 31 с.

Основные результаты научных исследований Института геологии КарНЦ РАН в 2015 году по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. Раздел VIII. Науки о Земле / Сост.: В. В. Щипцов, С. А. Светов, А. В. Первунина. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 30 с.

Основные результаты научных исследований Института геологии КарНЦ РАН в 2016 году по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. Раздел IX. Науки о Земле / Сост.: В. В. Щипцов, С. А. Светов, А. В. Первунина. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 32 с.

Основные результаты научных исследований Института геологии КарНЦ РАН в 2017 году по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. Раздел IX. Науки о Земле / Сост.: С. А. Светов, А. В. Первунина. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 32 с.

Открытие и разведка Костомукшского железорудного месторождения / Сост. Н. В. Шаров // Учебное пособие для студентов горно-геологического факультета. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 104 с.

Пекки Александр Степанович. К 85-летию со дня рождения / Сост.: В. В. Щипцов, Л. С. Скамницкая. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 72 с.

Пудовкин Виктор Григорьевич / Сост. В. В. Травин. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 49 с.

Рахманова А. В. История геокинологических исследований в Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2026. 99 с.

Робонен Вильям Иванович / Сост. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 69 с.

Рыбаков Сергей Иванович. К 85-летию со дня рождения / Ред. колл.: С. А. Светов, А. В. Первунина, Д. С. Рыбаков, Н. Б. Лаврова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2024. 66 с.

Сергей Анатольевич Светов (к 50-летию со дня рождения) / Ред. колл. серии «Геология докембрия» // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 10. С. 94–98.

Светов Анатолий Павлович. К 70-летию со дня рождения / Сост. В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 58 с.

Светова Алла Ивановна. К 80-летию со дня рождения / Сост. С. А. Светов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 63 с.

Свириденко Лината Петровна. К 75-летию со дня рождения / Сост. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 44 с.

Слабунов А. И., Первунина А. В. Становление школы геологии докембрия на Северо-Западе России / Отв. ред. А. Ф. Титов // Карельский научный центр РАН: история в лицах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 173–189.

Соколов В. А. Человек, влюбленный в камень. Рассказ о жизни и деятельности профессора Петра Алексеевича Борисова. Петрозаводск: Карелия, 1972. 108 с.

Соколов Г. Н. Поймай свою мечту. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2025. 103 с.

Ученые Карельского научного центра. Биографический словарь (3-е дополненное и переработанное издание) / Гл. ред. А. Ф. Титов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 420 с.

Хазов Р. А. И нельзя повернуть назад / Отв. за выпуск В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 82 с.

Хохлов С. К., Новикова Ю. А. Академическая наука в Карелии: люди, события и факты. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 122 с.

Чернов Владимир Михайлович / Отв. за выпуск В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 40 с.

Шаров Н. В. Выбор пути. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 95 с.

Шаров Н. В. В пути. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 70 с.

Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б. Первая в Карелии женщина-доктор наук / Отв. ред. А. Ф. Титов // Карельский научный центр РАН: история в лицах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 17–27.

Щипцов В. В. Карельский ученый-геолог Владимир Алексеевич Соколов // Труды Карельского научного центра РАН (серия «Геология докембрия»). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2024. № 6. С. 68–84.

Щипцов В. В. К 85-летию со дня рождения Кима Ивановича Хейсканена (1938–2011) // Труды Карельского научного центра РАН (серия «Геология докембрия»). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. № 2. С. 87–90.

Щипцов В. В. Алексей Иванович Богачев (1921–1999) // Труды Карельского научного центра РАН (серия «Геология докембрия»). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. № 10. С. 109–111.

Щипцов В. В. Служитель геологии Карело-Кольского региона / Отв. ред. А. Ф. Титов // Карельский научный центр РАН: история в лицах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 43–56.

Щипцов В. В., Голованова Л. С. Институт геологии // Академическая наука в Карелии 1946–2006. М.: Наука, 2006. С. 153–221.

Щипцов В. В., Светов С. А., Первунина А. В. Институт геологии КарНЦ РАН – история научных исследований (к 55-летию образования) // Труды Карельского научного центра РАН (серия «Геология докембрия»). 2016. № 10. С. 3–33.

Щипцов Владимир Владимирович. К 75-летию со дня рождения и 50-летию творческой деятельности / Сост.: С. А. Светов, В. А. Шеков, А. В. Первунина, Л. С. Скамницкая, Т. П. Бубнова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 98 с.

References

60 years of the Institute of Geology of the KarRC RAS. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2021;2:78–99. (In Russ.)

Aelita Valerievna Pervunina (on the 50th anniversary of her birth). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2019;10:99–102. (In Russ.)

Alexander Ivanovich Slabunov (on the 65th anniversary of his birth). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2023;2:91–95. (In Russ.)

Biske Galina Sergeevna. To the 90th anniversary of her birth. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 56 p. (In Russ.)

Borisov Pyotr Alekseevich. Dedicated to the 135th anniversary of the birth of P. A. Borisov. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 66 p. (In Russ.)

Chernov Vladimir Mikhailovich. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2013. 40 p. (In Russ.)

Discovery and exploration of the Kostomuksha iron ore deposit. Compiled by N. V. Sharov. *Uchebnoe posobie dlya studentov gorno-geologicheskogo fakul'teta = A textbook for students of the Mining and Geological Faculty.* Petrozavodsk: PetrSU; 2014. 104 p. (In Russ.)

Galdobina Lyudmila Pavlovna. To the 90th anniversary of her birth. Eds. L. S. Skamnitskaya, V. V. Shchiptsov, T. P. Bubnova. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2017. 41 p. (In Russ.)

Geological education at Petrozavodsk State University. Eds. N. V. Sharov, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: PetrSU Publ.; 2008. 104 p. (In Russ.)

Goryunova N. N., Lak G. Ts. The geological fate of Nadezhda and Garry (biographical essay). Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 53 p. (In Russ.)

Institute of Geology. Petrozavodsk: PIN; 2011. 15 p. (In Russ.)

Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences (on the 25th anniversary of its foundation). Ed. by N. I. Piavchenko. Petrozavodsk: Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1970. 224 p. (In Russ.)

Khazov R. A. And it is impossible to turn back. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 82 p. (In Russ.)

Khokhlov S. K., Novikova Yu. A. Academic science in Karelia: people, events, and facts. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2016. 122 p. (In Russ.)

Kozhevnikov Vladimir Nikolaevich. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2016. 82 p. (In Russ.)

Kratz Kauko Ottovich. To the 90th anniversary of his birth. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2004. 48 p. (In Russ.)

Kulikova V. V., Kulikov V. S., Bychkova Ya. V., Kuznetsova E. V. Not to get lost in time (history, memories, and expectations). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. 161 p. (In Russ.)

Lak G. Ts. In the power of the destiny. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. 240 p. (In Russ.)

Lukashov Anatoly Dmitrievich. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 51 p. (In Russ.)

Main research results of the Institute of Geology of the KarRC RAS in 2009–2012 under the program of fundamental scientific research of the State Academies of Sciences for 2008–2012. VII. Earth Sciences. Compiled by V. V. Shchiptsov, S. A. Svetov, A. V. Pervunina. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 102 p. (In Russ.)

Main research results of the Institute of Geology of the KarRC RAS in 2013 under the program of fundamental scientific research of the State Academies of Sciences for 2013–2020. VIII. Earth Sciences. Compiled by V. V. Shchiptsov, S. A. Svetov, A. V. Pervunina. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 32 p. (In Russ.)

Main research results of the Institute of Geology of the KarRC RAS in 2014 according to the program of fundamental scientific research of the State Academies of Sciences for 2013–2020. VIII. Earth Sciences. Compiled by V. V. Shchiptsov, S. A. Svetov, A. V. Pervunina. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. 31 p. (In Russ.)

Main research results of the KarRC RAS Institute of Geology in 2015 under the program of fundamental scientific research of the State Academies of Sciences for 2013–2020. Section VIII. Earth Sciences. Compiled by V. V. Shchiptsov, S. A. Svetov, A. V. Pervunina. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2016. 30 p. (In Russ.)

Main research results of the Institute of Geology of the KarRC RAS in 2016 under the program of fundamental scientific research of the State Academies of Sciences for 2013–2020. Section IX. Earth Sciences. Compiled by V. V. Shchiptsov, S. A. Svetov, A. V. Pervunina. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2017. 32 p. (In Russ.)

Main research results of the Institute of Geology of the KarRC RAS in 2017 under the program of fundamental scientific research of the State Academies of Sciences for 2013–2020. Section IX. Earth Sciences. Compiled by S. A. Svetov, A. V. Pervunina. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018. 32 p. (In Russ.)

Medvedev P. V. The amazing Karelian nugget. *Karelian Research Centre of the RAS: history in person.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. P. 333–345. (In Russ.)

Pudovkin Viktor Grigorievich. Ed. by V. V. Travin. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2018. 49 p. (In Russ.)

Rakhmanova A. V. History of geokinological research in Karelia. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2026. 99 p. (In Russ.)

Scientists of the Karelian Research Centre. Biographical dictionary (3rd expanded and revised edition). Ed. by A. F. Titov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 420 p. (In Russ.)

Sergey Ivanovich Rybakov. On the 85th anniversary of his birth. Eds. S. A. Svetov, A. V. Pervunina, D. S. Rybakov, N. B. Lavrova. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2024. 66 p. (In Russ.)

Sergey Anatolyevich Svetov (on the 50th anniversary of his birth). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2019;10:94–98. (In Russ.)

Sharov N. V. Choosing a path. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 95 p. (In Russ.)

Sharov N. V. On the way. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2022. 70 p. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. Karelian scientist-geologist Vladimir Alekseevich Sokolov. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024;6:68–84. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. On the 85th anniversary of the birth of Kim Ivanovich Heiskanen (1938–2011). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023;2:87–90. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. Alexey Ivanovich Bogachev (1921–1999). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2021;10:109–111. (In Russ.)

Shchiptsov V. V. Minister of geology of the Karelo-Kola region. Ed. by A. F. Titov. Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences: history in person. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2021. P. 43–56. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Skamnitskaya L. S. (eds.) Alexander Stepanovich Pekki. On the 85th anniversary of his birth. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2009. 72 p. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Svetov S. A., Pervunina A. V. Institute of Geology of the KarRC RAS – history of scientific research (on the 55th anniversary of its formation). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;10:3–33. (In Russ.)

Shchiptsov V. V., Golovanova L. S. Institute of Geology. *Akademicheskaya nauka v Karelii 1946–2006 = Academic Science in Karelia in 1946–2006*. Moscow: Nauka; 2006. P. 153–221. (In Russ.)

Shchiptsov Vladimir Vladimirovich. On the 75th anniversary of his birth and the 50th anniversary of his creative activity. Eds. S. A. Svetov, V. A. Shekov, A. V. Pervunina, L. S. Skamnitskaya, T. P. Bubnova. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2016. 98 p. (In Russ.)

Shelekhova T. S., Lavrova N. B. The first female Doctor of Sciences in Karelia. Ed. by A. F. Titov. Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences: history in person. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. P. 17–27. (In Russ.)

Slabunov A. I., Pervunina A. V. Formation of the Precambrian school of geology in Northwestern Russia. Ed. by A. F. Titov. Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences: history in person. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2021. P. 173–189. (In Russ.)

Sokolov V. A. A man in love with a stone. A story about the life and work of Professor Pyotr Alekseevich Borisov. Petrozavodsk: Karelia; 1972. 108 p. (In Russ.)

Sokolov G. N. Catch your dream. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2025. 103 p. (In Russ.)

Svetov Anatoly Pavlovich. On the 70th anniversary of his birth. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. 58 p. (In Russ.)

Svetova Alla Ivanovna. On the 80th anniversary of her birth. Ed. by S. A. Svetov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2017. 63 p. (In Russ.)

Sviridenko Linata Petrovna. On the 75th anniversary of her birth. Ed. by N. V. Sharov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 44 p. (In Russ.)

The geology of Karelia from the Archean to the present day. *Materialy dokladov Vserossiiskoi konf., posvyashch. 50-letiyu Instituta geologii KarNTs RAN. Petrozavodsk, 24–26 maya 2011 goda = Proceed. of the All-Russ. conf. dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Geology of the KarRC RAS. Petrozavodsk, May 24–26, 2011*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 220 p. (In Russ.)

The road of mining. Ed. by V. A. Shekov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 362 p. (In Russ.)

Volodichev Oleg Ivanovich. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 43 p. (In Russ.)

William Ivanovich Robonen. Ed. by V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2014. 69 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 10.08.2026; принята к публикации / accepted: 09.09.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Щипцов Владимир Владимирович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории рудообразующих систем и минеральных ресурсов ИГ КарНЦ РАН, профессор ПетрГУ

e-mail: vv.shchiptsov@gmail.com

Светов Сергей Анатольевич

д-р геол.-мин. наук, директор, главный научный сотрудник лаборатории литологии и геохимии

e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Первунина Аэлита Валериевна

канд. геол.-мин. наук, ученый секретарь, старший научный сотрудник

e-mail: aelita@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Shchiptsov, Vladimir

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Professor

Svetov, Sergey

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Director, Chief Researcher

Pervunina, Aelita

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Secretary for Science, Senior Researcher

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 168–169
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 168–169

XVII РОССИЙСКИЙ СЕМИНАР ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

22 мая 2026 года состоялся XVII Российский семинар по технологической минералогии. Площадкой для проведения данного мероприятия стал Институт геологии Коми НЦ УрО РАН им. Н. П. Юшкина в г. Сыктывкаре. Организаторами семинара были Комиссия по технологической минералогии РМО, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН и Институт геологии КарНЦ РАН. Семинар принял эстафету от участников Российской конференции с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения–2026)». Это мероприятие, посвященное 90-летию со дня рождения академика Николая Павловича Юшкина, также проходило в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН им. Н. П. Юшкина.



Группа участников XVII семинара по технологической минералогии в зале заседаний Ученого совета Института геологии Коми НЦ УрО РАН. В центре в первом ряду слева направо – ученый секретарь комиссии Е. Н. Светова, председатель комиссии В. В. Щипцов, члены бюро комиссии Е. Г. Ожогина и О. Б. Котова, крайний справа – директор ИГ Коми НЦ УрО РАН И. Н. Бурцев

С докладами на семинаре выступили:

Данилова С. Н. (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», Якутск). Волластонит из техногенного сырья как перспективный модификатор: области применения.

Механошин А. С., соавтор Гвоздкова А. Ю. (Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск). Распределение железа между оксидами, силикатами и сульфидами в Костомукшском месторождении железистых кварцитов.

Ожогина Е. Г., соавтор Котова О. Б. (ВИМС, Москва; ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар). Технологическая минералогия твердых полезных ископаемых. Новые вызовы.

Щипцов В. В., соавтор Фролов П. В. (ИГ ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск, ПетрГУ, Петрозаводск). Современное состояние геолого-минералогической изученности металлов и промышленных минералов Арктической зоны Республики Карелия.

Левченко Е. Н., соавтор Соленикова Е. О. (ИМГРЭ, Москва). Минералого-технологическая оценка редкометалльных объектов Тамбовского россыпного района ЦФО.

Понарядов А. В. (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар). Фазовые трансформации минералов труднообогатимых титановых руд.

Корекина М. А. (Южно-Уральский ФИЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс). Минералогия жильного кварца Южного Урала и его технологический потенциал.

Светова Е. Н., соавторы Бубнова Т. П., Скамницкая Л. С. (ИГ ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск). Получение высокочистых кварцевых концентратов из низкосортного кварцевого сырья на примере объектов Карелии.

Купцова А. В., соавтор Аксенова Г. А. (АО «Механобр-инжиниринг», Санкт-Петербург). Применение автоматического анализатора изображения с использованием глубокого машинного обучения в АО «Механобр-инжиниринг».

Купцова А. В., соавторы Попова Е. А., Свешников А. Н. (АО «Механобр-инжиниринг», Санкт-Петербург). Специфика минералогических исследований флотационных продуктов, содержащих тонкодисперсное золото.

Перовский И. А. (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар). Synroc керамика на основе титаносиликатов для иммобилизации цезия.

Шушков Д. А., соавторы Перовский И. А., Броварова О. В., Бурцев И. Н., Веселков Е. А., Габов А. В. (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; Институт агробиотехнологий ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; ООО «Вершина», Сыктывкар). Вторичные минеральные ресурсы предприятий лесопромышленного комплекса: вещественный состав и перспективы использования.

В заключительном выступлении председатель комиссии по технологической минералогии РМО В. В. Щипцов отметил высокий уровень проведенного мероприятия, в котором приняли участие авторитетные специалисты России в области технологической минералогии, и поблагодарил директора института И. Н. Бурцева за гостеприимство и участие в семинаре.

На заседании комиссии было предложено и одобрено ввести в состав комиссии по технологической минералогии – Марию Александровну Корекину (Южно-Уральский ФИЦ минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс), Игоря Андреевича Перовского и Дмитрия Александровича Шушкова (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар).

В. В. Щипцов

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 170–171
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 170–171

100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ВИЛЬЯМА ИВАНОВИЧА РОБОНЕНА (1926–2014)



Робонен Вильям Иванович родился 17 июля в д. Мистолово Панголовского р-на Ленинградской обл. Геолог-петрограф, кандидат геол.-мин. наук, ученое звание «старший научный сотрудник». В 1945 году большое впечатление произвел на Вильяма Ивановича профессор П. А. Борисов, с которым в дальнейшем его связывало тесное сотрудничество в различные периоды. Студентом Вильям Робонен был принят временно рабочим в сектор геологии Карело-Финской научной базы АН СССР. П. А. Борисов подписал приказ о направлении в экспедицию на Шуезерское месторождение медных руд. В 1949 году Вильям Иванович окончил с отличием геологический факультет Карело-Финского университета (ныне ПетрГУ) по специальности «минералогия-петрография». После завершения учебы в университете был принят на работу в Карело-Финский филиал АН СССР. В академической организации он прошел путь от должности младшего научного сотрудника, старшего научного сотрудника, с 1961 года – ученый секретарь созданного Института геологии, зав. отделом (лаборатории) региональной геологии, зав. сектором стратиграфии, ведущий научный сотрудник, заведующий Геологическим музеем института, начальник информационно-фондового отделения и ведущий специалист экспертно-геологического отделения Комитета по геологии и использованию недр Республики Карелия. Работая в Карелнедра, В. И. Робонен оказал большую помощь в организации спонсорской поддержки, связанной с реконструкцией музея в Институте геологии.

С 1949 по 1952 годы – аспирант Ленинградского госуниверситета, в 1953 защитил кандидатскую диссертацию на тему «Стратиграфия нижнего протерозоя Шуезерской зоны карелид». С 1952 по 1957 годы – старший преподаватель на геологоразведочном факультете Карело-Финского госуниверситета (с 1956 – ПетрГУ). Читает лекции по дисциплинам «Геологическое картирование» и «Геотектоника», с 2004 года – преподаватель на кафедре

геологии и геофизики горно-геологического факультета ПетрГУ (курс «Стратиграфия докембрия Фенноскандинавского щита»).

Занимался научными проблемами стратиграфии, палеовулканологии и металлогении раннего докембрия Фенноскандинавского щита. Вильям Иванович разработал оригинальный геокинологический метод поиска полезных ископаемых. В шестидесятые годы по его инициативе институт провел опытные работы по изучению возможностей использования собак при поисках полезных ископаемых. Он обоснованно считал, что собаки обнаруживают сульфидные рудные тела, покрытые наносами.

В. И. Робонен сыграл важную роль в активизации интереса к железным рудам Костомукши в 1968–1969 годах во время научных командировок в Финляндию. В это время в г. Раахе при участии советских специалистов сооружалось металлургическое предприятие, которое планировалось обеспечивать шведской железной рудой. Информация В. И. Робонена о Костомукшском железорудном месторождении заинтересовала финских специалистов, встал вопрос о возможном совместном освоении, что в дальнейшем привело к практическому решению важного экономического вопроса. Во всех этих мероприятиях В. И. Робонен участвовал в качестве эксперта. До последних дней он активно консультировал по минеральному сырью строительного назначения предпринимателей Финляндии, Италии и других зарубежных компаний. В определенные временные отрезки был членом Комиссии по геологической изученности СССР (1960–1990), членом Межведомственной стратиграфической комиссии СССР (1958–1965) и Межведомственной стратиграфической комиссии России (1986–1998), председателем Российской Межведомственной стратиграфической комиссии по Северо-Западу России (1994–1998), заместителем председателя Высшего горного совета Ассоциации горнопромышленников Республики Карелия. В середине 70-х и в 80-е годы был секретарем первичной партийной организации Карельского НЦ АН СССР, избирался в состав Петрозаводского горкома КПСС.

Опубликовал более 150 работ самостоятельно и в соавторстве: «Серноколчеданные месторождения Карелии» (1978); «Вулканические постройки протерозоя Карелии» (1978); «Сводная корреляционная схема докембрия Карело-Кольского региона» (1990); «Nickel-copper deposits of the Baltic Shield and Scandinavian Caledonids» (1985); «Geology Survey of Finland, Bull. 333 with appendix of General geological map of the Baltic Shield. 1: 2 500 000» (1985) и др.

Действительный член Всесоюзных Географического (1948), ныне РГО, и Минералогического (1975), ныне РМО, обществ. Иностранный член Геологического общества Финляндии.

Награжден Орденом Трудового Красного Знамени, Памятной медалью МАНПО (1995), нагрудными знаками «Отличник разведки недр» (1967), «Почетный разведчик недр» (1996), нагрудным знаком «Горняцкая слава» I степени (2011), памятной медалью Международной академии наук о природе и обществе, Почетными грамотами АН СССР, РАН, г. Петрозаводска и Правительства КАССР, ассоциации Горнопромышленников РК. Заслуженный деятель науки КАССР (1969).

В 2011 году в конференц-зале Института геологии состоялось совместное заседание Ученого совета ИГ КарНЦ РАН, Высшего горного совета Ассоциации горнопромышленников Карелии и Карельского отделения РМО, посвященное 85-летию со дня рождения Вильяма Ивановича Робонена. Широкий кругозор и эрудиция во многих геологических сферах, организаторский талант, замечательные человеческие качества были отмечены при чествовании.

В столетие со дня рождения Вильяма Ивановича Робонена мы бережно храним память о нем.

Редакционная коллегия серии
«Геология докембрия»

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 172–173
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 172–173

100 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЭЛЕОНОРЫ ИВАНОВНЫ ДЕВЯТОВОЙ (1926–2011)



Элеонора Ивановна Девятова, известный советский и российский геолог-палеограф, кандидат геол.-мин. наук, стояла у истоков четвертичной геологии в Институте геологии Коми научного центра УрО РАН. Родилась 14 июня 1926 года в г. Чите. После окончания МГУ им. М.В. Ломоносова в 1950 году поступила на работу в Архангельский стационар АН СССР на должность старшего лаборанта. С 1957 года перешла на работу в отдел геологии Коми филиала АН СССР младшим научным сотрудником. Далее защитила в МГУ кандидатскую диссертацию на тему «Стратиграфия четвертичных отложений и палеогеография четвертичного периода бассейна реки Онеги».

Э.И. Девятова занималась изучением геоморфологии, стратиграфии и палеогеографии четвертичных отложений в бассейне р. Мезени. По разрезам бассейна р. Онеги ею разработана палеонтологически обоснованная схема стратиграфии отложений четвертичного периода, принятая для государственной геологической карты масштаба 1: 200 000. Впервые были составлены спорово-пыльцевые диаграммы и построена карта рельефа дочетвертичных пород. Доказаны самостоятельность московского оледенения, отсутствие в исследованном районе неоплейстоценового оледенения и послевалдайской морской трансгрессии. Уточнены границы бореальной трансгрессии и детально описано строение и история образования долины р. Онеги и ее притоков.

С 1962 года перешла на работу в Институт геологии в г. Петрозаводске, в котором проработала до ухода на пенсию в 1987 году. Будучи старшим научным сотрудником в лаборатории четвертичной геологии и геоморфологии, занималась изучением закономерностей развития четвертичной фауны и флоры с целью уточнения палинологических критериев четвертичных отложений Карело-Кольского региона. Благодаря ее усилиям было создано и получило развитие в институте палинологическое направление. Ее работы посвящены

стратиграфии и палеогеографии четвертичного периода, истории развития природной среды и особенностям расселения древнего человека в Карелии и Архангельской обл.

Элеонора Ивановна Девятова внесла огромный вклад в изучение и определение возраста беломорских петроглифов и стоянок. Совместно с экспедицией Ю. А. Савватеева и самостоятельно с 1964 по 1974 годы проводила полевые исследования в русле Нижнего Выга.

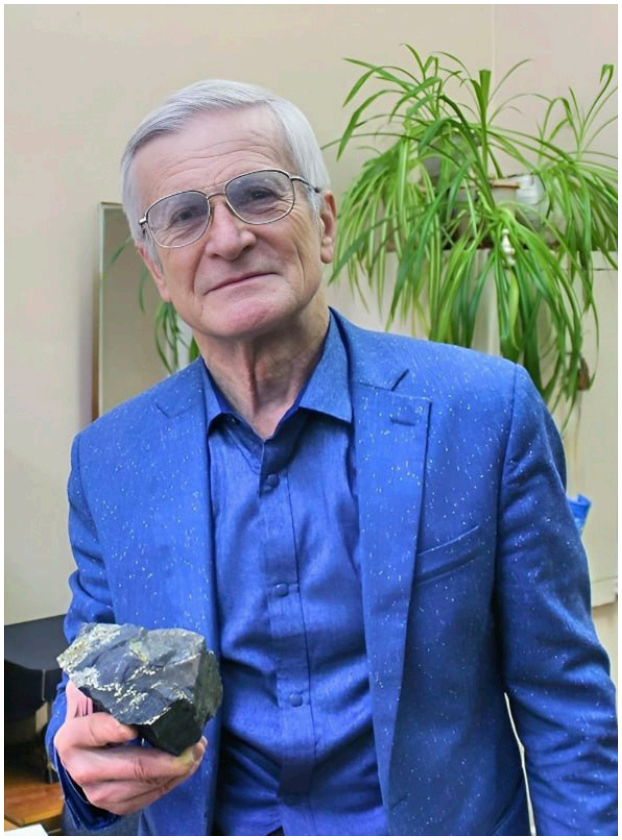
Опубликовано более 60 научных работ по стратиграфии и палеогеографии четвертичного периода, истории развития природной среды и особенностям расселения древнего человека в Карелии и Архангельской обл. Среди них монографии «Стратиграфия и палеогеография четвертичного периода бассейна реки Мезени» (1964); «Геология и палинология голоцена и хронология памятников первобытной эпохи в юго-западном Беломорье» (1973); «Природная среда плейстоцена и ее влияние на расселение человека в Северодвинском бассейне и в Карелии» (1982); «Природная среда и ее изменения в голоцене» (1986).

В год столетия со дня рождения Элеоноры Ивановны Девятовой мы с благодарностью вспоминаем ее и храним память о ней.

Редакционная коллегия серии
«Геология докембрия»

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 174–175
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 174–175

ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ КОВАЛЕВСКИЙ
(к 75-летию со дня рождения)



Владимир Викторович Ковалевский родился 19 июля 1951 года в с. Онжадово Гродненской обл. Физик, доктор геол.-мин. наук, заслуженный деятель науки РК. В 1973 году окончил физико-математический факультет Петрозаводского госуниверситета по специальности «рентгенометаллофизика».

В 1983 году – заочную аспирантуру Института кристаллографии АН СССР по специальности «физика твердого тела, кристаллография». В 1986 году защитил кандидатскую диссертацию «Электронографическое исследование шунгитов». С 1995 года – заведующий лаборатории шунгитов Института геологии. В 1996–1997 годах проходил стажировку при Аризонском университете (США) по теме «Исследование шунгитов в ряду углеродсодержащих пород с целью выявления их генезиса». В 2007 году защитил докторскую диссертацию «Углеродистое вещество шунгитовых пород: структура, генезис, классификация» по специальности «минералогия, кристаллография». Руководитель ряда грантов РФФИ, проекта 5650 «Исследование процессов получения нового комплексного наполнителя композиционных материалов на основе шунгитовых пород, содержащего углеродные гиперфуллереновые структуры и нановолокнистые карбиды кремния» по программе «Старт 05» Фонда содействия развитию малых форм предпринимательства в научно-технической сфере и др. Владимиром Викторовичем опубликовано 100 работ, из них два патента, в том числе: «Структурное состояние шунгитового углерода» (1994, в соавторстве); «Pyrolysis of hollow carbons on melted catalyst» (1998, soauthor.); «Comparison of carbon in shungite rocks to other natural carbons: An X-ray and TEM study» (2001, soauthor.); «Diamagnetism of natural fullerene-like carbon» (2005, soauthor.); «Шунгитовые породы – 50 лет научно-технологических исследований в Институте геологии» (2011, в соавторстве); «Shungites and their industrial potential» (2019, soauthor.); «Физико-химические свойства шунгитовых пород различных стратиграфических уровней заонежской свиты» (2020, в соавторстве); «Шунгитовые породы Карелии: от геологических исследований к перспективам

использования в инновационных технологиях» (2021, в соавторстве); «Mineralogical and technological classification of high-carbon industrial shungite rock types» (2023, soauthor.).

Результаты, полученные к настоящему времени, и последний опыт широкого практического использования шунгитовых пород показывают, что их деление на промышленные типы с учетом только химико-генетического подхода явно недостаточно. В реальных практических направлениях использования шунгитовых пород, по мнению Владимира Викторовича, возникает ряд проблем, связанных с их различием не только по химическому составу, но также по минеральному составу, структуре углеродистого вещества и пород в целом. И если по химическому составу разработаны и доступны сертификационные требования к сырью, то по структурным параметрам такие требования даже не рассматриваются. А именно структура углерода, как например, для графита и алмаза, определяет основные свойства шунгитовых пород. В постановке его исследований убедительно объясняется тот факт, что партии шунгитового сырья, однотипные по химическому составу, демонстрируют различные свойства, например, при использовании в металлургических процессах, одни – отличные, другие – удовлетворительные, а третьи вообще приводят к бракованной продукции и рекламациям.

В. В. Ковалевский считает, что без апробации шунгитовых пород в технологиях практического использования невозможно создать реальную геолого-промышленную классификацию рассматриваемого вида сырья. Работы, осуществленные в рамках ряда проектов и хоздоговорных работ, позволили в некоторой степени заполнить этот пробел. В частности, было установлено, что наиболее перспективными в качестве фильтрующего материала представляются породы второго стратиграфического уровня. Это было апробировано на опытно-промышленных площадках в Лаппеенранте на территории Финляндии во время испытаний и периодических контрольных тестов в сочетании с действенными микроорганизмами (проект SHEM-WP) «Инновационные природные решения для очистки воды на основе технологии Шунгиты – Эффективные Микроорганизмы»). В результате выполнения хоздоговорных работ с карельскими предприятиями (ООО «НЗТМ», ООО «ТДМ») определено различие даже одного стратиграфического уровня шунгитовых пород, например, из залежей Максово и Зажогино, в металлургических процессах, при получении карбида кремния, а также в сельском хозяйстве при изготовлении кормовых добавок.

В. В. Ковалевский утверждает, что процессы наноструктурирования шунгитовых пород, происходящие при высокотемпературной обработке (1400 °С и выше), определяют тип и строение породы, минералогический и микроэлементный состав, надмолекулярную и молекулярную структуру углеродистого вещества. Его исследования шунгитовых пород с различных стратиграфических уровней показывают, что в результате термообработки происходят твердофазные реакции, в том числе каталитически инициированные, между микро- и наноминералами (кварц, слюда) и некристаллическим углеродом шунгитовых пород, в результате которых происходит синтезирование наноматериалов. Вообще, процессы формирования наноструктур, как отмечает в своих работах В. В. Ковалевский, очень чувствительны к типу шунгитовых пород и условиям эксперимента.

Современные представления об определенных корреляционных связях между геологическими критериями, геохимическими модулями, пиковой температурой метаморфизма, сорбционной активностью и эффективностью экранирования планируется использовать в будущих работах по промышленному освоению уникального углеродсодержащего сырья России, так как текущими опытно-промышленными работами не охвачен весь спектр стратиграфических уровней шунгитовых пород и соответствующих им свойств.

Уже на протяжении длительного периода Владимир Викторович участвует в совместных работах с ООО «Шунгитон» по реализации инновационного проекта «Разработка и производство наноструктурированного шунгитового продукта, содержащего гиперфуллереновые структуры и керамические нановолокна».

Владимир Викторович Ковалевский – член Диссертационного Совета Д212.190.06 по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния» в ПетрГУ, член комиссии по приему выпускных экзаменов и защиты дипломов бакалавров и магистров в ПетрГУ. Он член редколлегии журнала «Труды Карельского научного центра РАН (серия „Геология докембрия“)». В настоящее время является председателем Карельского отделения РМО, одновременно оставаясь членом комиссии по органической минералогии РМО. Уже на протяжении многих лет входит в состав ученого совета Института геологии КарНЦ РАН.

В честь 75-летия желаем Владимиру Викторовичу новых творческих успехов и здоровья!

Редакционная коллегия серии «Геология докембрия»

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 176–177
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 176–177

ВИТАЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ШЕКОВ
(к 70-летию со дня рождения)



Шеков Виталий Александрович родился в 1956 году в г. Могилеве, горный инженер-физик, кандидат технических наук. Выпускник горного факультета Ленинградского горного института по специальности «Физические процессы горного производства». С 1984 года его профессиональная деятельность неразрывно связана с Институтом геологии Карельского научного центра РАН (за исключением периода службы в Советской Армии в 1982–1984 годах). В 1995 году он успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Разработка методов оценки комплекса технологических свойств горных пород с целью оптимизации распиловки природного камня на рамных станках».

Научные интересы Виталия Александровича охватывают широкий круг вопросов: физика горных пород, геология и технология строительных материалов, поиск и оценка месторождений облицовочного камня, фотограмметрия, параметрическое моделирование и создание цифровых моделей обнажений. Под его руководством разведаны и утверждены запасы трех карельских месторождений облицовочного камня.

В монографии «Основы стоимостной оценки минерально-сырьевых ресурсов Карелии» (в соавторстве, 2002) приведены методические и информационно-аналитические материалы, представляющие собой основу стоимостной оценки минерально-сырьевых ресурсов Республики Карелия. Выполнен расчет потенциальной стоимости минерального сырья в недрах по административным районам. Представлены результаты анализа основных факторов, позволяющих оценить перспективы освоения различных видов минерального сырья. Приведены результаты расчетов экологического ущерба по видам добываемых полезных ископаемых на действующих горных предприятиях Карелии.

В другой коллективной монографии «Щебень Карелии: свойства, применение и перспективы использования» (2005) приводятся сведения о состоянии в области изучения запасов горных пород для производства щебня и положение промышленности по производству щебня в Карелии. Проведен сравнительный анализ нормативных требований, предъявляемых

к высокопрочному щебню в странах Европейского Союза и Российской Федерации. Особенное внимание уделено Финляндии, как стране, расположенной в схожих условиях. Рассмотрены различные аспекты развития промышленности по производству щебня в Республике Карелия. Сделан анализ ситуации с дробленым камнем в мире на примерах США, Финляндии и частично других стран, проведен обзор методик, используемых в европейских странах для оценки качества щебня, проведено сравнение западноевропейских методик с российскими. Выполнен анализ требований, предъявляемых к месторождениям строительного камня в Финляндии.

Помимо названных монографий, В. А. Шеков является автором более 120 научных публикаций. Среди последних работ, заслуживающих особого внимания: «The paradigm of a parametric geological model of the surrounding underground space of an array based on a crack of nonzero width» (2020), «Universal Approach for Risk Identification and Evaluation in Underground Facilities» (2020, soauthor.), «Цифровая модель обнажения как современный метод исследования геосреды на примере докембрийских комплексов Лахденпохского района» (2020, в соавторстве), а также «Спектральный состав сейсмических микроколебаний и размеры активных структурно-тектонических блоков горных пород на участке Куркиеки (Северное Приладожье)» (2019, в соавторстве).

На протяжении многих лет Виталий Александрович выступает научным руководителем проектов по природному камню, выполняемых как в рамках институтской тематики, так и по договорам с производственными компаниями. Он стал одним из ключевых разработчиков концепции развития минерально-строительных материалов Республики Карелия (во исполнение Постановления Правительства РК от 28.02.1995 № 160). Виталий Александрович активно участвует в научных конференциях, семинарах, международных и региональных выставках камней, а также читает лекции в Петрозаводском государственном университете – курсы «Физика горных пород», «Правовые основы ведения горных работ», «Основы горного дела», «Процессы открытых горных работ», «Планирование открытых горных работ» и другие.

Одним из ярких примеров творческой инициативы является организованная в 2003 году экскурсия по проекту «Развитие сетей и сырьевых ресурсов предприятий в области переработки камня» для большой группы финских специалистов.

Кроме того, по инициативе В. А. Шекова при Институте геологии был создан аккредитованный Испытательный центр, где по заказам горнодобывающих компаний определяются физико-механические характеристики пород; здесь в полной мере проявились его незаурядные организаторские способности.

В 2012 году он инициировал исследования по использованию горно-индустриального наследия в туристической сфере. Итогом стала подготовка и издание двух монографий – на русском («Дорога горных промыслов», 2014) и английском языках («Mining Road», 2014).

С 2008 года Виталий Александрович является экспертом Национальной Ассоциации по экспертизе недр. Его заслуги отмечены Почетной грамотой Главы Республики Карелия и межотраслевым почетным знаком «Горняцкая слава» III степени.

Коллектив Института геологии КарНЦ РАН сердечно поздравляет Виталия Александровича с юбилеем и желает ему крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, новых открытий и успешного воплощения всех замыслов.

Редакционная коллегия серии
«Геология докембрия»

Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 10. С. 178–179
Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2026. No. 10. P. 178–179

ЕВГЕНИЯ НИКОЛАЕВНА СВЕТОВА
(к 50-летию со дня рождения)



Светова (Котова) Евгения Николаевна родилась 25 июня 1976 года в г. Сыктывкаре. В 1999 году она окончила физический факультет Сыктывкарского государственного университета. Ее трудовая биография в науке началась еще во время учебы: в 1998 году она пришла на должность техника-лаборанта в лабораторию региональной минералогии Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. С 1999 по 2002 годы проходила обучение в очной аспирантуре Коми НЦ УрО РАН по специальности 25.00.05 – «Минералогия, кристаллография», а в 2003 году успешно защитила кандидатскую диссертацию на тему «Радиоспектроскопия породообразующего кварца в задачах расчленения и корреляции геологических объектов».

На раннем этапе работы в ИГ Коми НЦ УрО РАН научные интересы Евгении Николаевны были сосредоточены на изучении структурных особенностей минералов. Эти исследования имели не только фундаментальное значение для кристаллохимии и генетической минералогии, но и открывали прикладные перспективы в области переработки минерального сырья. В ходе радиоспектроскопических экспериментов ею были получены новые данные о реальной структуре кварца, кальцита и других минералов. В частности, на уникальном керновом материале Кольской сверхглубокой скважины была установлена дифференциация структурных дефектов в породообразующем кварце, обусловленная как литологической неоднородностью пород и наложением вторичных процессов, так и глубиной залегания. Изучение кварца песчаных толщ сысольской площади (юг Республики Коми) позволило выявить латеральную неоднородность песков, определить признаки генетически различных источников сноса и дать оценку предельной обогатимости этих песков как сырья для стекольной промышленности. Кроме того, выполнялись исследования по выявлению особо чистых разностей жильного кварца на промышленных месторождениях Приполярного Урала и других регионов.

С 2010 года Евгения Николаевна работает в Институте геологии Карельского научного центра РАН в должности старшего научного

сотрудника. Основными направлениями ее деятельности на современном этапе являются генетическая и технологическая минералогия, а также физика минералов. Среди ключевых исследований в этот период следует особо выделить: комплексное изучение высококремнистых пород Гирвас-Эльмусской зоны Центральной Карелии с целью определения их пригодности для получения кварцевых концентратов различного назначения; оценку условий минералообразования и анализ примесного состава жильного кварца Койкарской структуры; изучение морфологии и кристаллохимии турмалина из реликта палеопротерозойского Гирвасского палеовулкана; оценка технологических свойств кварца из техногенных отвалов слюдоносных пегматитов Северной Карелии; анализ гидротермальных систем в протерозойских вулканитах Онежской структуры, включая вопросы минералогии и происхождения агатов в подушечных лавах; изучение гидротермальной минерализации в мезопротерозойских вулканитах Пашско-Ладожского бассейна. Результаты этих исследований опубликованы в серии статей в ведущих российских и зарубежных изданиях. Примечательно, что, хотя все публикации подготовлены в соавторстве, в подавляющем большинстве случаев именно Е. Н. Светова выступает первым автором. Активное научное сотрудничество налажено с Институтом геологии Коми НЦ УрО РАН, Институтом геологии и минералогии СО РАН, а также с физико-техническим институтом Петрозаводского государственного университета.

Общественная и научно-организационная деятельность Евгении Николаевны также заслуживает высокой оценки. С 2020 года она является ответственным секретарем редакционной коллегии журнала «Труды КарНЦ РАН» (серия «Геология докембрия»); ее ответственный подход к подготовке выпусков способствует поддержанию высокого рейтинга издания в «Белом списке журналов» 1-й категории. Особого упоминания заслуживает ее работа в качестве ученого секретаря комиссии по технологической минералогии Российского минералогического общества. В рамках этой деятельности Е. Н. Светова на протяжении многих лет выступает не только активным автором, но и соредактором ежегодных научных сборников и материалов всероссийских семинаров.

Научные достижения Евгении Николаевны отмечены на высоком уровне: в 2007 году она была удостоена Премии Главы Республики Коми в области фундаментальных научных исследований для молодых ученых, а в 2024 году – Почетной грамоты Российской академии наук.

Коллектив института, соавторы и коллеги от всей души желают Евгении Николаевне крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, новых ярких открытий и дальнейших творческих успехов на благо российской геологической науки!

Редакционная коллегия серии
«Геология докембрия»

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(требования к работам, представляемым к публикации в «Трудах Карельского научного центра Российской академии наук»)

«Труды Карельского научного центра Российской академии наук» (далее – Труды КарНЦ РАН) публикуют результаты завершенных оригинальных исследований в различных областях современной науки: теоретические и обзорные статьи, сообщения, материалы о научных мероприятиях (симпозиумах, конференциях и др.), персоналии (юбилеи и даты, утраты науки), статьи по истории науки. Представляемые работы должны содержать новые, ранее не публиковавшиеся данные.

Статьи проходят обязательное рецензирование. Решение о публикации принимается редакционной коллегией серии или тематического выпуска Трудов КарНЦ РАН после рецензирования, с учетом научной значимости и актуальности представленных материалов. Редколлегии серий и отдельных выпусков Трудов КарНЦ РАН оставляют за собой право возвращать без регистрации рукописи, не отвечающие настоящим правилам.

При получении редакцией рукопись регистрируется (в случае выполнения авторами основных правил ее оформления) и направляется на отзыв рецензентам. Отзыв состоит из ответов на типовые вопросы анкеты и может содержать дополнительные расширенные комментарии. Кроме того, рецензент может вносить замечания и правки в текст рукописи. Авторам высылается электронная версия анкеты и комментарии рецензентов. Доработанный экземпляр автор должен вернуть в редакцию вместе с первоначальным экземпляром и ответом на все вопросы рецензента не позднее чем через месяц после получения рецензии. Перед опубликованием авторам высылается электронная версия статьи, которую авторы вычитывают и заверяют.

Журнал имеет систему электронной редакции на базе Open Journal System (OJS), позволяющую вести представление и редактирование рукописи, общение автора с редколлегиями серий и рецензентами в электронном формате и обеспечивающую прозрачность процесса рецензирования при сохранении анонимности рецензентов (http://journals.krc.karelia.ru/).

Содержание выпусков Трудов КарНЦ РАН, аннотации и полнотекстовые электронные версии статей, а также другая полезная информация, включая настоящие Правила, доступны на сайтах – http://transactions.krc.karelia.ru; http://journals.krc.karelia.ru

Почтовый адрес редакции: 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, КарНЦ РАН, редакция Трудов КарНЦ РАН. Телефон: (8142) 762018.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Статьи публикуются на русском или английском языке. Рукописи должны быть тщательно выверены и отредактированы авторами.

Объем рукописи (включая таблицы, список литературы, подписи к рисункам, рисунки) не должен превышать: для обзорных статей – 30 страниц, для оригинальных – 25, для сообщений – 15, для хроники и рецензий – 5–6. Объем рисунков не должен превышать 1/4 объема статьи. Рукописи большего объема (в исключительных случаях) принимаются при достаточном обосновании по согласованию с ответственным редактором.

При оформлении рукописи применяется полуторный межстрочный интервал, шрифт Times New Roman, кегль 12, выравнивание по обоим краям. Размер полей страницы – 2,5 см со всех сторон. Все страницы, включая список литературы и подписи к рисункам, должны иметь сплошную нумерацию в нижнем правом углу. Страницы с рисунками не нумеруются.

Рукописи подаются в электронном виде в формате MS Word в систему электронной редакции на сайте http://journals.krc.karelia.ru либо высылаются на e-mail: trudy@krc.karelia.ru, или же представляются в редакцию лично (г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, каб. 502).

Для публикации в выпусках серии «Математическое моделирование и информационные технологии» рукописи принимаются в формате .tex (LaTex 2ε) с использованием стилевого файла, который находится по адресу http://transactions.krc.karelia.ru/section.php?id=755.

Обязательные элементы рукописи располагаются в следующем порядке:

УДК курсивом в левом верхнем углу первой страницы; заглавие статьи на русском языке полужирным шрифтом; инициалы и фамилии авторов на русском языке полужирным шрифтом; полное название и полный почтовый адрес организации – места работы каждого автора в именительном падеже на русском языке курсивом (если авторов несколько и работают они в разных учреждениях, следует отметить арабскими цифрами соответствие фамилий авторов аффилированным организациям; следует отметить звездочкой автора, ответственного за переписку, и указать в аффилиации его электронный адрес); аннотация на русском языке; ключевые слова на русском языке; указание источников финансирования выполненных исследований на русском языке.

Далее располагаются все вышеуказанные элементы на английском языке.

Текст статьи (статьи экспериментального характера, как правило, должны иметь разделы: **Введение**. **Материалы и методы**. **Результаты и обсуждение**. **Выводы** либо **Заключение**); благодарности; списки литературы на языке оригинала (**Литература**) и на английском языке (**References**); таблицы на русском и английском языках (на отдельных листах); рисунки (на отдельных листах); подписи к рисункам на русском и английском языках (на отдельном листе).

На отдельном листе дополнительные сведения об авторах: фамилии, имена, отчества всех авторов полностью на русском и английском языке; должности, ученые звания, ученые степени авторов; адрес электронной почты каждого автора; можно указать телефон для контакта редакции с авторами статьи.

ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ должно точно отражать ее содержание и состоять из 8–10 значащих слов.

АННОТАЦИЯ должна быть лишена вводных фраз, создавать возможно полное представление о содержании статьи и иметь объем не менее 200 слов. Рукопись с недостаточно раскрывающей содержание аннотацией может быть отклонена.

Отдельной строкой приводится перечень КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ (как правило, не менее пяти). Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой, в конце точка не ставится.

Раздел «Материалы и методы» должен содержать сведения об объекте исследования с обязательным указанием латинских названий и сводок, по которым они приводятся, авторов классификаций и пр. Транскрипция географических названий должна соответствовать атласу последнего года издания. Единицы физических величин приводятся по Международной системе СИ. Желательна статистическая обработка всех количественных данных. Необходимо возможно точнее обозначать местонахождения (в идеале – с точным указанием географических координат).

Изложение результатов должно заключаться не в пересказе содержания таблиц и графиков, а в выявлении следующих из них закономерностей. Автор должен сравнить полученную им информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна. На табличный и иллюстративный материал следует ссылаться так: на рисунки, фотографии и таблицы в тексте (рис. 1, рис. 2, табл. 1, табл. 2 и т.д.), фотографии, помещаемые на вклейках (рис. I, рис. II). Обсуждение завершается формулировкой в разделе «Заключение» основного вывода, которая должна содержать конкретный ответ на вопрос, поставленный во «Введении». Ссылки на литературу в тексте даются фамилиями, например: Карху, 1990 (один автор); Раменская, Андреева, 1982 (два автора); Крутов и др., 2008 (три автора или более) либо первым словом описания источника, приведенного в списке литературы, и заключаются в квадратные скобки. При перечислении нескольких источников работы располагаются в хронологическом порядке, например: [Иванов, Топоров, 1965; Успенский, 1982; Erwin et al., 1989; Атлас..., 1994; Longman, 2001].

ТАБЛИЦЫ нумеруются в порядке упоминания их в тексте, каждая таблица имеет свой заголовок. Заголовки таблиц, заголовки и содержание столбцов, строк, а также примечания приводятся на русском и английском языках. Диаграммы и графики не должны дублировать таблицы. Материал таблиц должен быть понятен без дополнительного обращения к тексту. Все сокращения, использованные в таблице, поясняются в Примечании, расположенном под ней. При повторении цифр в столбцах нужно их повторять, при повторении слов – в столбцах ставить кавычки. Таблицы могут быть книжной или альбомной ориентации**.**

РИСУНКИ представляются отдельными файлами с расширением TIFF (*.TIF) или JPG. При первичной подаче материала в редакцию рисунки вставляются в общий текстовый файл. При сдаче материала, принятого в печать, все рисунки должны быть представлены в виде отдельных файлов в вышеуказанном формате. Графические материалы могут быть снабжены указанием желательного размера рисунка, пожеланиями и требованиями к конкретным иллюстрациям. На каждый рисунок должна быть как минимум одна ссылка в тексте. Иллюстрации объектов, исследованных с помощью фотосъемки, микроскопа (оптического, электронного трансмиссионного и сканирующего), должны сопровождаться масштабными линейками, причем в подрисуночных подписях надо указать длину линейки. Приводить данные о кратности увеличения необязательно, поскольку при публикации рисунков размеры изменятся. Карты желательно приводить с координатной сеткой, обозначениями населенных пунктов и/или названиями физико-географических объектов и разной фактурой для воды и суши. В углу карты желательна врезка с картой более мелкого масштаба, где обозначен представленный на основной карте участок.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ приводятся на русском и английском языках, должны содержать достаточную информацию для того, чтобы приводимые данные могли быть понятны без обращения к тексту (если эта информация уже не дана в другой иллюстрации). Аббревиации расшифровываются в подрисуночных подписях, детали на рисунках следует обозначать цифрами или буквами, значение которых также приводится в подписях.

ЛАТИНСКИЕ НАЗВАНИЯ. Названия таксонов рода и вида даются курсивом. Для флористических, фаунистических и таксономических работ при первом упоминании в тексте и таблицах приводится русское название вида (если такое название имеется) и полностью – латинское, с автором и желательно с годом, например: водяной ослик (*Asellus aquaticus* (L., 1758)). В дальнейшем можно употреблять только русское название или сокращенное латинское без фамилии автора и года опубликования, например, для брюхоногого моллюска *Margarites groenlandicits* (Gmelin, 1790) – *M. groenlandicus* или для подвида *M. g. umbilicalis*.

СОКРАЩЕНИЯ. Разрешаются лишь общепринятые сокращения – названия мер, физических, химических и математических величин и терминов и т. п. Все прочие сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

БЛАГОДАРНОСТИ. Располагаются после основного текста статьи отдельным абзацем, в котором авторы выражают признательность частным лицам, сотрудникам учреждений и организациям, оказавшим содействие в проведении исследований и подготовке статьи.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ. При подаче статьи авторы должны раскрыть потенциальные конфликты интересов, которые могут быть восприняты как оказавшие влияние на результаты или выводы, представленные в работе. Если конфликт интересов отсутствует, следует об этом сообщить в отдельной формулировке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Источники располагаются в алфавитном порядке. Все ссылки даются на языке оригинала (названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский шрифт, пишутся в русской транскрипции). Сначала приводится список работ на русском языке и на языках с близким алфавитом (украинский, болгарский и др.), а затем – работы на языках с латинским алфавитом. В списке литературы между инициалами авторов ставится пробел.

REFERENCES. Приводится отдельным списком, повторяя все позиции основного списка литературы. Библиографические записи источников оформляются согласно стилю Vancouver (см. примеры в ГОСТ Р 7.0.7-2021 и образцы ниже) и располагаются в алфавитном порядке. Заголовки русскоязычных работ приводятся на английском языке; для журналов и сборников, в которых размещены цитируемые работы, указывается параллельное английское наименование (при его наличии) либо русскоязычное наименование приводится в латинской транслитерации (вариант BSI) с переводом на английский язык. Прочие элементы библиографической записи приводятся на английском языке (русскоязычное название издательства транслитерируется). При наличии переводной версии источника в References желательно указать ее. Библиографические описания прочих работ приводятся на языке оригинала.

Для каждого источника обязательно указание DOI при его наличии; если приводится адрес интернет-страницы источника (URL), нужно указать дату обращения к ней.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ 1-Й СТРАНИЦЫ

УДК 577.125.8

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАБОЛИТОВ ОКСИДА АЗОТА В КРОВИ ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ И ПАЦИЕНТОВ С АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИЕЙ, ИМЕЮЩИХ РАЗНЫЕ АЛЛЕЛЬНЫЕ ВАРИАНТЫ ГЕНОВ *ACE* (RS4340) И *CYP11B2* (RS1799998)

Л. В. Топчиева[1]*, О. В. Балан[1], В. А. Корнева[2], И. Е. Малышева[1]

*[1] Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *topchieva@ya.ru*

[2] Петрозаводский государственный университет (просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Аннотация на русском языке

Ключевые слова: артериальная гипертензия; оксид азота; индуцибельная синтаза оксида азота; ангиотензинпревращающий фермент; инсерционно-делеционный полиморфизм гена *ACE*; альдостеронсинтаза; ген *CYP11B2*

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (0218-2019-0077).

L. V. Topchieva[1]*, O. V. Balan[1], V. A. Korneva[2], I. E. Malysheva[1]. THE NITRIC OXIDE LEVEL IN THE BLOOD OF HEALTHY PEOPLE AND PATIENTS WITH ARTERIAL HYPERTENSION CARRYING DIFFERENT ALLELE VARIANTS OF THE *ACE* (RS4340) AND *CYP11B2* (RS1799998) GENES

*[1] Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *topchieva@ya.ru*

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

Аннотация на английском языке

Keywords: arterial hypertension; nitric oxide; inducible nitric oxide synthase; angiotensin-converting enzyme; insertion-deletion polymorphism of *ACE* genes; aldosterone synthase; *CYP11B2* gene

Fundung. The study was funded from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (0218-2019-0077).

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТАБЛИЦЫ

Таблица 2. Ультраструктура клеток мезофилла листа в последействии 10-минутного охлаждения (2 °С) проростков или корней пшеницы
Table 2. Ultrastructure of leaf mesophyll cells after the exposure of wheat seedlings or roots to 10 min of chilling at 2 °C

Показатель Index	Контроль Control	Охлаждение проростков Seedling chilling	Охлаждение корней Root chilling
Площадь среза хлоропласта, мкм^2 Chloroplast cross-sectional area , μm^2	10,0 ± 0,7	13,5 ± 1,1	12,7 ± 0,5
Площадь среза митохондрии, мкм^2 Mitochondria cross-sectional area, μm^2	0,4 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,6 ± 0,04
Площадь среза пероксисомы, мкм^2 Peroxisome cross-sectional area, μm^2	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1
Число хлоропластов на срезе клетки, шт. Number of chloroplasts in cell cross-section	9 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число митохондрий на срезе клетки, шт. Number of mytochondria in cell cross-section	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
Число пероксисом на срезе клетки, шт. Number of peroxisomes in cell cross-section	2 ± 0,3	2 ± 0,3	3 ± 0,4

Примечание. Здесь и в табл. 3: все параметры ультраструктуры измеряли через 24 ч после охлаждения.
Note. Here and in Tab. 3 all ultrastructure parameters were measured 24 h after chilling.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ПОДПИСИ К РИСУНКУ

Рис. 1. Северный точильщик (*Hadrobregmus confuses* Kraaz.)
Fig. 1. Woodboring beetle *Hadrobregmus* confuses Kraaz.

Рис. 5. Результаты изучения кристаллитов и демпферных зон в образце кварца из Дульдурги:

а – электронная микрофотография кварца; б – картина микродифракции, полученная для участка *1* в области кристаллитов; в – картина микродифракции, отвечающая участку *2* в области демпферных зон

Fig. 5. Results of the study of crystallites and damping zones in a quartz sample from Duldurga:

а – electron microphotograph of the quartz sample; б – microdiffraction image of site 1 in the crystallite area; в – microdiffraction image corresponding to site 2 in the damping area

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ССЫЛОК В СПИСКАХ ЛИТЕРАТУРЫ

Ссылки на книги

Литература:

Вольф Г. Н. Дисперсия оптического вращения и круговой дихроизм в органической химии / Ред. Г. Снатцке. М.: Мир, 1970. С. 348–350.

Патрушев Л. И. Экспрессия генов. М.: Наука, 2000. 830 с.

Красная книга Республики Карелия / Ред. О. Л. Кузнецов. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques / Eds. P. V. Sundaram, F. L. Eckstein. N. Y., San Francisco: Acad. Press, 1978. P. 169–188.

References:

Vol'f G. N. Optical rotatory dispersion and circular dichroism in Organic Chemistry. Moscow: Mir Publ.; 1970. P. 348–350. (In Russ.)

Patrushev L. I. Gene expression. Moscow: Nauka Publ.; 2000. 830 p. (In Russ.)

Kuznetsov O. L. (ed.). Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod: Konstanta Publ.; 2020. 448 p. (In Russ.)

Knorre D. G., Laric O. L. Theory and practice in affinity techniques. N. Y., San Francisco: Acad. Press; 1978. P. 169–188.

Ссылки на статьи

Литература:

Викторов Г. А. Межвидовая конкуренция и сосуществование экологических гомологов у паразитических перепончатокрылых // Журнал общей биологии. 1970. Т. 31, № 2. С. 247–255.

Колосова Ю. С., Подболоцкая М. В. Популяционная динамика шмелей (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) на Соловецком архипелаге: итоги 10-летнего мониторинга // Труды Русского энтомологического общества. 2010. Т. 81, № 2. С. 135–141.

Grove D. J., Loisides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri* // J. Fish. Biol. 1978. Vol. 12, no. 4. P. 507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of Incertella Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia // Entomologica Fennica. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 4–8. doi: 10.33338/ef.84453

References:

Viktorov G. A. Interspecific competition and coexistence ecological homologues in parasitic Hymenoptera. *Biology Bulletin Reviews.* 1970;31(2):247–255. (In Russ.)

Kolosova Yu. S., Podbolotskaya M. V. Population dynamics of bumblebees (Hymenoptera, Apidae, *Bombus* Latr.) in the Solovetsky archipelago: results of 10-year monitoring. *Trudy Russ. entomol. obshchestva = Proceed. Russ. Entomol. Soc.* 2010;81(2):135–141. (In Russ.)

Grove D. J., Loisides L., Nott J. Satiation amount, frequency of feeding and emptying rate in *Salmo gairdneri. J. Fish. Biol.* 1978;12(4):507–516.

Nartshuk E. P., Przhiboro A. A. A new species of Incertella Sabrosky (Diptera: Chloropidae) from the White Sea coast, Russian Karelia. *Entomologica Fennica*. 2009;20(1):4–8. doi: 10.33338/ef.84453

Ссылки на материалы конференций

Литература:

Марьинских Д. М. Разработка ландшафтного плана как необходимое условие устойчивого развития города (на примере Тюмени) // Экология ландшафта и планирование землепользования: Тезисы докл. Всерос. конф. (Иркутск, 11–12 сент. 2000 г.). Новосибирск, 2000. С. 125–128.

References:

Mar'inskikh D. M. Landscape planning as a necessary condition for sustainable development of a city (example of Tyumen). *Ekologiya landshafta i planirovanie zemlepol'zovaniya*: Tezisy dokl. Vseros. konf. (Irkutsk, 11–12 sent. 2000 g.) = Landscape ecology and land-use planning: abstracts of all-Russian conference (Irkutsk, Sept. 11–12, 2000). Novosibirsk; 2000. P. 125–128. (In Russ.)

Ссылки на диссертации или авторефераты диссертаций

Литература:

Шефтель Б. И. Экологические аспекты пространственно-временных межвидовых взаимоотношений землероек Средней Сибири: Автореф. дис. … канд. биол. наук. М., 1985. 23 с.

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. … д-ра хим. наук. Петрозаводск, 2006. 481 с.

References:

Sheftel' B. I. Ecological aspects of spatio-temporal interspecies relations of shrews of Middle Siberia: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Moscow; 1985. 23 p. (In Russ.)

Lozovik P. A. Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Petrozavodsk; 2006. 481 p. (In Russ.)

Ссылки на патенты

Литература:

Еськов Д. Н., Серегин А. Г. Оптико-электронный аппарат / Патент России № 2122745. 1998. Бюл. № 33.

References:

Es'kov D. N., Seregin A. G. Optoelectronic apparatus. Russian patent No. 2122745. 1998. Bull. No. 33. (In Russ.)

Ссылки на архивные материалы

Литература:

Гребенщиков Я. П. К небольшому курсу по библиографии: материалы и заметки, 26 февр. – 10 марта 1924 г. // ОР РНБ. Ф. 41. Ед. хр. 45. Л. 1–10.

References:

Grebenshchikov Ya. P. Brief course on bibliography: the materials and notes, Febr. 26 – March 10, 1924. *OR RNB*. F. 41. St. un. 45. L. 1–10. (In Russ.)

Ссылки на интернет-ресурсы

Литература:

Паринов С. И., Ляпунов В. М., Пузырев Р. Л. Система Соционет как платформа для разработки научных информационных ресурсов и онлайновых сервисов // Электрон. б-ки. 2003. Т. 6, вып. 1. URL: http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/ (дата обращения: 25.11.2006).

References:

Parinov S. I., Lyapunov V. M., Puzyrev R. L. Socionet as a platform for development of scientific information resources and online services. *Elektron. b-ki = Digital library*. 2003;6(1). (In Russ.) URL: http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2003/part1/PLP/ (accessed: 25.11.2006).

Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
No. 10, 2026
PRECAMBRIAN GEOLOGY

TABLE OF CONTENTS

REVIEWS

V. I. Ivashchenko. LITHIUM AND RARE-EARTH METAL RESOURCE POTENTIAL IN THE REPUBLIC OF KARELIA 5

S. A. Svetov. GEOLOGICAL HERITAGE OF THE REPUBLIC OF KARELIA: CURRENT STATE, PROSPECTS FOR USE, AND ROLE IN REGIONAL DEVELOPMENT 24

ORIGINAL ARTICLES

O. I. Volodichev, T. I. Kuzenko, O. A. Maksimov. SUBSOLIDUS METAMORPHISM OF OLIVINE GABBRONORITES FROM THE BELOMORIAN MOBILE BELT OF THE FENNOSCANDIAN SHIELD 54

S. A. Svetov, E. N. Svetova. MINERALOGY AND CONDITIONS OF FORMATION OF PEGMATITE LENSE IN PALEOPROTEROZOIC GABBRODOLERITES OF THE ROPRUCHI SILL (ONEGA BASIN, KARELIAN CRATON) 73

M. V. Soloninkina, V. V. Shchiptsov, D. V. Loginov, N. N. Rozhkova. GEOLOGY, MINERALOGY AND TECHNOLOGY OF GRAPHITE ORES OF THE IHALA DEPOSIT (WESTERN LADOGA AREA, REPUBLIC OF KARELIA) 91

E. N. Svetova, S. I. Isaenko. DUMORTIERITE IN ROSE QUARTZ FROM THE PIRTOSTROV OCCURRENCE IN NORTHERN KARELIA 110

SHORT COMMUNICATIONS

S. Mishra, A. Slabunov, M. F. Cerca Ruiz, V. Singh, E. González-Partida. PALEOPROTEROZOIC S-TYPE GRANITES FROM LESSER HIMALAYA, INDIA: COMPOSITION, ZIRCON GEOCHRONOLOGY, ND-SYSTEMATICS AND GEODYNAMIC SETTING 121

V. R. Vetrin, A. A. Kremenetskiy. ANCIENT ZIRCONS FROM CENOZOIC BASALTS OF ICELAND: COMPOSITION AND SOURCES OF THE SUBSTANCE 127

A. G. Goev, K. A. Dokukina. THE UPPER MANTLE STRUCTURE OF THE KOLA REGION FROM NEW SEISMOLOGICAL DATA 134

A. V. Stepanova, V. V. Ustinova, S. Y. Chazhengina. POLYSTADIAL INTERACTION OF MAFIC MELTS AND SHUNGITE ROCKS IN THE PALEOPROTEROZOIC ONEGA BASIN 141

HISTORY OF SCIENCE

V. V. Shchiptsov, S. A. Svetov, A. V. Pervunina. INSTITUTE OF GEOLOGY, KARELIAN RESEARCH CENTRE RAS – 65 YEARS OF PROGRESS AND KEY MILESTONES 150

CHRONICLE

V. V. Shchiptsov. 27th Russian Process Mineralogy Workshop 168

DATES AND ANNIVERSARIES

Centennial of Willam I. Robonen (1926–2014) 170

Centennial of Eleonora I. Devyatova (1926–2011) 172

75th Anniversary of Vladimir V. Kovalevsky 174

70th Anniversary of Vitaly A. Shekov 176

50th Anniversary of Evgeniya N. Svetova 178

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 180

Научный журнал

Труды Карельского научного центра
Российской академии наук
№ 10, 2026

ГЕОЛОГИЯ ДОКЕМБРИЯ

Печатается по решению Ученого совета
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»

Выходит 12 раз в год

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационная запись ПИ № ФС 77-72429 от 28.02.2018 г.

Редактор М. А. Радостина
Компьютерная верстка М.И. Фёдорова

Подписано в печать 22.10.2026. Дата выхода 30.10.2026. Формат 60×84 1/8.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 20,8. Усл. печ. л. 21,86.
Тираж 100 экз. Заказ 923. Цена свободная

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

Оригинал-макет: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН

Типография: Редакционно-издательский отдел КарНЦ РАН
185030, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50